

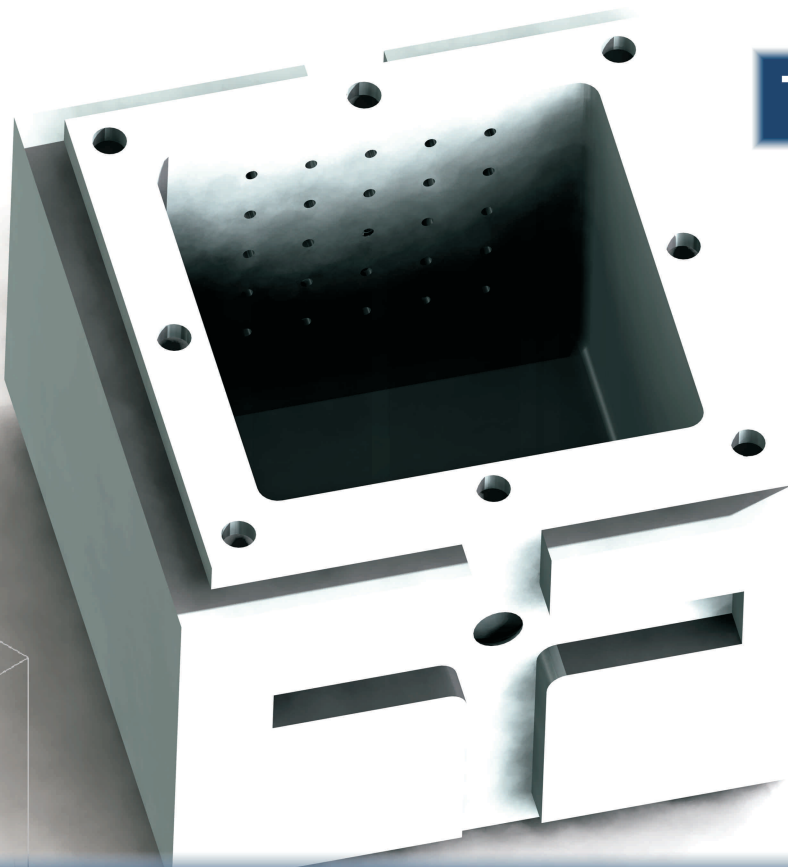


UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Departamento de Ingeniería de Procesos

# MODELIZACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE NUEVO MOLDE ELECTROCONFORMADO PARA ROTOMOLDEO CON CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO DIRECTO MEDIANTE FLUIDO TÉRMICO

PABLO RUBÉN BORDÓN PÉREZ

**TESIS DOCTORAL**



Septiembre de 2011  
Las Palmas de Gran Canaria





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Departamento de Ingeniería de Procesos

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DESALINIZACIÓN

# MODELIZACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE NUEVO MOLDE ELECTROCONFORMADO PARA ROTOMOLDEO CON CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO DIRECTO MEDIANTE FLUIDO TÉRMICO

**TESIS DOCTORAL**

Autor

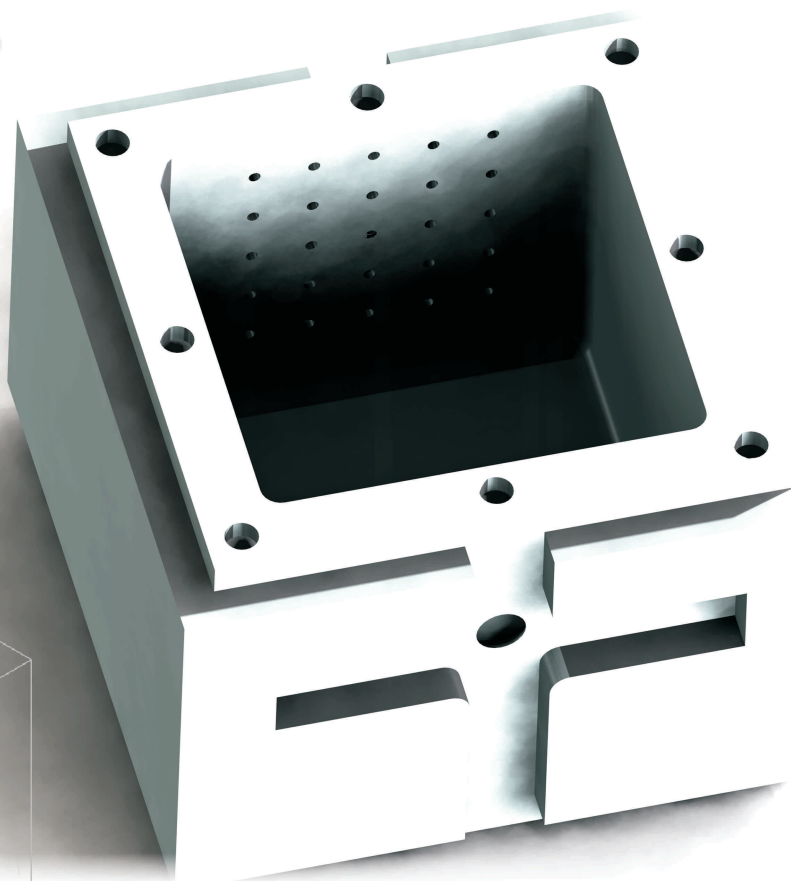
Fdo: D. Pablo Rubén Bordón Pérez

Director

Fdo: Dr. D. Antonio Nizado Benítez Vega

Director

Fdo: Dr. D. Mario Monzón Verona



Las Palmas de Gran Canaria, a 29 de septiembre de 2011



A mi referente en la vida,  
por su incondicional y constante  
apoyo, ayuda y comprensión; mi padre.

A mi mujer Yurena,  
por comprender y soportar las horas  
de soledad que esta Tesis le ha ocasionado.

Al resto de mi familia,  
pues sin ellos tampoco nada de esto tendría sentido.



## **AGRADECIMIENTOS**

Como sucede en todos los ámbitos de la vida, todos necesitamos el aliento y apoyo de los seres próximos para conseguir nuestros deseos, y en mi caso, y en cuanto al desarrollo de esta Tesis Doctoral, no iba a ser diferente. Inicialmente quisiera mostrar mi enorme respeto y agradecimiento al Dr. Antonio Nizado Benítez Vega, que desde el primer momento implantó la amistad y la sinceridad como los primeros valores indispensables para una plena y óptima complicidad. En estos años, no sólo ha promovido, guiado, corregido y revisado este trabajo académico, sino parte de mis conocimientos, inquietudes y aspectos más personales de mi vida. Solo lamento no poder corresponderle, pues realmente su esfuerzo y dedicación es inmensurable.

Mis agradecimientos deben continuar de forma inestimable hacia el Dr. Mario Monzón Verona, promotor intelectual principal de esta Tesis Doctoral, cuya implicación, visión, sabiduría e intuición han sido primordiales en todo momento, además de su valiosa y generosa amistad. Espero haber estado a su altura de miras.

Gracias también a la contribución de todos los integrantes del LFI de la ULPGC ha sido posible, de una manera u otra y en menor o mayor medida, completar este laborioso y complicado trabajo, fundamentalmente en el aspecto experimental, donde todos han hecho su aporte de forma incuestionable y desinteresada.

Finalmente, dar mi agradecimiento a Rafael Jubindo Elizalde y Atilio Ley Elizalde, ambos jefes y, aún más, amigos en DEBEOCAN S.L., donde durante todo este tiempo y con todo el apoyo posible he podido compatibilizar mi ejercicio profesional con el desarrollo de este trabajo. Indudablemente, junto a mi paciente, apreciada y valiosa familia, resultan una pieza principal de este complicado puzzle.

Las Palmas, España. Septiembre 2011





---

**TABLA DE CONTENIDOS**


---

|  |              |
|--|--------------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b>   | <b>i</b>     |
| <b>TABLA DE CONTENIDOS</b>   | <b>iii</b>   |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>  | <b>ix</b>    |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>   | <b>xiii</b>  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS</b>   | <b>xxiii</b> |
| <b>RESUMEN</b>   | <b>xxv</b>   |
| <b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b>  | <b>3</b>     |
| 1.1. PROPÓSITO DE LA TESIS   | 4            |
| 1.2. FASES DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN  | 5            |
| 1.2.1. Fase I. Estudio y análisis del proceso de rotomoldeo.                             | 5            |
| 1.2.2. Fase II. Análisis y desarrollo de un nuevo molde de rotomoldeo                    | 5            |
| 1.2.3. Fase III. Fabricación y experimentación de nuevo molde de rotomoldeo.             | 6            |
| 1.3. CONDICIONANTES DE LOS TRABAJOS  | 6            |
| 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS.   | 7            |
| <b>CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL ROTOMOLDEO Y ESTADO DEL ARTE</b>                         | <b>11</b>    |
| 2.1. INTRODUCCIÓN  | 11           |
| 2.2. MÁQUINAS Y MOLDES   | 15           |
| 2.2.1. Máquinas  | 15           |
| 2.2.2. Moldes  | 18           |
| 2.3. ETAPAS DEL PROCESO DE ROTOMOLDEO  | 20           |
| 2.3.1. Etapa de inducción  | 21           |
| 2.3.2. Etapa de sinterización  | 22           |
| 2.3.3. Etapa de densificación  | 24           |
| 2.3.4. Etapas de enfriamiento inicial, cristalización y enfriamiento final               | 26           |
| 2.4. MATERIALES UTILIZADOS PARA MOLDEO ROTACIONAL  | 28           |
| 2.4.1. Forma, tamaño y distribución de tamaño de partícula                               | 29           |
| 2.4.2. Peso molecular y distribución de pesos moleculares                                | 30           |
| 2.4.3. Cristalinidad   | 30           |
| 2.5. INNOVACIONES EN MOLDEO ROTACIONAL   | 31           |
| 2.5.1. Métodos alternativos de calefacción   | 31           |
| 2.5.2. Presurización de moldes   | 32           |
| 2.5.3. Últimas investigaciones y desarrollos   | 33           |
| <b>CAPÍTULO III. DESARROLLO Y ANÁLISIS TEÓRICO DEL MOLDE DE ROTOMOLDEO<br/>PROTOTIPO</b> | <b>39</b>    |
| 3.1. INTRODUCCIÓN  | 39           |

|   |    |
|---|----|
| 3.2. TECNOLOGÍAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL   | 39 |
| 3.2.1. El proceso de la dinámica de fluidos computacional   | 40 |
| 3.2.2. Etapas en un análisis de CFD   | 41 |
| 3.2.3. Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional.  | 42 |
| 3.2.4. Discretización espacial  | 42 |
| 3.2.4.1. Mallas estructuradas   | 43 |
| 3.2.4.2. Mallas no estructuradas  | 44 |
| 3.2.5. Discretización de las ecuaciones   | 44 |
| 3.2.6. Condiciones de contorno e iniciales  | 47 |
| 3.3. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS  | 48 |
| 3.4. METODOLOGÍA DE DESARROLLO  | 49 |
| 3.5. PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS DE MOLDES Y PROCESOS DE ROTOMOLDEO CONVENCIONALES                                     | 51 |
| 3.5.1. Parámetros principales del proceso de rotomoldeo   | 51 |
| 3.5.2. Parámetros principales de moldes de rotomoldeo   | 52 |
| 3.5.3. Moldes de calentamiento por convección mediante circulación forzada de aire en hornos                            | 52 |
| 3.5.4. Moldes de calentamiento por conducción mediante aceite térmico en circulación forzada                            | 54 |
| 3.5.5. Ventajas e inconveniente de los procesos de rotomoldeo mediante convección forzada por aire y por aceite térmico | 56 |
| 3.6. ANÁLISIS DE MOLDE DE ROTOMOLDEO DE ACEITE CONVENCIONAL   | 57 |
| 3.6.1. Modelado de molde de rotomoldeo convencional de aceite   | 57 |
| 3.6.2. Proceso de simulación numérica   | 58 |
| 3.6.2.1. Preproceso de simulación   | 59 |
| 3.6.2.1.1. Configuración general  | 59 |
| 3.6.2.1.2. Subdominios de fluidos   | 62 |
| 3.6.2.1.3. Materiales sólidos   | 62 |
| 3.6.2.1.4. Condiciones de contorno  | 63 |
| 3.6.2.1.5. Establecimiento de objetivos   | 65 |
| 3.6.2.1.6. Discretización del modelo  | 66 |
| 3.6.2.1.7. Opciones de control de cálculo   | 67 |
| 3.6.2.2. Procesos de simulación   | 67 |
| 3.6.2.2.1. Resolución   | 67 |
| 3.6.2.3. Postproceso de simulación  | 68 |
| 3.6.2.3.1. Obtención de resultados  | 68 |
| 3.6.2.3.1.1. Uniformidad térmica  | 68 |
| 3.6.3. Obtención de resultados de proceso de simulación   | 69 |
| 3.6.3.1. Distribución de temperaturas   | 69 |
| 3.6.3.2. Uniformidad térmica  | 70 |
| 3.7. DISEÑO BÁSICO DEL MOLDE DE ROTOMOLDEO DE CALENTAMIENTO POR ACEITE ENVOLVENTE                                       | 70 |
| 3.7.1. Limitaciones de molde de rotomoldeo de calentamiento por aceite convencional                                     | 70 |
| 3.7.2. Configuración base de molde prototipo de rotomoldeo de calentamiento por aceite envolvente                       | 71 |
| 3.7.3. Diseño básico de molde prototipo de rotomoldeo de calentamiento por aceite envolvente                            | 72 |
| 3.7.3.1. Distribución de temperaturas   | 73 |
| 3.7.3.2. Uniformidad térmica  | 74 |
| 3.8. ESTUDIO BÁSICO COMPARATIVO DE MOLDES DE ROTOMOLDEO CONVENCIONALES Y MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO                  | 75 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.9. DISEÑO AVANZADO DE MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO                                    | 82         |
| 3.9.1. Limitaciones del molde prototipo  | 83         |
| 3.9.2. Estudio del caudal óptimo   | 83         |
| 3.9.3. Estudio de configuraciones de entrada y salida                                    | 88         |
| 3.9.3.1. Introducción  | 88         |
| 3.9.3.2. Bases de cálculo  | 89         |
| 3.9.3.3. Resultados de cálculo   | 89         |
| 3.9.3.4. Análisis de resultados  | 95         |
| 3.9.3.4.1. Uniformidad térmica   | 96         |
| 3.9.3.4.2. Velocidad del proceso   | 98         |
| 3.9.3.4.3. Determinación de modelos óptimos  | 98         |
| 3.9.3.5. Selección de configuración para molde prototipo                                 | 103        |
| 3.9.4. Desarrollo de manifold de molde de rotomoldeo                                     | 105        |
| 3.9.4.1. Consideraciones iniciales   | 105        |
| 3.9.4.2. Limitaciones iniciales y diseño básico de manifold                              | 106        |
| 3.9.4.3. Desarrollo de manifold  | 107        |
| 3.9.5. Diseño completo de molde de rotomoldeo  | 112        |
| 3.9.5.1. Cavidad interior del molde  | 113        |
| 3.9.5.2. Estructura soporte  | 113        |
| 3.9.5.3. Tapa de abertura del molde  | 114        |
| 3.9.5.4. Juntas y otros accesorios   | 114        |
| 3.9.6. Versatilidad del molde de rotomoldeo diseñado                                     | 115        |
| <br>   |            |
| <b>CAPÍTULO IV. PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO</b>            | <b>119</b> |
| 4.1. INTRODUCCIÓN  | 119        |
| 4.2. MATERIALES DE FABRICACIÓN DE MOLDES   | 120        |
| 4.3. TECNOLOGÍAS DE RAPID PROTOTYPING APLICADAS A LA FABRICACIÓN DE MOLDES DE ROTOMOLDEO | 121        |
| 4.3.1. Modelado por deposición fundida (FDM)   | 122        |
| 4.3.1.1. Descripción del proceso   | 122        |
| 4.3.1.2. Software de control   | 123        |
| 4.3.1.3. Principales ventajas y desventajas  | 124        |
| 4.3.1.4. Esquema de funcionamiento   | 125        |
| 4.3.2. Sinterización selectiva por láser (SLS)   | 125        |
| 4.3.2.1. Descripción del proceso   | 125        |
| 4.3.2.2. Principales ventajas y desventajas  | 125        |
| 4.3.2.3. Esquema de funcionamiento:  | 126        |
| 4.3.3. Impresión 3D  | 127        |
| 4.3.3.1. Descripción del proceso   | 127        |
| 4.3.3.2. Principales ventajas y desventajas  | 127        |
| 4.3.3.3. Esquema de funcionamiento:  | 128        |
| 4.4. TECNOLOGÍAS DE RAPID TOOLING APLICADAS AL MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO             | 128        |
| 4.4.1. Electroconformado   | 129        |
| 4.4.1.1. Definición de electroconformado   | 129        |
| 4.4.1.2. Características del electroconformado   | 129        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.4.1.3. Dureza de las piezas generadas                                      | 130        |
| 4.4.2. Moldeado de silicona  | 132        |
| 4.4.2.1. Descripción del proceso   | 132        |
| 4.4.2.2. Principales ventajas y desventajas                                  | 134        |
| 4.5. FABRICACIÓN DE MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO                            | 134        |
| 4.5.1. Cavity electroconformada interior de molde                            | 134        |
| 4.5.1.1. Fabricación de modelo FDM   | 135        |
| 4.5.1.2. Proceso de electroconformado de la cavidad interior del molde       | 137        |
| 4.5.1.2.1. Metalización del modelo base                                      | 138        |
| 4.5.1.2.2. Características del proceso electrolítico                         | 139        |
| 4.5.1.2.3. Espesor del electroconformado                                     | 141        |
| 4.5.1.2.4. Propiedades mecánicas del electroconformado del LFI.              | 142        |
| 4.5.1.3. Ajustes finales   | 143        |
| 4.5.2. Soportes y estructura del molde                                       | 144        |
| 4.5.3. Manifold  | 145        |
| 4.5.3.1. Procesos de fabricación   | 145        |
| 4.5.3.1.1. Impresión 3D en cera  | 145        |
| 4.5.3.1.2. Molde de silicona en vacío  | 147        |
| 4.5.3.1.3. Fabricación de manifold mediante sinterizado láser SLS            | 150        |
| 4.5.4. Ensamblaje final  | 151        |
| <b>CAPÍTULO V. EXPERIMENTACIÓN DEL MOLDE PROTOTIPO DE ROTOMOLDEO</b>         | <b>155</b> |
| 5.1. INTRODUCCIÓN  | 155        |
| 5.2. NECESIDAD DE MÁQUINA DE ENSAYOS DE ROTOMOLDEO                           | 155        |
| 5.3. REQUISITOS DE LA MÁQUINA DE ROTOMOLDEO PARA ENSAYOS                     | 156        |
| 5.4. DISEÑO BÁSICO Y COMPONENTES DE BANCO DE ENSAYOS                         | 157        |
| 5.4.1. Selección de tipología de máquina                                     | 157        |
| 5.4.2. Diseño general de máquina de moldeo rotacional                        | 158        |
| 5.4.3. Diseño y composición de los sistemas de movimiento                    | 159        |
| 5.4.4. Diseño y composición de los elementos de montaje de molde             | 161        |
| 5.4.5. Diseño y composición del sistema oleohidráulico                       | 161        |
| 5.4.6. Sistema de protección y control eléctrico                             | 164        |
| 5.4.7. Sistema de adquisición de datos                                       | 165        |
| 5.4.7.1. Termopares tipo K con data logger incorporado                       | 165        |
| 5.4.7.2. Sistema de medición de temperatura del fluido térmico               | 168        |
| 5.4.8. Control del proceso de calentamiento y enfriamiento                   | 169        |
| 5.4.9. Máquina de ensayos de moldeo rotacional fabricada                     | 170        |
| 5.5. FLUIDO TÉRMICO DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO              | 173        |
| 5.6. MATERIAL POLIMÉRICO UTILIZADO PARA ENSAYOS                              | 175        |
| 5.7. CONDICIONES PREESTABLECIDAS, VARIABLES DE ENSAYO Y RESULTADOS A OBTENER | 176        |
| 5.8. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN  | 179        |
| 5.9. ENSAYOS MEDIANTE AGUA COMO FLUIDO TÉRMICO                               | 181        |
| 5.10. ENSAYOS MEDIANTE ACEITE COMO FLUIDO TÉRMICO                            | 182        |
| 5.11. TRATAMIENTO DE DATOS   | 183        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO VI. EXPOSICIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS</b>                         | <b>187</b> |
| 6.1. INTRODUCCIÓN   | 187        |
| 6.2. RELACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS                           | 187        |
| 6.3. GRUPOS DE ENSAYOS  | 189        |
| 6.3.1. Ensayos en vacío   | 190        |
| 6.3.2. Variación de temperaturas  | 191        |
| 6.3.3. Variación del tiempo de calentamiento a 140°C                            | 192        |
| 6.3.4. Variación del tiempo de calentamiento a 160°C                            | 192        |
| 6.3.5. Variación de granulometría   | 193        |
| 6.3.6. Variación de carga de material polimérico                                | 193        |
| 6.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS DE MOLDE PROTOTIPO    | 194        |
| 6.4.1. Ensayos en vacío   | 194        |
| 6.4.1.1. Resultados experimentales y de simulación numérica                     | 194        |
| 6.4.1.2. Análisis de las temperaturas de aceite                                 | 196        |
| 6.4.1.3. Análisis de las temperaturas de la cavidad electroconformada de níquel | 199        |
| 6.4.1.3.1. Velocidad de calentamiento   | 199        |
| 6.4.1.3.2. Temperaturas máximas alcanzadas                                      | 201        |
| 6.4.1.3.3. Comparativa de curvas experimentales y de simulación numérica        | 202        |
| 6.4.1.4. Análisis de las temperaturas del aire interior del molde               | 204        |
| 6.4.1.4.1. Velocidad de calentamiento   | 204        |
| 6.4.1.4.2. Temperaturas máximas alcanzadas                                      | 206        |
| 6.4.1.4.3. Comparativa de curvas experimentales y de simulación numérica        | 206        |
| 6.4.1.5. Conclusiones parciales de los ensayos y simulaciones en vacío          | 209        |
| 6.4.2. Ensayos con variación de temperaturas                                    | 210        |
| 6.4.2.1. Resultados experimentales y de simulación numérica                     | 210        |
| 6.4.2.2. Análisis comparativo de temperaturas                                   | 212        |
| 6.4.2.2.1. Fase A. Inicio del calentamiento                                     | 214        |
| 6.4.2.2.2. Fase A-B. Inicio de la adhesión y fluidificación del material        | 214        |
| 6.4.2.2.3. Fase C-D. Sinterización del material                                 | 215        |
| 6.4.2.2.4. Fase D. Densificación del material                                   | 215        |
| 6.4.2.3. Conclusiones iniciales básicas   | 216        |
| 6.4.2.4. Reducción del tiempo de ciclo  | 218        |
| 6.4.3. Variación del tiempo de calentamiento a 140°C                            | 220        |
| 6.4.3.1. Objetivos principales de la variación del tiempo de ciclo              | 220        |
| 6.4.3.2. Resultados experimentales  | 221        |
| 6.4.3.2.1. Espesores de piezas obtenidas en ensayos                             | 222        |
| 6.4.4. Variación del tiempo de calentamiento a 160°C                            | 225        |
| 6.4.4.1. Objetivos principales de la variación del tiempo de ciclo              | 225        |
| 6.4.4.2.1. Espesores de piezas obtenidas en ensayos                             | 226        |
| 6.4.4.3. Análisis comparativo de ensayos a 140 °C y 160 °C                      | 228        |
| 6.4.5. Variación de granulometría   | 231        |
| 6.4.5.1. Resultados experimentales  | 231        |
| 6.4.6. Variación de carga de material polimérico                                | 232        |
| 6.4.6.1. Resultados experimentales  | 233        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.4.6.1.1. Espesores de piezas obtenidas en ensayos   | 234        |
| 6.5. ANÁLISIS DE PIEZAS ROTOMOLDEADAS OBTENIDAS   | 235        |
| 6.5.1. Análisis cuantitativo global de espesores de piezas rotomoldeadas obtenidas  | 236        |
| 6.5.1.1. Medición de espesores en piezas rotomoldeadas obtenidas  | 236        |
| 6.5.1.2. Análisis de espesores medios de las piezas rotomoldeadas   | 239        |
| 6.5.1.3. Temperaturas de molde obtenidas en procesos de simulación  | 240        |
| 6.5.1.4. Correlación de espesores de pieza y temperaturas procedentes de cálculos numéricos   | 246        |
| 6.6. ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS PIEZAS ROTOMOLDEADAS OBTENIDAS   | 254        |
| 6.6.1. Efectos producidos por incremento de tiempo de ciclo   | 255        |
| 6.6.2. Efectos producidos por incremento de temperatura   | 258        |
| 6.6.3. Efectos asociados a la granulometría y el peso del material  | 260        |
| <b>CAPÍTULO VII. ESTUDIO ENERGÉTICO COMPARATIVO ENTRE EL PROCESO<br/>DESARROLLADO Y PROCESOS CONVENCIONALES DE ROTOMOLDEO</b>         | <b>265</b> |
| 7.1. INTRODUCCIÓN   | 265        |
| 7.2. ESTABLECIMIENTO DE BASE COMPARATIVA  | 266        |
| 7.3. CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS CONVENCIONALES DE ROTOMOLDEO MEDIANTE HORNOS   | 267        |
| 7.3.1. Datos disponibles del proceso convencional de rotomoldeo mediante hornos   | 267        |
| 7.3.2. Modelización y simulación numérica del proceso convencional de rotomoldeo disponible   | 270        |
| 7.4. CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS CONVENCIONALES DE ROTOMOLDEO MEDIANTE FLUIDOS TÉRMICOS   | 272        |
| 7.5. CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE ROTOMOLDEO MEDIANTE MOLDE PROTOTIPO   | 273        |
| 7.5.1. Datos disponibles del proceso de rotomoldeo mediante molde prototipo   | 273        |
| 7.5.2. Modelización y simulación numérica del proceso de rotomoldeo mediante molde prototipo  | 274        |
| 7.6. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS, PARA MOLDES CÚBICOS DE 100 MM DE LADO Y 140 °C DE<br>TEMPERATURA MÁXIMA DE CALENTAMIENTO | 274        |
| 7.7. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS, PARA MOLDES CÚBICOS DE 100 MM DE LADO Y 300 °C DE<br>TEMPERATURA MÁXIMA DE CALENTAMIENTO | 280        |
| 7.8. UNIFORMIDAD TÉRMICA  | 285        |
| 7.8.1. Consideraciones básicas de la uniformidad térmica  | 285        |
| 7.8.2. Análisis comparativo de la uniformidad térmica entre tecnologías   | 286        |
| 7.8.3. Consideraciones finales de la uniformidad térmica entre tecnologías  | 289        |
| 7.9. ESTUDIO BÁSICO DE PRODUCCIÓN Y GASTOS ENERGÉTICOS  | 290        |
| 7.9.1. Cálculo de producción y gastos energéticos de las tecnologías estudiadas   | 291        |
| 7.9.2. Conclusiones básicas   | 295        |
| 7.10. ESTUDIO BÁSICO DE EMISIONES CONTAMINANTES   | 296        |
| <b>CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</b>  | <b>301</b> |
| 8.1. CONCLUSIONES   | 301        |
| 8.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN  | 303        |
| <b>REFERENCIAS</b>  | <b>307</b> |
| <b>ANEXO</b>  | <b>313</b> |

---

**ÍNDICE DE TABLAS**


---

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 3.1. Tiempo de ciclo requerido según caudal y zona de molde para alcanzar 250°C   | 84  |
| Tabla 3.2. Tabla de ordenación de configuraciones de entradas y salidas, de mejor a pero configuración según uniformidad del proceso y velocidad de calentamiento                             | 95  |
| Tabla 4.1: Dureza de algunos materiales empleados en moldes de inyección  | 130 |
| Tabla 4.2: Aptitud de las cáscaras de níquel electroconformadas en el LFI   | 131 |
| Tabla 4.3: Composición del baño electrolítico del LFI   | 138 |
| Tabla 4.4: Temperatura y densidad de corriente del baño electrolítico realizado   | 139 |
| Tabla 6.1: Relación y caracterización básica de los ensayos experimentales seleccionados para su análisis   | 187 |
| Tabla 6.2: Porcentajes de temperatura de níquel alcanzada respecto a la temperatura de aceite, en los primeros 180 s del proceso de calentamiento en ensayos experimentales                   | 199 |
| Tabla 6.3: Porcentajes de temperatura del aire interior del molde alcanzada respecto a la temperatura de aceite, en los primeros 180 s del proceso de calentamiento en ensayos experimentales | 204 |
| Tabla 6.4: Tiempos de calentamiento necesarios para alcanzar temperaturas interiores del aire determinadas para cada ensayo y reducción porcentual de dichos tiempos entre ensayos            | 218 |
| Tabla 6.5: Espesores de los diferentes puntos tomados en las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 140 °C  | 221 |
| Tabla 6.6: Espesores medios de las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 140 °C  | 222 |
| Tabla 6.7: Espesores de los diferentes puntos tomados en las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 160 °C  | 225 |
| Tabla 6.8: Espesores medios de las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 160 °C  | 226 |
| Tabla 6.9: Incremento de temperatura medio en intervalo desde 50 s hasta 250 s de los ensayos con variación de carga de material a 140 °C   | 233 |
| Tabla 6.10: Espesores medios de las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 140 °C con variación de carga de material  | 234 |
| Tabla 6.11: Espesores medios de los puntos medidos en cada cara de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a diferentes temperaturas  | 236 |
| Tabla 6.12: Valores estadísticos básicos de los espesores medidos   | 236 |
| Tabla 6.13: Temperaturas medias de los puntos en cada cara calculados mediante simulaciones numéricas realizadas a diferentes temperaturas en el momento temporal de 120 s                    | 240 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 6.14: Valores estadísticos básicos de las temperaturas simuladas en el momento temporal de 120 s   | 241 |
| Tabla 6.15: Factores de escala globales aplicados a los espesores medios. Temperaturas de simulación numérica a 120 s  | 245 |
| Tabla 6.16: Factores de escala puntuales aplicados a los espesores de cada punto de medición para obtener una correlación exacta temperatura-espesor. Temperaturas de simulación numérica a 120 s  | 250 |
| Tabla 6.17: Parámetros estadísticos de los factores aplicados a los espesores según las caras de medición en el molde. Temperaturas de simulación numérica a 120 s   | 251 |
| Tabla 6.18: Parámetros estadísticos de los factores aplicados a los espesores según los puntos de medición en el molde. Temperaturas de simulación numérica a 120 s  | 251 |
| Tabla 6.19: Parámetros estadísticos globales de los factores aplicados a los espesores según piezas globales. Temperaturas de simulación numérica a 120 s  | 252 |
| Tabla 6.20: Parámetros estadísticos de los factores de escala necesarios para la correlación temperatura-espesores de forma global y según los tiempos de ciclo seleccionados para la obtención de los valores de temperaturas                           | 252 |
| Tabla 7.1. Características principales de la máquina de moldeo rotacional RS-160, cortesía de Ferry Industries, INC  | 267 |
| Tabla 7.2. Tiempos de calentamiento requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada para los 3 procesos de rotomoldeo en estudio  | 276 |
| Tabla 7.3. Tiempos de ciclo completo requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 91 °C de enfriamiento, para los 3 procesos de rotomoldeo en estudio   | 276 |
| Tabla 7.4. Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado respecto a los moldes convencionales, en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 91 °C de enfriamiento                          | 277 |
| Tabla 7.5. Tiempos de ciclo completo requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 70 °C de enfriamiento, para los procesos de rotomoldeo en molde prototipo y convencional, ambos mediante fluido térmico | 277 |
| Tabla 7.6. Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado respecto al molde convencional de fluido térmico, en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 70 °C de enfriamiento              | 278 |
| Tabla 7.7. Tiempos de calentamiento requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada para los 3 procesos de rotomoldeo en estudio  | 281 |
| Tabla 7.8. Tiempos de ciclo completo requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 150 °C de enfriamiento, para los 3 procesos de rotomoldeo en estudio  | 282 |
| Tabla 7.9. Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado respecto a los moldes convencionales, en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 150 °C de enfriamiento                         | 282 |



|   |     |
|---|-----|
| Tabla 7.10. Tiempos de ciclo completo requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 93 °C de enfriamiento, para los procesos de rotomoldeo en molde prototipo y convencional, ambos mediante fluido térmico | 283 |
| Tabla 7.11. Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado respecto al molde convencional de fluido térmico, en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 93 °C de enfriamiento              | 283 |
| Tabla 7.12. Consumos específicos de combustibles y consumos eléctrico equivalente para ciclo de rotomoldeo simulado a 300 °C de temperatura, según tecnologías estudiadas   | 291 |
| Tabla 7.13. Consumos específicos eléctricos y consumos totales para ciclo de rotomoldeo simulado a 300 °C de temperatura, según tecnologías estudiadas  | 292 |
| Tabla 7.14. Estimación teórica de producción en procesos de rotomoldeo y parámetros productivos anuales según datos disponibles   | 293 |
| Tabla 7.15. Consumos específicos eléctricos y consumos totales para ciclo de rotomoldeo simulado a 300 °C. *Parámetros unitarios por pieza rotomoldeada, considerando una producción simultánea de 4 unidades   | 294 |
| Tabla 7.16. Emisiones específicas medias anuales del sistema eléctrico peninsular español durante el año 2010 según el informe anual del Observatorio de la Electricidad de la WWF  | 296 |
| Tabla 7.17. Producción de gases contaminantes según tecnología de rotomoldeo en términos totales anuales y en términos unitarios por pieza fabricada. *Considerando una producción simultánea de 4 unidades por ciclo                                     | 296 |



**ÍNDICE DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1. Esquema básico del proceso de moldeo rotacional.  | 11 |
| Figura 2.2. Crecimiento anual promedio del moldeo rotacional frente a otras técnicas de transformación para los años 1996-2000.   | 12 |
| Figura 2.3. Gama de productos fabricados mediante rotomoldeo. ABC Rotomoldeo Industrial.  | 13 |
| Figura 2.4. Máquina de rotomoldeo convencional de horno "Rock and Roll".  | 15 |
| Figura 2.5. Máquinas de moldeo rotacional de brazo recto y acodado para giros completos en dos ejes.  | 16 |
| Figura 2.6. Máquina tipo carrusel de tres brazos fijos.   | 17 |
| Figura 2.7. Molde de aluminio para moldeo rotacional.   | 18 |
| Figura 2.8. Evolución de la temperatura del aire que rodea al molde (curva H), del molde (curva X) y del aire del interior del molde (curva Y) durante el proceso de moldeo rotacional y etapas que se observan durante el ciclo. | 20 |
| Figura 2.9. Movimiento del polvo en el interior del molde durante la etapa de sinterización.  | 21 |
| Figura 2.10. Evolución de la interfase entre partículas adyacentes durante la etapa de sinterización.   | 22 |
| Figura 2.11. Evolución del radio del cuello entre partículas durante el proceso de sinterización.   | 23 |
| Figura 2.12. Balance de fuerzas sobre una burbuja de aire inmersa en plástico fundido.  | 24 |
| Figura 2.13. Evolución de la energía de impacto con la temperatura alcanzada por el aire del interior del molde de una pieza de polietileno rotomoldeada.   | 26 |
| Figura 2.14. Evolución de la cristalinidad, resistencia al impacto y resistencia a la tracción para piezas de polietileno en función de la velocidad de enfriamiento en moldeo rotacional.  | 28 |
| Figura 2.15. Distribución de tamaño de partícula típica para una resina de moldeo rotacional.   | 29 |
| Figura 2.16. Efecto de la introducción de sobrepresión en el interior del molde durante las etapas de densificación y enfriamiento inicial  | 32 |
| Figura 2.17. Evolución de la temperatura del aire del interior del molde para un ciclo convencional y un ciclo con presurización  | 33 |
| Figura 3.1: Discretización de variables   | 39 |
| Figura 3.2: Mallas con nodos centrados en los elementos y centrados en los vértices   | 42 |
| Figura 3.3: Diagrama retroalimentado de metodología de diseño y cálculo   | 49 |
| Figura 3.4: Horno de rotomoldeo de calentamiento por aire   | 52 |
| Figura 3.5: Molde de moldeo rotacional fabricado en aluminio  | 52 |
| Figura 3.6: Molde de rotomoldeo de calentamiento por canales exteriores de aceite   | 54 |
| Figura 3.7: Modelo básico de molde de rotomoldeo de canales exteriores de aceite  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.8: Distribución del coeficiente de consistencia del aceite térmico en función de su temperatura  | 59 |
| Figura 3.9: Distribución del calor específico del aluminio en función de su temperatura   | 59 |
| Figura 3.10: Distribución de la conductividad térmica del aluminio en función de su temperatura   | 60 |
| Figura 3.11: Imagen de subdominios de aceite (marrón) y aire (malva) en el interior del molde   | 61 |
| Figura 3.12: Distribución de temperaturas del flujo de entrada de aceite durante el ciclo   | 63 |
| Figura 3.13: Representación del mallado realizado sobre el molde de canales exteriores de aceite  | 65 |
| Figura 3.14: Temperaturas de los fluidos del proceso simulado de rotomoldeo del molde de canales exteriores   | 68 |
| Figura 3.15: Temperaturas de sólidos del proceso simulado de rotomoldeo del molde de canales exteriores   | 68 |
| Figura 3.16: Coeficiente de variación de la uniformidad térmica del proceso simulado de rotomoldeo de la cavidad interior del molde de canales exteriores   | 69 |
| Figura 3.17: Modelo básico del molde de rotomoldeo prototipo de canal envolvente de aceite  | 71 |
| Figura 3.18: Temperaturas de los fluidos del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente   | 72 |
| Figura 3.19: Temperaturas de sólidos del proceso simulado de rotomoldeo del molde de canales exteriores   | 73 |
| Figura 3.20: Coeficiente de variación de la uniformidad térmica del proceso simulado de rotomoldeo de la cavidad interior del molde prototipo de canal envolvente                                   | 73 |
| Figura 3.21: Comparativa de temperaturas de aire interior del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores  | 73 |
| Figura 3.22: Comparativa de temperaturas del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores   | 74 |
| Figura 3.23: Comparativa del coeficiente de variación de la uniformidad del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores                          | 75 |
| Figura 3.24: Comparativa del coeficiente de variación de la uniformidad desplazada, del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores              | 76 |
| Figura 3.25: Comparativa de la uniformidad del calentamiento del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores                                     | 76 |
| Figura 3.26: Diferencia porcentual del coeficiente de variación de la uniformidad del molde prototipo de canal envolvente en relación al molde de canales exteriores en el proceso de calentamiento | 77 |
| Figura 3.27: Comparativa del coeficiente de variación de la uniformidad de enfriamiento del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores          | 77 |
| Figura 3.28: Diferencia porcentual del coeficiente de variación de la uniformidad del molde prototipo de canal envolvente en relación a molde de canales exteriores en el proceso de enfriamiento   | 78 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.29: Distribución de temperaturas interiores del molde de canales exteriores (izquierda) y molde prototipo de canal envolvente (derecha) en diferentes momentos del proceso simulado de rotomoldeo   | 81  |
| Figura 3.30: Imágenes de cavidad interior del molde básico de níquel de 1 mm de espesor  | 82  |
| Figura 3.31: Velocidad de calentamiento del interior del aire en proceso simulado de rotomoldeo de molde de canal envolvente. Duración de ciclo necesaria para alcanzar 250°C en temperatura interior de aire en función del flujo volumétrico de aceite   | 85  |
| Figura 3.32: Velocidad de calentamiento de cara de entrada de molde de canal envolvente en proceso simulado de rotomoldeo. Duración de ciclo necesaria para alcanzar 250°C en temperatura de cara de entrada en función del flujo volumétrico de aceite  | 85  |
| Figura 3.33: Velocidad de calentamiento de cara lateral de molde de canal envolvente en proceso simulado de rotomoldeo. Duración de ciclo necesaria para alcanzar 250°C en temperatura de cara lateral en función del flujo volumétrico de aceite  | 86  |
| Figura 3.34: Velocidad de calentamiento de cara de salida de molde de canal envolvente en proceso simulado de rotomoldeo. Duración de ciclo necesaria para alcanzar 250°C en temperatura de cara de salida en función del flujo volumétrico de aceite.   | 86  |
| Figura 3.35: Diagramas de configuración de entradas y salidas de flujo en molde de rotomoldeo de canal envolvente (izquierda), distribución de temperaturas de la configuración de entradas y salidas en proceso simulado de rotomoldeo (centro) y el Coeficiente de variación de la uniformidad térmica de la cavidad interior del molde para la configuración de entradas y salidas simulada (derecha) | 94  |
| Figura 3.36: Configuración de 32 entradas y 32 salidas de flujo en el molde (izquierda) y configuración de 30 entradas y 30 salidas de flujo en el molde (derecha)   | 96  |
| Figura 3.37: Configuración de 32 entradas y 32 salidas de flujo en el molde (izquierda) y configuración de 18 entradas y 18 salidas de flujo en el molde (derecha)   | 96  |
| Figura 3.38: Comparativa de temperaturas de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente  | 99  |
| Figura 3.39: Comparativa de temperaturas de caras de entradas de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente   | 99  |
| Figura 3.40: Comparativa de temperaturas de caras laterales de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente   | 100 |
| Figura 3.41: Comparativa de temperaturas de caras de salidas de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente  | 100 |
| Figura 3.42: Comparativa de temperaturas de punto interior de aire de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente  | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.43: Comparativa del coeficiente de variación de la uniformidad térmica de caras de molde de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente  | 102 |
| Figura 3.44: Configuración básica inicial de manifold de 1 entrada y 25 salidas   | 104 |
| Figura 3.45: Manifold de canales circulares interiores concéntricos (a), manifold de canales interiores elípticos (b), manifold de canales interiores en ramificación piramidal múltiple (c), manifold de cavidades interiores piramidales (d), manifold de canales interiores en ramificación mallada (e) y manifold de canales interiores ramificados cilíndricos (f) | 107 |
| Figura 3.46: Manifold octopus, de canales interiores ramificados, cilíndricos, sección constante y longitudes equivalentes. Vista frontal (izquierda) y vista lateral con trazado interior oculto (derecha)   | 108 |
| Figura 3.47: Vistas varias de manifold octopus  | 108 |
| Figura 3.48: Vistas varias de canales interiores de manifold octopus  | 108 |
| Figura 3.49: Vistas varias del canal doble esférico central del manifold octopus  | 109 |
| Figura 3.50: Configuración de 15 aberturas de salida de flujo en manifold (izquierda) y coeficiente de variación de la uniformidad del flujo volumétrico del conjunto de 15 aberturas de salida (derecha)   | 110 |
| Figura 3.51: Configuración de 20 aberturas de salida de flujo en manifold (izquierda) y coeficiente de variación de la uniformidad del flujo volumétrico del conjunto de 20 aberturas de salida (derecha)   | 110 |
| Figura 3.52: Configuración de 25 aberturas de salida de flujo en manifold (izquierda) y coeficiente de variación de la uniformidad del flujo volumétrico del conjunto de 25 aberturas de salida (derecha)   | 110 |
| Figura 3.53: Vistas varias del manifold octopus completo, en caras opuestas   | 111 |
| Figura 3.54: Vistas varias de diseño final del manifold octopus completo, en caras opuestas, incluyendo cavidades de acople de soportes y otros elementos   | 111 |
| Figura 3.55: Vistas varias de diseño final de cavidad interior de molde de níquel de 1 mm de espesor  | 112 |
| Figura 3.56: Vistas varias de soportes superior, inferior y crucetas laterales  | 113 |
| Figura 3.57: Vistas varias de diseños básicos de cavidad interior de molde de níquel de 1 mm de espesor. De izquierda a derecha, en forma cúbica, cilíndrica, tronco piramidal y semiesférica   | 114 |
| Figura 3.58: Vistas varias de diseño final de molde de rotomoldeo completo de calentamiento por aceite a través de canal envolvente, manifold octopus y cavidad interior del molde de níquel de 1 mm  | 115 |
| Figura 4.1: Espesor de rigidez a flexión equivalente entre diferentes materiales  | 119 |
| Figura 4.2: Espesor de transferencia térmica equivalente entre diferentes materiales  | 120 |
| Figura 4.3: Máquina FDM del LFI   | 122 |
| Figura 4.4: Software Quickslice de la máquina FDM del LFI   | 123 |
| Figura 4.5: Esquema de trabajo y máquina de FDM controlada por PC   | 124 |
| Figura 4.6: Esquemas de funcionamiento del sistema SLS  | 125 |
| Figura 4.7: Máquina de sinterizado  | 125 |
| Figura 4.8: Esquema de funcionamiento y detalle 3D de proceso de impresión 3D   | 127 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.9: Fases básicas del electroconformado: modelo prototipo (a), deposición de níquel en el modelo (b) y pieza electroconformada obtenida (c)  | 128 |
| Figura 4.10: Pruebas de variación de la dureza con la densidad de corriente para pH=4 y Temperatura=45°C, realizadas por el LFI  | 130 |
| Figura 4.11: Marcado del modelo master   | 132 |
| Figura 4.12: Caja del molde  | 132 |
| Figura 4.13: Creación del molde  | 132 |
| Figura 4.14: Extracción del aire interno   | 132 |
| Figura 4.15: Abertura del molde terminado por corte  | 133 |
| Figura 4.16: Esquema e imágenes del proceso de fabricación de cavidad electroconformada del molde  | 134 |
| Figura 4.17: Imágenes de fichero STL generado de la cavidad interior a electroconformar  | 135 |
| Figura 4.18: Imágenes del modelo fabricado mediante FDM  | 136 |
| Figura 4.19: Proceso de electrodeposición de níquel  | 137 |
| Figura 4.20: Máquina de electrodeposición del LFI  | 140 |
| Figura 4.21: Imágenes de la cavidad interior electroconformada   | 142 |
| Figura 4.22: Imágenes del diseño de soportes y estructura del molde  | 143 |
| Figura 4.23: Imágenes del despiece de los soportes y estructura del molde fabricados   | 143 |
| Figura 4.24: Montaje final de los soportes y estructura del molde fabricados   | 144 |
| Figura 4.25: Imágenes de máquina SolidScape T66  | 145 |
| Figura 4.26: Imágenes de los canales interiores del manifold. Diseño (izquierda) y modelo fabricado en cera (derecha)  | 146 |
| Figura 4.27: Imágenes del montaje previo a la fabricación del molde de silicona  | 146 |
| Figura 4.28: Imagen detalle del acoplamiento de los canales de cera y el resto de elementos previo al moldeo de silicona   | 147 |
| Figura 4.29: Imágenes del manifold de silicona obtenido y soportes fabricados y ensamblados antes de la fundición de la cera   | 148 |
| Figura 4.30: Imagen detalle del acoplamiento de los canales de cera y el resto de elementos tras el moldeo de silicona   | 148 |
| Figura 4.31: Manifold fabricado mediante sinterizado y detalle de aberturas de salida de aceite del manifold   | 149 |
| Figura 4.32: Vistas varias de diseño final de molde de rotomoldeo completo de calentamiento por aceite a través de canal envolvente, manifold octopus y cavidad interior del molde de níquel de 1 mm | 151 |
| Figura 5.1: Imagen de máquina de moldeo rotacional tipo “Rock and Roll”  | 157 |
| Figura 5.2: Diseño de la estructura base de la máquina de rotomoldeo   | 158 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.3: Diseño de soportes sobre base general de la máquina de rotomoldeo  | 158 |
| Figura 5.4: Diseño de base de basculación de la máquina de rotomoldeo  | 159 |
| Figura 5.5: Diseño de sistema de movimiento de basculación de la máquina de rotomoldeo   | 159 |
| Figura 5.6: Diseño de sistema de movimiento de giro del molde de la máquina de rotomoldeo  | 160 |
| Figura 5.7: Diseño del plato perforado soporte del molde y del soporte de cojinetes de la máquina de rotomoldeo  | 160 |
| Figura 5.8: Baño termostático utilizado en la máquina de rotomoldeo  | 161 |
| Figura 5.9: Bomba de aceite volumétrica estándar   | 161 |
| Figura 5.10: Junta rotativa utilizada en la máquina de rotomoldeo fabricada  | 162 |
| Figura 5.11: Cuadro de control de la máquina de rotomoldeo fabricada   | 163 |
| Figura 5.12: Termopar con data logger incorporado e interface USB  | 165 |
| Figura 5.13: Ubicación de termopar para la medida de la temperatura del aire interior del molde  | 166 |
| Figura 5.14: Termopar con terminación circular y film adhesivo   | 167 |
| Figura 5.16: Medidor de temperatura digital RS y termopar incorporado  | 168 |
| Figura 5.17: Esquema de procesos de calentamiento y enfriamiento de la máquina de rotomoldeo fabricada   | 169 |
| Figura 5.18: Imágenes varias del diseño general de la máquina de moldeo rotacional   | 170 |
| Figura 5.19: Imágenes varias reales de la máquina de moldeo rotacional fabricada incluyendo carcasa exterior de protección                                 | 171 |
| Figura 5.20: Gráfica de densidad del SM-OIL TEMPLE   | 172 |
| Figura 5.21: Gráfica de calor específico del SM-OIL TEMPLE   | 173 |
| Figura 5.22: Gráfica de conductividad térmica del SM-OIL TEMPLE  | 173 |
| Figura 5.23: Gráfica de viscosidad del SM-OIL TEMPLE   | 173 |
| Figura 5.24: Imágenes de piezas obtenidas con agua como fluido térmico en máquina de moldeo rotacional fabricada   | 181 |
| Figura 6.1: Diagrama de temperaturas a 100 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica   | 194 |
| Figura 6.2: Diagrama de temperaturas a 120 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica   | 194 |
| Figura 6.3: Diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica   | 195 |
| Figura 6.4: Detalle de diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica                                      | 196 |
| Figura 6.5: Diagrama de temperaturas a 120 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica con ajuste de temperatura media de enfriamiento | 197 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.6: Diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica con ajuste de temperatura media de enfriamiento               | 198 |
| Figura 6.7: Diagrama de porcentaje de temperatura de níquel alcanzada en relación a la temperatura de aceite, en ensayos experimentales                                  | 199 |
| Figura 6.8: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de níquel de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 100 °C  | 202 |
| Figura 6.9: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de níquel de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 120 °C  | 202 |
| Figura 6.10: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de níquel de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 140 °C | 203 |
| Figura 6.11: Diagrama de porcentaje de temperatura del aire interior del molde alcanzada en relación a la temperatura de aceite, en ensayos experimentales               | 204 |
| Figura 6.12: Detalle de diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica   | 206 |
| Figura 6.13: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de aire de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 100 °C   | 207 |
| Figura 6.14: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de aire de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 120 °C   | 207 |
| Figura 6.15: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de aire de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 140 °C   | 208 |
| Figura 6.16: Diagrama de temperaturas a 100 °C obtenidos en ensayos experimentales sin carga de material y con 70 gramos   | 209 |
| Figura 6.17: Diagrama de temperaturas a 120 °C obtenidos en ensayos experimentales sin carga de material y con 70 gramos   | 210 |
| Figura 6.18: Diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales sin carga de material y con 70 gramos   | 210 |
| Figura 6.19: Diagrama de incrementos de temperaturas obtenidos en ensayos experimentales con 70 gramos y a 100°C   | 212 |
| Figura 6.20: Diagrama de incrementos de temperaturas obtenidos en ensayos experimentales con carga de material a 120°C   | 212 |
| Figura 6.21: Diagrama de incrementos de temperaturas obtenidos en ensayos experimentales con carga de material a 140°C   | 213 |
| Figura 6.22: Diagrama de temperaturas del aire interior del molde obtenidos en ensayos experimentales con carga de material a 100 °C, 120 °C y 140°C                     | 215 |
| Figura 6.23: Detalle del desfase de temperaturas en diagrama de temperaturas a 100 °C obtenidos en ensayos experimentales con material y en simulación numérica          | 217 |
| Figura 6.24: Reducción del tiempo de calentamiento en diagrama de temperaturas del aire interior obtenidos en ensayos experimentales con material                        | 218 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 6.25: Diagramas de temperaturas superpuestas de los diferentes ensayos a 140 °C con variación del tiempo de calentamiento  | 221 |
| Figura 6.26: Diagramas de espesores medios de las piezas obtenidas en ensayos a 140 °C y según variación del tiempo de calentamiento  | 222 |
| Figura 6.27: Diagramas de reducción porcentual de espesor medio global de las piezas obtenidas en ensayos a 140 °C y según variación del tiempo de calentamiento  | 223 |
| Figura 6.28: Diagramas de temperaturas superpuestas de los diferentes ensayos a 160 °C con variación del tiempo de calentamiento  | 225 |
| Figura 6.29: Diagramas de espesores medios de las piezas obtenidas en ensayos a 160 °C y según variación del tiempo de calentamiento  | 226 |
| Figura 6.30: Diagramas de reducción porcentual de espesor medio global de las piezas obtenidas en ensayos a 160 °C y según variación del tiempo de calentamiento  | 227 |
| Figura 6.31: Diagramas de espesores medios globales de las piezas obtenidas en ensayos a 140 °C y 160 °C según la variación del tiempo de calentamiento y extrapolación simple de espesores a 180 °C                                      | 228 |
| Figura 6.32: Diagramas de espesores medios globales de las piezas obtenidas en ensayos a 140 °C y 160 °C según la variación del tiempo de calentamiento y extrapolación simple de espesores a 180 °C                                      | 229 |
| Figura 6.33: Diagramas de temperaturas de aire interior del molde en ensayos a 140 °C con variación de granulometría del material polimérico  | 231 |
| Figura 6.34: Diagramas de temperaturas de aire interior del molde en ensayos a 140 °C con variación de carga de material polimérico   | 233 |
| Figura 6.35: Numeración de puntos de medición de espesores en cada cara de las piezas rotomoldeadas (imagen izquierda) y de puntos de medición de temperaturas en cada cara del molde en procesos de simulación numérica (imagen derecha) | 235 |
| Figura 6.36: Diagramas de espesores medios de los puntos medidos en cada cara de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 120 °C   | 237 |
| Figura 6.37: Diagramas de espesores medios de los puntos medidos en cada cara de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 140 °C   | 237 |
| Figura 6.38: Diagramas de espesores medios de los puntos medidos en cada cara de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 160 °C   | 238 |
| Figura 6.39: Diagramas de temperaturas de los puntos medidos en cada cara del moldeo obtenidos mediante simulación numérica a 120 °C  | 241 |
| Figura 6.40: Diagramas de temperaturas de los puntos medidos en cada cara del moldeo obtenidos mediante simulación numérica a 140 °C  | 242 |
| Figura 6.41: Diagramas de temperaturas de los puntos medidos en cada cara del moldeo obtenidos mediante simulación numérica a 160 °C  | 242 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.42: Diagramas de temperaturas de los puntos calculados en cada cara del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140 °C          | 245 |
| Figura 6.43: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara de entrada del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C | 246 |
| Figura 6.44: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara derecha del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C    | 247 |
| Figura 6.45: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara izquierda del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C  | 247 |
| Figura 6.46: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara de salida del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C  | 248 |
| Figura 6.47: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara inferior del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C   | 248 |
| Figura 6.48: Imágenes superior e inferior de las 9 primeras piezas obtenidas   | 254 |
| Figura 6.49: Imágenes de piezas obtenidas en diferentes ensayos preliminares   | 254 |
| Figura 6.50: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 19, a 140 °C y 5 minutos de calentamiento  | 255 |
| Figura 6.51: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 18, a 140 °C y 15 minutos de calentamiento   | 255 |
| Figura 6.52: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 20, a 140 °C y 25 minutos de calentamiento   | 255 |
| Figura 6.53: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 21, a 140 °C y 40 minutos de calentamiento   | 256 |
| Figura 6.54: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 18, a 140 °C y 15 minutos de calentamiento. Imagen análoga a la figura 6.51  | 257 |
| Figura 6.55: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 23, a 160 °C y 15 minutos de calentamiento   | 257 |
| Figura 6.56: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 21, a 140 °C y 40 minutos de calentamiento. Imagen análoga a la figura 6.53  | 258 |
| Figura 6.57: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 25, a 160 °C y 40 minutos de calentamiento   | 258 |
| Figura 6.58: Imagen a tamaño real de cara inferior o fondo de piezas número 24 a 160 °C y 25 minutos de calentamiento (izquierda) y pieza número 25, a 160 °C y 40 minutos de calentamiento (derecha)                              | 259 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 6.59: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de piezas número 27 a 140 °C y 15 minutos de calentamiento  | 260 |
| Figura 7.1: Curvas experimentales de ensayo sin carga de material en máquina de moldeo rotacional RS-160 con temperatura media aproximada de calentamiento de 300 °C  | 268 |
| Figura 7.2: Curvas experimentales de ensayo sin carga de material y simulaciones numéricas, ambos casos de rotomoldeo convencional mediante horno   | 271 |
| Figura 7.3: Curvas de temperatura media de la cara frontal del molde obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio   | 274 |
| Figura 7.4: Curvas de temperatura de aire interior del molde obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio   | 274 |
| Figura 7.5: Curvas de temperatura media de la cara frontal del molde, limitadas a 130 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio                                      | 275 |
| Figura 7.6: Curvas de temperatura de aire interior del molde, limitadas a 130 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio  | 275 |
| Figura 7.7: Curvas de temperatura de aire interior del molde, limitadas a 130 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio con marcas de referencia de tiempos de ciclo | 278 |
| Figura 7.8: Curvas de temperatura media de la cara frontal del molde obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio, a 300 °C de calentamiento                                | 279 |
| Figura 7.9: Curvas de temperatura de aire interior del molde obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo estudio, a 300 °C de calentamiento   | 280 |
| Figura 7.10: Curvas de temperatura media de la cara frontal del molde, limitadas a 275 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio                                     | 280 |
| Figura 7.11: Curvas de temperatura de aire interior del molde, limitadas a 275 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio   | 281 |
| Figura 7.12: Curvas de coeficiente de variación de uniformidad térmica obtenidas en procesos de simulación numérica a 140 °C, de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio   | 285 |
| Figura 7.13: Curvas de coeficiente de variación de uniformidad térmica obtenidas en procesos de simulación numérica a 300 °C, de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio   | 287 |
| Figura 7.14: Distribución constante de espesor en el interior de un molde convencional (izquierda) y distribución variable de espesores (derecha)   | 288 |

---

**LISTA DE SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS**

---

**Símbolos**

|          |  |
|----------|--|
| $y$      | Radio del cuello de unión entre partículas |
| $a$      | Radio de partículas                        |
| $\Gamma$ | Tensión superficial                        |
| $\mu$    | Viscosidad                                 |
| $t$      | Tiempo                                     |
| $\pi$    | Pi   |
| $r$      | Radio de la burbuja                        |
| $\rho$   | Densidad                                   |
| $\rho_p$ | Densidad del polímero                      |
| $\rho_b$ | Densidad de la burbuja del polímero        |
| $\eta$   | Viscosidad                                 |
| $\eta_0$ | Viscosidad de polímeros a cizalla cero     |
| $u$      | Velocidad                                  |
| $g$      | Gravedad                                   |
| $L$      | Longitud                                   |
| $D$      | Diámetro                                   |
| $F$      | Fuerza                                     |
| $p$      | Presión                                    |
| $U(x)$   | Función escalar                            |
| $x$      | Variable de función                        |
| $x_0$    | Punto de función                           |
| $\delta$ | Derivada                                   |
| $T$      | Temperatura                                |
| $e$      | Entrada                                    |
| $s$      | Salida                                     |
| $V$      | Volumen                                    |
| $E$      | Eficiencia                                 |
| $C$      | Constante de deposición                    |
| $I$      | Intensidad                                 |

|                |                             |
|----------------|-----------------------------|
| e              | Espesor                     |
| A              | Área                        |
| m              | Masa                        |
| C <sub>u</sub> | Coefficiente de uniformidad |

***Acrónimos***

|       |  |
|-------|--|
| PVC   | Policloruro de vinilo                      |
| PE    | Polietileno                                |
| PA    | Poliamida                                  |
| ABS   | Acrilonitrilo Butadieno Estireno           |
| PC    | Policarbonato                              |
| HIPS  | Poliestireno de alto impacto               |
| PP    | Polipropileno                              |
| EVA   | Etilen Vinilo Acetato                      |
| TP    | Tamaño de partícula                        |
| DTP   | Distribución de tamaño de partículas       |
| MFI   | Índice de fluidez                          |
| CFD   | Dinámica de fluidos computacional          |
| CAD   | Diseño asistido por ordenador              |
| RT    | Rapid tooling                              |
| RP    | Rapid prototyping                          |
| CNC   | Control numérico por computadora           |
| FDM   | Modelado por Deposición Fundida            |
| LFI   | Laboratorio de Fabricación Integrada       |
| ULPGC | Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  |
| STL   | Standard Triangulation Language            |
| SLS   | Sinterización selectiva por láser          |
| BPM   | Balistic Particle Manufacturing            |
| ASTM  | American Society for Testing and Materials |
| USB   | Universal Serial Bus                       |

---

## RESUMEN

En el presente trabajo se ha pretendido desarrollar y optimizar la tecnología de rotomoldeo basada en el calentamiento y enfriamiento mediante fluidos térmicos, concretamente mediante aceite, fundamentalmente desde el punto de vista energético y de tiempos de ciclo.

Como primer aspecto innovador, y en base a diferentes procesos de análisis, diseño y cálculo, se ha desarrollado un nuevo prototipo de molde de rotomoldeo, basado en una circulación global del fluido térmico en el exterior del molde, a diferencia de los canales externos de circulación de aceite desarrollados en los últimos años. En segundo lugar, se ha desarrollado y optimizado la introducción del fluido térmico en el interior del molde prototipo, mediante un manifold tipo octopus, que permite una distribución óptima del flujo de aceite en todas las zonas deseadas del molde. El uso de las tecnologías de Fabricación Aditiva, principalmente el electroconformado, comprenden el tercer aspecto fundamental de esta Tesis Doctoral, produciendo cavidades interiores del molde de espesor mínimo (1 mm), con grandes capacidades mecánicas y térmicas, así como permitiendo la posibilidad de generar moldes de gran reproducibilidad y geométricamente complejos, cuya fabricación mediante otras tecnologías resultaría de gran dificultad o de enorme coste.

El molde prototipo desarrollado, y sus complementos correspondientes, han sido inicialmente evaluados comparativamente con los procesos de rotomoldeo más novedosos, tales como los moldes de canales exteriores de aceite térmico. Mediante las tecnologías de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se han modelado y analizado de forma computacional ambos procesos de rotomoldeo esencialmente desde el punto de vista térmico, permitiendo desarrollar completamente el molde prototipo óptimo según los condicionantes y parámetros requeridos.

Dado el enorme interés suscitado por contrastar los datos teóricos obtenidos en los análisis computacionales, en una segunda fase del trabajo desarrollado y tras una primera fase de diseño y cálculo, se procedió a la fabricación y ensayo experimental del molde prototipo, según las mismas características del modelo diseñado en las fases previas. De esta forma, y mediante diferentes procesos de fabricación, tales como el electroconformado, FDM o SLS, entre otros, se ha materializado el diseño de molde prototipo desarrollado, con características totalmente funcionales para su posterior ensayo. Dicha experimentación ha sido posible gracias al también desarrollo específico de una

máquina de ensayo de rotomoldeo adaptada al molde prototipo, totalmente operativa y adecuada al proceso de calentamiento y enfriamiento mediante aceite térmico.

Los ensayos realizados del molde prototipo han permitido caracterizar tanto al proceso de rotomoldeo en sí, como al propio molde y a las piezas conformadas mediante material EVA, con temperaturas máximas de 160 °C, limitada ésta por el aceite sintético utilizado.

A partir de los datos disponibles de los moldes convencionales de calentamiento mediante hornos, concretamente de los datos experimentales de la máquina RS-160 de la Universidad de Queen's (Irlanda), de los datos del propio fabricante, así como de datos disponibles de diversas fuentes académicas, ha sido posible evaluar los procesos convencionales de rotomoldeo mediante hornos y de rotomoldeo mediante canales exteriores de aceite, modelándolos mediante CFD y realizando análisis comparativos entre los datos experimentales obtenidos en los diferentes casos y los datos teóricos obtenidos en los procesos computacionales.

Los resultados finales obtenidos, acorde con las previsiones obtenidas en los procesos de cálculo y simulación numérica, han permitido, además de validar los procesos de análisis computacional, ratificar las bondades del molde prototipo desarrollado. La reducción del tiempo de ciclo requerido para la fabricación de piezas rotomoldeadas alcanzó valores superiores al 64%, lo que implica una importante mejora en la producción de piezas y en la competitividad con otras tecnologías. En cuanto a la eficiencia energética, en el menor de los casos, el molde prototipo redujo las necesidades energéticas en un 87% de las necesarias en los moldes convencionales de horno con consumo de combustibles y energía eléctrica. Consecuentemente, y desde una visión medioambiental, se alcanzaron reducciones de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera superiores al 95% de CO<sub>2</sub>, y del 53,51% en SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, confirmando al modelo desarrollado no solo como un molde y proceso de rotomoldeo de alta eficiencia, sino de mínimas emisiones al medio ambiente.

Dada las enormes cualidades del molde prototipo desarrollado solo queda potenciar las futuras líneas de investigación y desarrollo, con el fin de completar la optimización del mismo y su ajuste para la incorporación al mundo industrial del moldeo rotacional.



## *Capítulo I*

### **INTRODUCCIÓN**



## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente vivimos en una sociedad de la información y las telecomunicaciones, cuyo principal activo es el tratamiento y difusión de la información como elemento productivo. Dicha información se encuentra disponible en las amplias redes sociales existentes, permitiendo a cualquier persona acceder a un mundo de conocimiento como jamás se había pensado. Ese flujo de información está permitiendo, cada vez más rápidamente, optimizar cualquier tipo de trabajo, proceso u organización, incrementando la productividad, reduciendo costes, y en definitiva, mejorando la eficiencia.

La gran mayoría de los procesos productivos actuales se han modernizado, algunos en gran medida, permitiendo adentrarse y mantenerse en los mercados, cada vez más cambiantes y agresivos. Sin embargo, convive con la modernidad otros procesos no tan desarrollados, menos optimizados, y que en ocasiones pierden su ventaja competitiva, su potencial inicial, y terminan siendo sustituidos por nuevas tecnologías.

En la época actual, la diferenciación es un factor principal. Los criterios de los consumidores se caracterizan por la búsqueda de la diferenciación, en contra de la estandarización. Los productos disponen de un mayor valor cuando además de cumplir su función principal, son únicos, limitados o están bien diferenciados respecto al resto. Los usuarios evitan el consumo de productos estándares, centrándose en la búsqueda de productos personalizados, desde productos textiles hasta joyas, vehículos e incluso productos más personales. Este cambio social obliga a la adaptación de los procesos productivos, de los procesos de fabricación, a las herramientas y utillajes necesarios, de forma que manteniendo los costes y evitando el encarecimiento de los productos, dichos procesos deben innovar para encontrar soluciones a este cambio cultural.

En el ámbito de la fabricación con materiales plásticos, diversos son los procesos de transformación existentes en función de las piezas a generar, sus necesidades funcionales, capacidades mecánicas o requerimientos estéticos. La inyección, extrusión o el soplado son algunos de los principales procesos de transformación de plásticos, pudiéndose establecer la inyección como una de las tecnologías con mayor evolución y desarrollo en los últimos tiempos. Otros procesos, como el rotomoldeo, no han tenido la repercusión social y técnica suficiente como para una optimización en tal alto grado, quedando limitados sus desarrollos a pequeñas innovaciones o mejores automatizaciones, pero en definitiva, manteniendo similares condiciones productivas. Un aspecto crucial para la innovación y

desarrollo de estas tecnologías es la simplicidad de los procesos, su flexibilidad para adaptarse a los cambios, la reducción de los costes y la personalización de las piezas, en contra de la fabricación en serie.

Con el desarrollo de las modernas tecnologías de fabricación rápida de herramientas (Rapid Tooling) y de prototipado rápido (Rapid Prototyping), muchas tecnologías convencionales pueden ver resueltas gran parte de sus limitaciones. Dichas tecnologías permiten la creación de nuevos componentes, fabricados en tiempos muy inferiores, con nuevos materiales, mayores prestaciones e incluso a costes reducidos, que incorporados a los procesos productivos convencionales permitirían obtener productos personalizados a bajo coste, desde el diseño inicial hasta su acabado final, todo ello en tiempos totales de ciclo muy inferiores a los de las tecnologías convencionales.

El grupo de investigación del Laboratorio de Fabricación Integrada de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria se encuentra inmerso desde hace varios años en varias líneas de investigación relacionadas con los procesos de transformación de materias plásticas y la utilización y desarrollo de las tecnologías de Rapid Prototyping y Rapid Tooling, desde los procesos de fabricación 3D hasta el electroconformado. Esta amplia experiencia, tanto en estas modernas tecnologías como en las más convencionales, permite el desarrollo de nuevos modelos productivos y la optimización de procesos convencionales.

## **1.1. PROPÓSITO DE LA TESIS**

En los últimos años, el Laboratorio de Fabricación Integrada ha desarrollado una estrecha relación con la Universidad de Queen's, en Belfast (Irlanda), estableciendo una clara línea de investigación en el campo del rotomoldeo. Este proceso de transformación de termoplásticos dispone de un amplio campo de aplicación, sin embargo, también dispone de grandes limitaciones susceptibles de ser optimizadas. La línea de investigación aquí desarrollada pretende atenuar algunas de las limitaciones fundamentales de estos procesos convencionales de rotomoldeo, acercándolos a los nuevos avances tecnológicos en la fabricación de moldes, utillajes y elementos accesorios, permitiendo así una mayor eficiencia energética, la optimización de los procesos de calentamiento y enfriamiento, los tiempos de ciclo de fabricación y la versatilidad en la fabricación rápida de moldes de rotomoldeo mediante tecnologías de Rapid Prototyping y Rapid Tooling.

## 1.2. FASES DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

Son varios los procesos de rotomoldeo, las diferentes configuraciones del mismo proceso, sus variantes o las configuraciones de calentamiento o movimiento de los moldes, pero todos se basan en los mismos fundamentos, como se desarrolla en el capítulo siguiente. Estos fundamentos se han mantenido prácticamente intactos desde los inicios del rotomoldeo, pudiéndose resaltar 2 desventajas fundamentales del proceso:

- Largos tiempos de ciclo del proceso de fabricación.
- Baja eficiencia energética del proceso.

En vista de los problemas detectados que plantean los procesos de rotomoldeo se desarrolla las siguientes fases de trabajo:

### 1.2.1. Fase I. Estudio y análisis del proceso de rotomoldeo.

- ❖ Análisis de los fundamentos y estado del arte del rotomoldeo.
- ❖ Estudio de los procesos convencionales de fabricación de moldes de rotomoldeo.
- ❖ Estudio de las limitaciones y condicionantes de los procesos de rotomoldeo.
- ❖ Estudio de los requerimientos exigidos por un molde de rotomoldeo y de las herramientas accesorias.
- ❖ Análisis básico inicial de las posibles innovaciones sobre el proceso.
- ❖ Simulación mediante Dinámica de Fluidos Computacional del proceso convencional de rotomoldeo y sus parámetros fundamentales.
- ❖ Determinación de parámetros y variables modificables fundamentales.

### 1.2.2. Fase II. Análisis y desarrollo de un nuevo molde de rotomoldeo

- ❖ Estudio inicial del molde de rotomoldeo prototipo, caracterización básica y limitaciones del diseño.
- ❖ Análisis y desarrollo del molde prototipo de rotomoldeo a partir de las mejoras sobre los moldes de rotomoldeo convencionales.
- ❖ Desarrollo del proceso de calentamiento y enfriamiento mediante aceite térmico y su implementación en el molde prototipo.
- ❖ Simulación numérica mediante Dinámica de Fluidos Computacional del molde prototipo de rotomoldeo.
- ❖ Estudio de los efectos del tiempo de ciclo y la uniformidad térmica del proceso de rotomoldeo en el molde prototipo.

- ❖ Estudio comparativo del molde prototipo de rotomoldeo y molde convencional.
- ❖ Valoración de las optimizaciones teóricas obtenidas en el molde prototipo.
- ❖ Estudio de tecnologías para la fabricación del molde prototipo.

### **1.2.3. Fase III. Fabricación y experimentación de nuevo molde de rotomoldeo.**

- ❖ Selección de las tecnologías para la fabricación del molde prototipo.
- ❖ Fabricación de molde prototipo de rotomoldeo mediante tecnologías de Rapid Prototyping y Rapid Tooling.
- ❖ Fabricación de banco de ensayo experimental de rotomoldeo e implementación del sistema de adquisición de datos.
- ❖ Desarrollo de la metodología de ensayos del molde prototipo de rotomoldeo y operatividad del banco experimental.
- ❖ Experimentación y desarrollo de ensayos del molde prototipo de rotomoldeo según metodología desarrollada.
- ❖ Obtención y tratamiento de datos de los procesos de experimentación.
- ❖ Análisis de los resultados obtenidos.
- ❖ Estudios comparativos del desarrollo teórico, los datos experimentales y validación del proceso de desarrollo.
- ❖ Establecimiento de conclusiones y líneas futuras de investigación.

## **1.3. CONDICIONANTES DE LOS TRABAJOS**

El desarrollo de la presente investigación no ha estado exento de inconvenientes y limitaciones, desde sus inicios hasta su conclusión final. El proceso de rotomoldeo es una de las tecnologías más desconocidas y menos desarrolladas en la transformación de polímeros. Son bastantes reducidas las fábricas que utilizan esta tecnología y menos aún los fabricantes que desarrollan máquinas a nivel industrial por lo que el acceso a la información de dichas tecnologías no es equiparable a los restantes procesos de fabricación.

Por otra parte, en el mundo académico son reducidas las líneas de investigación, sobre todo en Europa, y gran parte de ellas se encuentran asociadas a los departamentos de desarrollos bien de grandes fábricas de componentes plásticos o a asociaciones concretas de fabricantes de rotomoldeo, por lo que también existe un importante recelo con los resultados obtenidos en los desarrollos de sus investigaciones.

Debido a que los procesos de rotomoldeo están orientados a la fabricación de productos de gran tamaño y volumen, el desarrollo de un prototipo de investigación, a escala inferior a la real, y los resultados obtenidos del mismo son difícilmente escalables y comparables con los pocos datos disponibles de los procesos industriales por lo que es necesario validar todos los procesos de análisis y desarrollo realizados a través de la vía experimental propia, tanto de los moldes desarrollados como de los moldes objeto de estudio.

#### **1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS.**

Para una mayor comprensión del documento se expone la distribución de capítulos del mismo con un breve resumen de cada uno de ellos:

- **Capítulo 1. Introducción**
- **Capítulo 2. Estado del arte.** Pretende introducirse en los fundamentos del proceso de rotomoldeo así como de sus principales características, ventajas y limitaciones. Además se aporta una visión actual del desarrollo e innovación en dicho campo, los últimos avances y las previsiones futuras.
- **Capítulo 3. Desarrollo y análisis teórico del molde de rotomoldeo prototipo.** En este capítulo se inician los procesos de estudios teóricos de obtención de un nuevo molde prototipo de rotomoldeo, centrado en la búsqueda de las limitaciones y problemáticas de los moldes convencionales y estableciendo las modificaciones necesarias para la creación de un molde optimizado. En este apartado clave se exponen los procesos realizados y las herramientas utilizadas para la generación de un molde de rotomoldeo más eficiente.
- **Capítulo 4. Procesos de fabricación del molde de rotomoldeo prototipo.** Tras la optimización teórica del proceso de rotomoldeo a través del molde como elemento principal, se desarrollan los imprescindibles procesos de fabricación, describiéndose las técnicas, herramientas y materiales utilizados para la creación física real del molde prototipo.
- **Capítulo 5. Experimentación del molde prototipo de rotomoldeo.** Se presentan en el dicho apartado la metodología, herramientas, materiales requeridos para los

procesos experimentales, así como las variables de estudio y el tratamiento de dichos datos.

- **Capítulo 6. Obtención y análisis de resultados.** Se mostrarán todos los resultados obtenidos en los procesos experimentales, de forma ordenada y estructurada, aportando además un completo análisis comparativo de estos datos y los teóricamente calculados, tanto de los moldes convencionales de aceite como del desarrollado, de forma crítica y explícita. Este capítulo resalta la validación de los procesos teóricos y de simulación numérica realizados.
- **Capítulo 7. Estudio energético comparativo entre el proceso desarrollado y procesos convencionales de rotomoldeo.** A partir de los resultados experimentales obtenidos, de los disponibles de fuentes externas y de los obtenidos en los procesos de cálculo iniciales de las diferentes tecnologías estudiadas, se determinarán comparativamente los principales parámetros de dichas tecnologías, fundamentalmente desde el punto de vista energético.
- **Capítulo 9. Conclusiones y líneas futuras de investigación.** Finalmente, como último apartado del documento, se establecen las conclusiones principales del proyecto de investigación y se plantean las posibles líneas futuras de investigación.



## *Capítulo II*

### **FUNDAMENTOS DEL ROTOMOLDEO Y ESTADO DEL ARTE**



## 2. FUNDAMENTOS DEL ROTOMOLDEO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1. INTRODUCCIÓN

El moldeo rotacional o rotomoldeo es un método de transformación de plásticos para la producción fundamentalmente de piezas huecas, donde el material en forma líquida o en polvo va conformando la forma del molde gracias a diversos movimientos del mismo y a los procesos térmicos que se suceden paralelamente. De una forma simple el proceso se puede describir, tal y como se muestra en la figura 2.1.

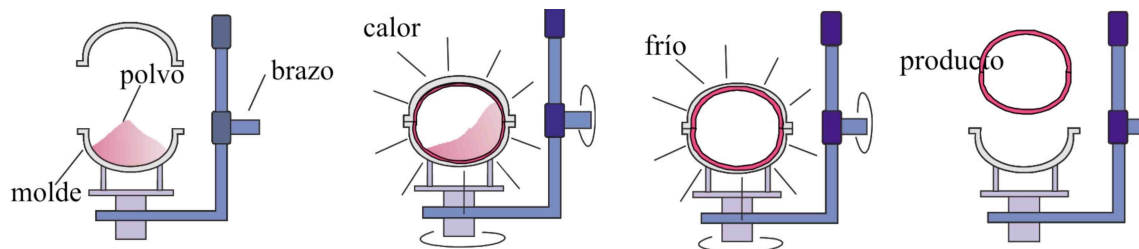


Figura 2.1. Esquema básico del proceso de moldeo rotacional [1].

En este proceso una cantidad de plástico frío, en polvo o líquido, se introduce en la mitad del molde también frío. El molde se cierra y se hace rotar en torno a dos ejes en el interior del horno. Cuando la superficie metálica del molde se calienta lo suficiente, el plástico que se encuentra sobre su base en el interior comienza a fundir y se adhiere a las paredes internas del molde.

El plástico va fundiendo en capas sucesivas y gracias a la rotación biaxial cuando todo el plástico ha fundido el interior del molde debe estar completamente recubierto. En ese momento puede comenzar la etapa de enfriamiento mientras continúa la rotación del molde. Una vez solidificado el plástico, el molde se desplaza hacia la zona de carga y descarga donde se extrae la pieza. Este proceso se puede emplear también para materiales termoestables, siendo todas las etapas descritas iguales, sólo que en este caso el material no funde si no que polimeriza sobre la superficie del molde y de modo que el diseño del molde debe ser tal que permita la extracción de las piezas.

A diferencia de lo que ocurre con las otras técnicas de transformación descritas, el calentamiento y enfriamiento del plástico tienen lugar en el interior de un molde en el que no se aplica presión.

El proceso de moldeo rotacional fue desarrollado en los años 40 pero en principio atrajo poca atención porque se consideró un proceso lento restringido a un número

reducido de plásticos. A escala industrial comenzó a emplearse en la década de los 50 para la fabricación de muñecas y balones de playa que se fabricaban con plastisoles de PVC, siendo todavía un proceso marginal. En los años 60 comenzó la expansión con la introducción de ciertos grados de PE en polvo especialmente desarrollados para rotomoldeo. En las dos últimas décadas las mejoras en el control del proceso y el desarrollo de nuevos materiales para rotomoldeo han dado lugar a un gran aumento de la utilización de esta técnica de transformación. Actualmente se rotomoldea una gran diversidad de plásticos como distintos grados de PA, ABS, PC, HIPS, PP, EVA, acetales, materiales reactivos (termoestables), plastisoles de PVC, entre otros. El PE en sus diferentes grados supone el 85% de la cantidad total de plásticos rotomoldeados, pues presenta unas propiedades de flujo tanto del polvo como del fundido y una estabilidad térmica que lo hacen ideal para este proceso. [1] [2]

Actualmente el crecimiento del rotomoldeo frente a las demás técnicas de transformación es espectacular. En la figura 2.2 se compara el crecimiento promedio anual determinado como el aumento del consumo de plásticos por diferentes tipos de procesado entre el año 1996 y 2000. Mientras que el crecimiento de otras técnicas de transformación tradicionales como el soplado o la inyección, está alrededor del 4%, las cifras de crecimiento de estos años para rotomoldeo ascienden al 14%. A pesar de ello las cifras de negocio están todavía hoy alejadas de las de otras técnicas de transformación tradicionales como inyección o extrusión.

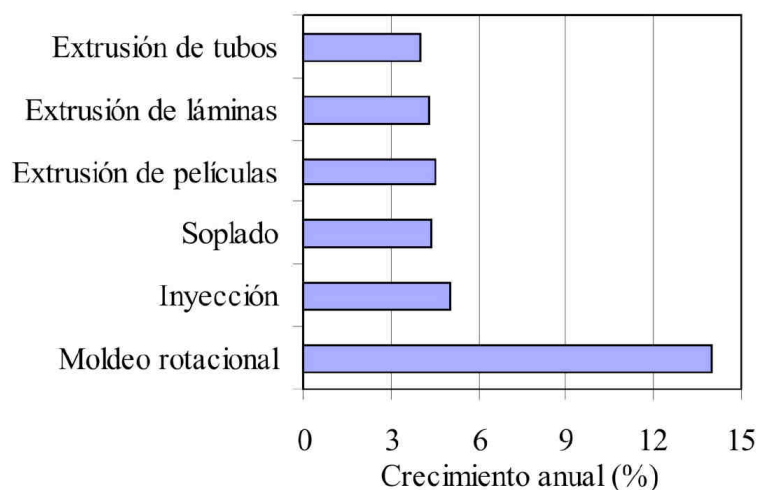


Figura 2.2. Crecimiento anual promedio del moldeo rotacional frente a otras técnicas de transformación para los años 1996-2000. [1]

El tipo de artículos que actualmente se rotomoldea es muy variado, en general se trata de artículos huecos que pueden ser cerrados o abiertos, con paredes sencillas o con múltiples, ver figura 2.3. Igualmente puede tratarse de artículos espumados o reforzados con

fibras o artículos blandos. En EEUU más del 40% de la producción se destina a la industria del juguete, el 30% a la fabricación de tanques, contenedores y envases de todo tipo, y un 8% a la fabricación de piezas para automóviles, embarcaciones y aeronáutica. En Europa la situación es bastante diferente; los envases, tanques y contenedores suponen el 44% de los productos rotomoldeados, los juguetes tan solo el 12% y los productos de automoción y menaje el 17 y 16%, respectivamente. En la Comunidad Valenciana, y más concretamente en la provincia de Alicante, hay comarcas enteras en las que la economía reside básicamente en la industria del juguete, donde la mayor parte de las piezas de plásticos son rotomoldeadas, por lo que este proceso se encuentra muy extendido. El competidor más directo del rotomoldeo para la fabricación de artículos huecos de una sola pieza es el soplado. Aunque también compite con los procesos de inyección y termoconformado en los que se puede fabricar artículos huecos obtenidos en dos mitades que deben ser unidas después.



Figura 2.3. Gama de productos fabricados mediante rotomoldeo. ABC Rotomoldeo Industrial

Respecto de otras técnicas de transformación, las principales ventajas y desventajas del proceso de moldeo rotacional son las siguientes:

Ventajas:

- Las máquinas y los moldes son simples y relativamente baratos.
- Esto es debido al hecho de que el moldeo rotacional no emplea presión pues no es necesario obligar a que el material fluya desde unas partes de la máquina a

otras, como ocurre con las demás técnicas de transformación, lo que hace que no se requieran moldes excesivamente resistentes

- En el mismo equipo, e incluso en un mismo ciclo se puede trabajar con moldes de distinto tamaño y forma, con lo que la planificación de la producción puede ser muy flexible
- Se puede obtener diversidad de productos huecos, artículos muy grandes (más que con cualquier otra técnica), con gran facilidad para modificar el espesor, dobles capas, artículos reforzados, espumados, entre otros
- Los productos pueden estar libres de tensiones si se adoptan las precauciones oportunas (puesto que no se aplica presión)
- Se puede evitar o disimular las líneas de unión en las piezas rotomoldeadas en el caso de piezas flexibles

Desventajas:

- El coste de los materiales es relativamente alto puesto que la mayoría de los plásticos se sirven en granza y deben ser sometidos a un proceso de molienda criogénica que encarece el proceso y, además las características del polvo obtenido son cruciales para la calidad de las piezas
- Los ciclos son largos pues cada vez los moldes se calientan desde temperatura ambiente hasta elevadas temperaturas y luego se enfrían, empleando por lo general hornos de convección forzada o corrientes de aire, lo que resulta en un deficiente aprovechamiento del calor
- Las etapas de carga y descarga de los moldes pueden resultar muy complicadas y requieren mucha mano de obra
- Los materiales que se emplean hoy todavía son limitados en comparación con otros procesos

En definitiva se trata de un proceso económico y muy flexible (tanto en la planificación de la producción como en el diseño de piezas), muy adecuado para la fabricación de tiradas cortas de piezas grandes, y en el cual se pueden obtener piezas de unas dimensiones que no es posible obtener mediante otros procesos. Sin embargo, también se trata de un proceso lento donde el aprovechamiento del calor es bastante deficiente y que requiere de mucha mano de obra en las etapas de carga y descarga.

## 2.2. MÁQUINAS Y MOLDES

### 2.2.1. Máquinas

Las máquinas de rotomoldeo deben ser capaces de hacer girar al molde en torno a dos ejes perpendiculares. Las primeras máquinas empleadas utilizaban un sistema de giro de vaivén, y se denominan máquinas de tipo “Rock and Roll” como las que se muestran en la figura 2.4.



Figura 2.4. Máquina de rotomoldeo convencional de horno “Rock and Roll”. M-Plast India Ltd

En estas máquinas se produce el giro completo alrededor de uno de los ejes, mientras que simultáneamente el sistema se coloca sobre otro eje perpendicular que hace que el molde gire hasta  $45^\circ$ , provocando el movimiento de vaivén. Estas máquinas se emplean todavía hoy en la producción de artículos muy grandes en los que resulta complicado hacer el giro completo alrededor de los dos ejes, como el que se muestra en la figura 2.4 para la fabricación de cascos de canoas.

Las máquinas más modernas consiguen la rotación completa como se muestra en la figura 2.5.

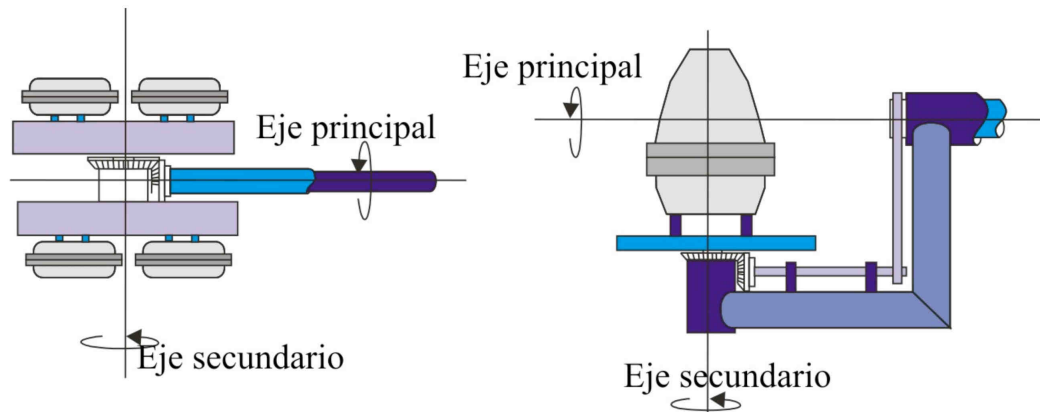


Figura 2.5. Máquinas de moldeo rotacional de brazo recto y acodado para giros completos en dos ejes.

En el primer tipo de brazo (brazo recto) se puede colocar mayor número de moldes en cada ciclo, pero deben ser de menor tamaño que en el caso del brazo acodado. En ambos tipos de brazo los motores que hacen girar cada eje son independientes, de modo que se puede seleccionar distintas velocidades de rotación en cada eje para obtener la relación de rotación deseada. La velocidad de rotación óptima para conseguir una distribución adecuada del material dependerá especialmente de la geometría de la pieza que se desea moldear. Por ejemplo, para geometrías esféricas se recomienda una velocidad de rotación de 12 rpm (para el eje principal) y una relación de rotación de 4:1, mientras que para piezas alargadas (montadas en el molde horizontalmente) la relación que recomiendan los fabricantes es 8:1 (y 1:5 si van montadas verticalmente). Por lo general, el molde debe mantenerse girando durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento.

En cuanto al sistema de calentamiento, en el pasado se realizaron diversos intentos para calentar los moldes con aceite o disoluciones salinas calientes que circulaban por camisas situadas alrededor de los moldes, pero hoy en día este tipo de calefacción no es habitual. Estos métodos ofrecen muy buena eficacia para la transmisión de calor pero presentan problemas de mantenimiento. En las máquinas modernas de rotomoldeo se emplea un horno de convección forzada para calentar los moldes. En la mayoría de los casos el horno se calienta por combustión de un gas, aceite o electricidad como fuente de energía. La electricidad es limpia pero lenta, el aceite requiere cuidados y mantenimiento regular, por lo que habitualmente se prefieren los hornos calentados por la combustión de un gas. Para conseguir una buena circulación del aire en el interior del horno se emplean ventiladores y tabiques deflectores, de modo que se evita la aparición de zonas muertas.

Habitualmente se emplea como sistema de enfriamiento aire forzado, agua pulverizada o combinaciones de ambos. En ocasiones se pueden sumergir los moldes en



baños de agua. Los sistemas de giro, calentamiento y enfriamiento son muy parecidos en todas las máquinas industriales. Las distintas máquinas de rotomoldeo empleadas industrialmente difieren principalmente en la disposición de las distintas estaciones (calentamiento/enfriamiento/descarga/carga) y en la forma de transferir los moldes de una estación a otra. Las máquinas más corrientes hoy en día son, sin duda, las máquinas tipo carrusel. Estas máquinas resultan muy eficientes, altamente productivas y de bajo mantenimiento. Las máquinas carrusel de tres brazos fijos, como la que se muestra en la figura 2.6 tienen tres estaciones, por lo que los brazos giran  $120^\circ$  para desplazarse. Se emplean cuando los ciclos de horno y enfriamiento tienen duraciones similares y cuando la carga y descarga pueden ser fácilmente manipuladas. En las máquinas de brazos fijos el tiempo en que los brazos están en cada estación está controlado por la duración de la etapa más lenta.

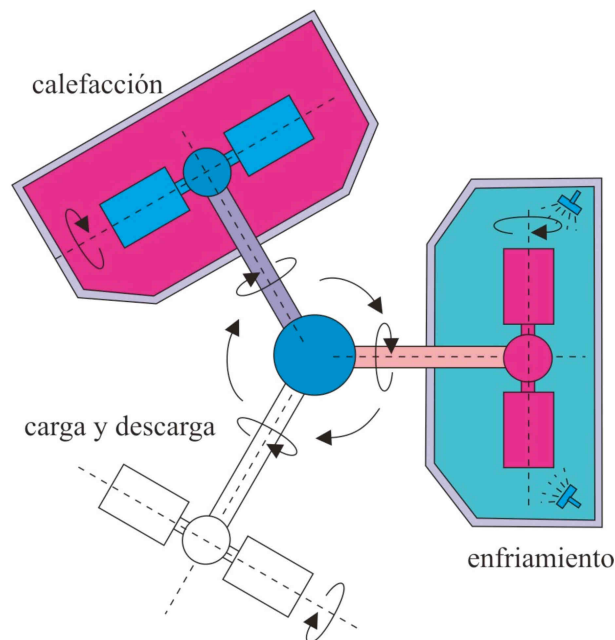


Figura 2.6. Máquina tipo carrusel de tres brazos fijos. [2]

Cuando la duración de uno de los ciclos es muy superior a la duración de los otros se pueden emplear máquinas de 4 brazos, los cuales forman un ángulo de  $90^\circ$  entre sí. En estas máquinas la estación más lenta se encuentra duplicada. Actualmente estas máquinas están siendo equipadas con brazos independientes, de modo que la planificación de la producción es mucho más versátil. Además la mayoría de las máquinas modernas disponen de una línea de aire frío y/o caliente que circula por el interior del brazo que puede introducirse en el interior del molde o dirigirse a algún punto del exterior donde el acceso del frío o el calor es más complicado.

### 2.2.2. Moldes

Los moldes son piezas clave en el proceso de rotomoldeo. Deben tener los siguientes requerimientos básicos:

- El material del que están fabricados debe tener una buena conductividad térmica para que el calor se transfiera o se elimine del plástico lo más rápidamente posible
- Deben tener la suficiente resistencia mecánica para permanecer sin alabearse durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento a que deben ser sometidos
- Las dos partes del molde deben disponer de un sistema de cierre que permita cerrarlo fuertemente y abrirlo con sencillez
- Deben poder montarse sobre el brazo o plato de forma que no se impida la circulación del aire a su alrededor
- Deben tener un respiradero que tiene la función de mantener la presión del interior del molde igual a la atmosférica. Esto es muy importante si se tiene en cuenta el gran volumen de aire que se aloja en el interior de los moldes y la gran variación de temperatura que se produce a lo largo del ciclo

Si el respiradero se bloquea en algún momento de la etapa de calentamiento puede dar lugar a sobrepresión que podría provocar que el material saliera por la línea de partición, o si el bloqueo del respiradero se produce durante la etapa de enfriamiento, se pueden producir presiones por debajo de la atmosférica, lo que puede conducir a piezas rechupadas y deformadas. En la figura 2.7 se muestra un molde típico de aluminio empleado en moldeo rotacional. [3]

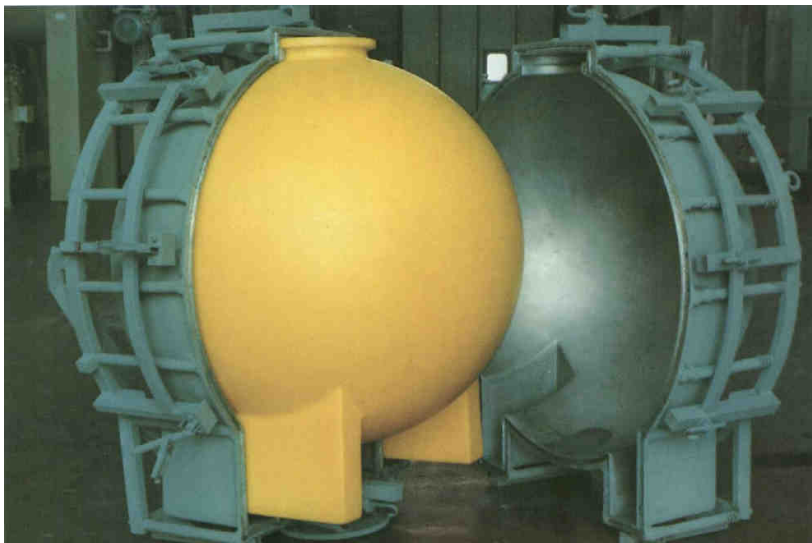


Figura 2.7. Molde de aluminio para moldeo rotacional. [2]

Los moldes normalmente están constituidos por dos mitades, aunque cuando la geometría de la pieza es complicada pueden tener más partes para facilitar el desmoldeo. Se pueden fabricar a partir de distintos materiales, como el acero, aluminio y aleaciones de cobre/níquel. En cuanto a los métodos de fabricación, generalmente se fabrican por mecanización, galvanoplastia y fundición.

Los moldes de aluminio fundido son los más empleados, especialmente cuando se moldean formas complejas. El precio de una colada puede ser relativamente elevado, si bien cuando se fabrican diversas cavidades suele preferirse este tipo de moldes sobre otros. Por otra parte, estos moldes son algo más blandos y susceptibles de estropearse que, por ejemplo, los moldes fabricados de planchas de acero. Los moldes galvanizados, generalmente de cobre/níquel, se emplean especialmente para plastisoles de PVC. En estos moldes la reproducción de detalles es muy precisa y suelen emplearse para artículos flexibles en los que no deben aparecer líneas de partición (como cabezas de muñecas). Estos moldes resultan relativamente baratos, sin embargo, tienen una duración corta. Los moldes fabricados a partir de planchas de metal son generalmente los más económicos y se emplean para productos muy grandes, que no requieran texturas especiales o reproducción de detalles muy precisa.

En cuanto al diseño de piezas en moldeo rotacional, se dice que este proceso es el sueño hecho realidad de cualquier diseñador por la libertad de la que goza para diseñar las piezas. Aún así existen una serie de restricciones.

Mediante rotomoldeo se pueden producir artículos huecos de doble pared, como por ejemplo cascos de embarcaciones. En muchos casos este tipo de estructuras se pueden rellenar con un material espumado para mejorar la resistencia o el aislamiento. Existe una serie de limitaciones en estas piezas como que el hueco de la cavidad debe tener un volumen al menos 3 veces mayor que el volumen de las paredes de la pieza, y la distancia entre las paredes debe ser al menos de 5 veces el espesor de la pared [4]. Se suelen emplear nervios de refuerzo para dar rigidez a piezas que contienen grandes superficies planas con un espesor pequeño. También se puede construir canales para dar rigidez. En cuanto a los ángulos, en general en ángulos agudos se acumulan más tensiones que en ángulos suaves. Diseñando piezas con ángulos amplios se puede conseguir la resistencia adecuada, donde el material se reparte de forma correcta. En el caso de ángulos agudos hacia afuera tiende a acumularse una cantidad extra de material, mientras que los que se proyectan hacia adentro tendrán escasez de material.

Otra ventaja que presentan las piezas y los moldes en rotomoldeo es que el espesor de la pared se puede modificar simplemente variando la cantidad de material que se introduce en el molde, a diferencia de lo que ocurre en otros procesos de transformación donde sería necesario rectificar el molde.

### 2.3. ETAPAS DEL PROCESO DE ROTOMOLDEO

Si se determina la temperatura en varios puntos del molde durante un ciclo de rotomoldeo se obtienen curvas como las que se muestran en la figura 2.8.

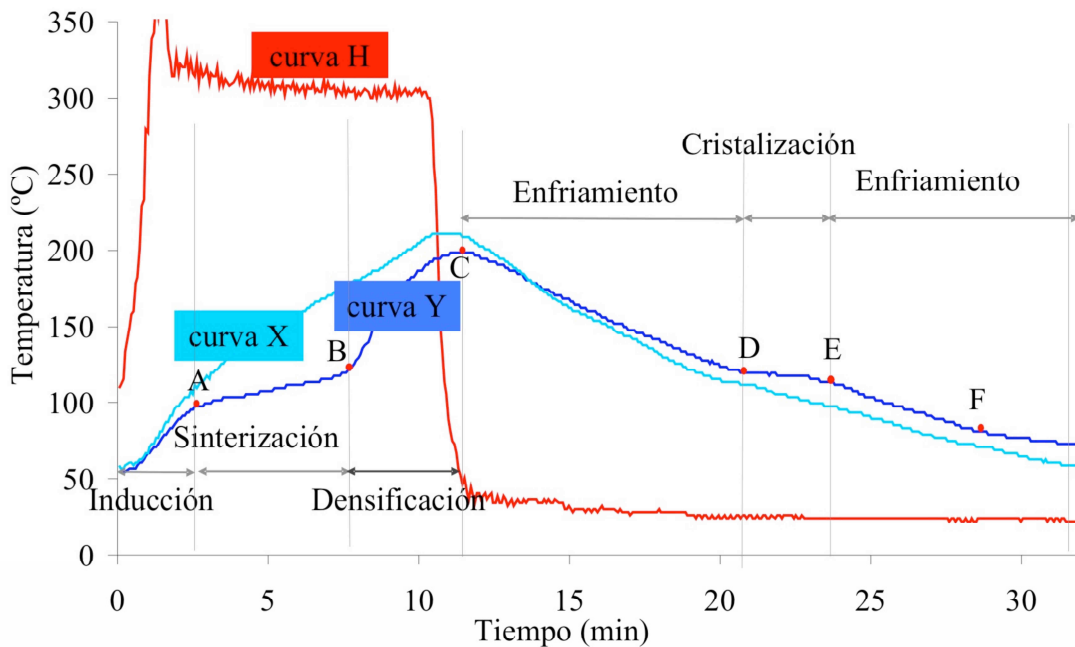


Figura 2.8. Evolución de la temperatura del aire que rodea al molde (curva H), del molde (curva X) y del aire del interior del molde (curva Y) durante el proceso de moldeo rotacional y etapas que se observan durante el ciclo. [2] [5]

La curva H muestra la temperatura del ambiente que rodea al molde, que como se puede observar tiende a alcanzar la temperatura nominal del horno tan pronto como el molde se introduce en su interior. La temperatura del molde y del aire del interior del mismo vienen representadas por las curvas X e Y. La temperatura del aire del interior del molde (curva Y) da información muy valiosa sobre los procesos que tienen lugar mientras el plástico se encuentra en el molde. Se puede observar 6 etapas claramente diferenciadas en la curva Y.

Durante la primera etapa, el material en polvo se encuentra tambaleándose en la base del molde mientras éste gira. Esta etapa se conoce con el nombre de **inducción**.

Cuando el molde alcanza una cierta temperatura a la que el polvo comienza a fundir, el polvo comienza a adherirse a la superficie del interior del molde. En esta etapa diferentes capas de polvo quedan adheridas en la superficie interior del molde y van absorbiendo calor para fundir, por lo que la temperatura del material aumenta lentamente, lo que se conoce como etapa de **sinterización**. Una vez que todo el material se ha adherido al molde, la temperatura aumentará a mayor velocidad, dependiendo de la capacidad calorífica del fundido. Esta es la etapa de **densificación** durante la que se consolida el fundido. A continuación tiene lugar la etapa de **enfriamiento inicial** a una velocidad que lógicamente estará determinada por el sistema de enfriamiento empleado. Cuando el material fundido comienza a cristalizar se observa una nueva meseta, que en este caso es debida al desprendimiento de calor durante la cristalización del material (etapa de **cristalización**).

Por último se observa la etapa de **enfriamiento** final que se mantendrá hasta que la pieza tenga suficiente consistencia para poder ser extraída del molde sin deformarse. A continuación se describe con mayor detalle todo lo acaecido en cada una de las etapas. [5]

### 2.3.1. Etapa de inducción

En la primera etapa el molde con el material en su interior se introduce en un horno de aire forzado que calienta su superficie. En principio el molde y el material están fríos, y el polvo se encuentra sobre la base del molde, de modo que conforme se produce la rotación del molde el polvo sufre un movimiento característico, debido a la rotación del molde y a la acción de la gravedad, como se puede observar en la figura 2.9 donde se representa lo que ocurriría en un molde oval que gira en torno a dos ejes.

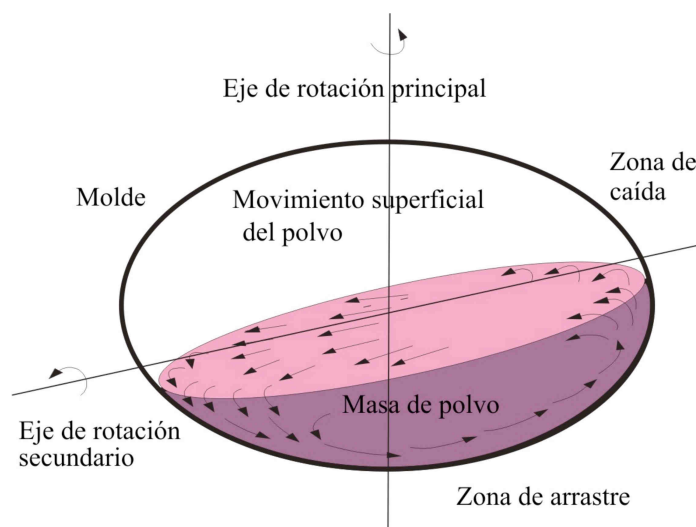


Figura 2.9. Movimiento del polvo en el interior del molde durante la etapa de sinterización. [2]

Cuando comienza el movimiento del molde, el polvo que se encuentra cerca de las paredes del molde gira con éste a su misma velocidad. La capa de polvo en contacto con el molde irá ascendiendo arrastrado por la pared y caerá a la zona central cuando la fuerza de gravedad supere el rozamiento con la pared y entre las partículas. Durante la caída, las partículas de polvo que se encontraban cerca de la pared del molde (más caliente) se mezclan con las demás, que forman lo que llamaremos la balsa de polvo, de modo que la temperatura de las mismas se homogeneiza, y una capa renovada de polvo quedará en contacto con el molde. Mientras tanto el aire del interior del molde estará en contacto directo con la parte del molde que queda al descubierto y con la balsa de polvo.

### 2.3.2. Etapa de sinterización

Llegado al punto A de la figura 2.8 algunas de las partículas más pequeñas inician la fusión, su superficie externa se hace pegajosa y se adhieren a la superficie del molde. Este punto marca el final de la etapa de inducción y el comienzo de la etapa de sinterización. Conforme el molde gira diferentes capas de material se van adhiriendo unas sobre otras y de esta forma es como se produce el reparto del material sobre el molde. Cuando todo el polvo ha desaparecido finaliza esta etapa, en el punto B de la curva correspondiente a la temperatura del aire del interior del molde (figura 2.8). Por tanto, durante el periodo comprendido entre A y B coexisten polímero en polvo y fundido.

Cuando las partículas de un polímero, y en general de cualquier material sólido se ponen en contacto a elevadas temperaturas tienden a disminuir su superficie total por coalescencia. Este proceso es conocido como sinterización. Durante la sinterización se desarrollan, en primer lugar interfases entre partículas adyacentes, que van creciendo para formar puentes entre partículas. La disminución en el área superficial de las partículas implica la disminución de la energía superficial, por tanto, la tensión superficial es la fuerza impulsora en este proceso. En la figura 2.10 se muestra la evolución de la interfase de partículas adyacentes durante esta etapa.

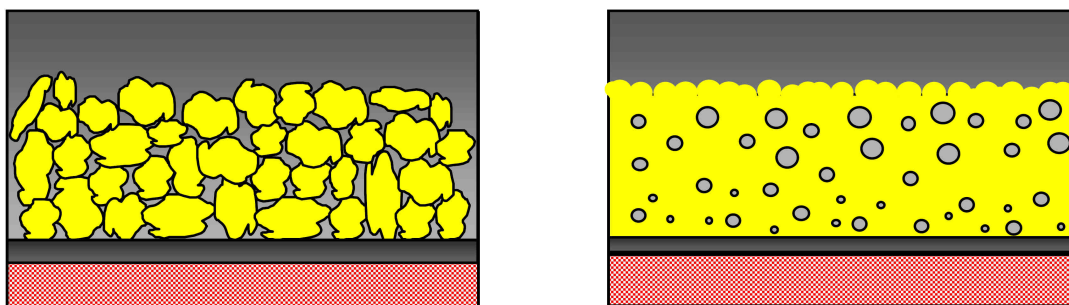


Figura 2.10. Evolución de la interfase entre partículas adyacentes durante la etapa de sinterización. [6]

De este modo durante el proceso de sinterización se produce un aumento de la densidad aparente del material, que pasa de la densidad aparente del polvo con valores próximos a 0,4 g/cm<sup>3</sup>, a un valor de la densidad cercano a la densidad del fundido (algo menor que la densidad del material sólido). Este hecho se debe tener en cuenta desde el punto de vista de la simulación, como se comentará mas adelante.

Los mecanismos que controlan el proceso de sinterización son básicamente la difusión y el flujo viscoso. En el caso de las moléculas de polímero la energía de activación para la difusión es muy alta, por lo que el proceso estará controlado principalmente por el flujo viscoso y, por tanto, por la temperatura. *Frenkel* obtuvo la siguiente expresión para la velocidad de coalescencia debida al flujo viscoso:

$$\frac{y}{a} = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\Gamma}{\mu a} t}$$

donde  $y$  y  $a$  son el radio del cuello y de las partículas, como se muestra en la figura 2.11, y  $\Gamma$  son la tensión superficial y  $\mu$  la viscosidad del polímero y  $t$  el tiempo.

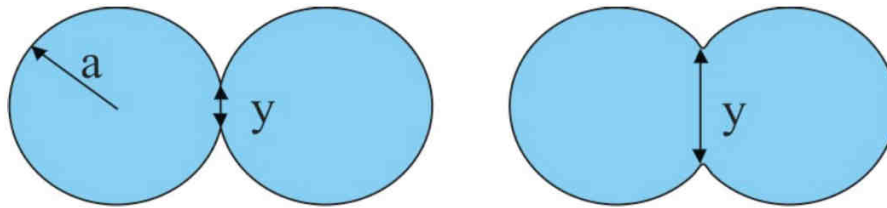


Figura 2.11. Evolución del radio del cuello entre partículas durante el proceso de sinterización. [2]

El modelo de Frenkel es sólo aplicable a partículas redondas del mismo tamaño, además está limitado a materiales newtonianos, si bien es útil como primera aproximación. La mayoría de los polímeros en moldeo rotacional se comportan como Newtonianos, puesto que las velocidades de cizalla implicadas son extremadamente bajas (del orden de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ). Este modelo ha sido extendido por algunos autores para considerar la respuesta viscoelástica de algunos materiales. Sin embargo, dado que la velocidad a la que transcurre el proceso es relativamente lenta y que el tiempo de relajación de los polímeros empleados habitualmente en moldeo rotacional es relativamente alto, se pueden despreciar, en una primera aproximación, efectos viscoelásticos.

A partir del modelo de Frenkel se puede establecer qué características del polímero influyen sobre el proceso de sinterización, y por tanto qué polímeros pueden ser aptos para moldeo rotacional. Según este modelo:

- La velocidad de sinterización está favorecida cuanto menor sea la viscosidad del polímero; por tanto el peso molecular de los polímeros no debe ser muy elevado (aunque tampoco demasiado bajo porque esto irá en detrimento de las propiedades mecánicas del material)
- Por otra parte, cuanto menor sea la curvatura de las partículas (mayor radio) se favorece el proceso. Lógicamente también hay un límite para las partículas demasiado grandes que tardan más en fundir y se moverán peor por el molde
- Cuanto mayor sea la tensión superficial más favorecido se verá el proceso, por lo que la presencia de ciertos aditivos y de agentes desmoldeantes no es conveniente

### 2.3.3. Etapa de densificación

En el punto B de la figura 2.8 todo el material recién sinterizado se encuentra formando una especie de película fundida que recubre el molde. En el interior del material quedan atrapadas burbujas de aire, consecuencia natural del proceso de sinterización. Durante la etapa de densificación la pieza se mantiene en el horno mientras las burbujas son eliminadas del fundido, hasta obtener un fundido homogéneo.

Durante mucho tiempo se ha pensado que las burbujas desaparecían por migración hacia la superficie del plástico en contacto con el aire del interior del molde. Sin embargo, esta teoría puede ser fácilmente descartada si se realiza un balance de fuerzas sobre una burbuja inmersa en un plástico fundido, como la que se muestra en la figura 2.12:

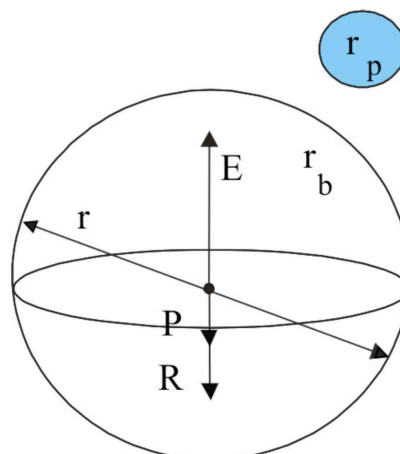


Figura 2.12. Balance de fuerzas sobre una burbuja de aire inmersa en plástico fundido. [2]

se obtiene

$$\text{empuje} = \text{peso de la burbuja} + \text{resistencia del fundido}$$



$$\frac{4\pi r^3}{3} \rho_p g = \frac{4\pi r^3}{3} \rho_b g + 6\pi \eta_0 r u$$

donde  $r$  es el radio de la burbuja,  $\rho_p$  y  $\rho_b$  son la densidad del polímero y de la burbuja,  $\eta_0$  es la viscosidad del polímero a cizalla cero,  $u$  la velocidad a la que se mueve la burbuja y  $g$  la gravedad.

Para un diámetro de burbuja de  $2,5 \cdot 10^{-4}$  m, tomando como densidad del aire y del polímeros fundido 1 y 950 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, y la viscosidad del polímero fundido de 1.104 Pa·s, se puede comprobar que el empuje es despreciable dada la alta viscosidad de los polímeros fundidos (se obtiene que la velocidad a la que se mueve la burbuja es de 0.05 mm/h). [2]

Actualmente se acepta que las burbujas desaparecen debido a la disolución de las mismas en el fundido. Cuando la temperatura aumenta el oxígeno comienza a disolverse en el polímero (el oxígeno tiene una solubilidad, por ejemplo, en el polietileno de dos veces la del nitrógeno). A temperaturas más altas, además, el oxígeno es reducido por las reacciones de oxidación que tendrán lugar con el polímero. Conforme desaparece el oxígeno la presión parcial del nitrógeno en la burbuja aumenta, con lo que se facilita el proceso de disolución de éste, lo que a su vez provocará un aumento de la presión parcial del oxígeno. Esta cadena de situaciones se repite hasta que la burbuja desaparece. Cuanto más alta sea la temperatura máxima alcanzada por el fundido, menor será el contenido en burbujas y poros, y por tanto mejorarán las propiedades mecánicas de la pieza, como se puede observar en la figura 2.13, donde se pueden ver los resultados de la energía de impacto para piezas de polietileno rotomoldeadas hasta diferentes temperaturas. La energía de impacto aumenta hasta que la temperatura alcanzada por la pieza es demasiado elevada y en consecuencia se ha iniciado la descomposición del material. La descomposición de material, en contra de lo que se podría pensar, se inicia en la cara interior de las piezas donde, aunque la temperatura máxima alcanzada no será tan elevada como en la cara en contacto con el molde, existe aire en contacto con la pieza, produciéndose reacciones de oxidación.

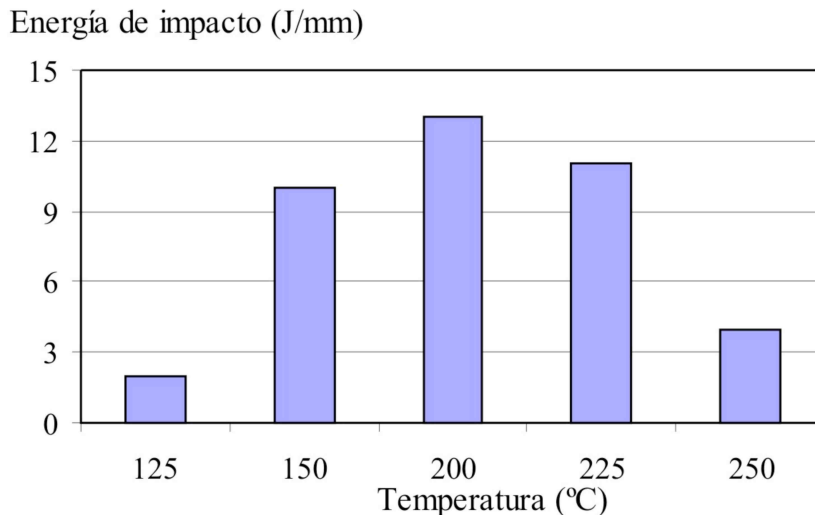


Figura 2.13. Evolución de la energía de impacto con la temperatura alcanzada por el aire del interior del molde de una pieza de polietileno rotomoldeada. [2]

#### 2.3.4. Etapas de enfriamiento inicial, cristalización y enfriamiento final

Cuando el molde se mueve hacia el área de enfriamiento (justo antes del punto C de la figura 2.8), la temperatura sigue aumentando un poco debido al calor residual que queda en el molde y en el polímero fundido. A partir del punto C la temperatura disminuye a una velocidad que depende del sistema de enfriamiento seleccionado, por lo general aire forzado, agua pulverizada o combinaciones de ambos. Durante esta primera etapa de enfriamiento el material se encuentra todavía en estado fundido. La etapa de enfriamiento inicial se prolonga hasta la meseta observada a partir del punto D de la figura 2.8.

Para materiales cristalinos se puede apreciar una meseta entre los puntos D y E de la figura 2.8, debido a que el calor latente absorbido durante la fusión es desprendido durante la cristalización, de modo que el aire del interior del molde se mantiene a temperatura prácticamente constante. La extensión de la meseta está directamente relacionada con la cantidad de material que hay en el interior del molde y con la cristalinidad desarrollada por el mismo, de modo que para materiales amorfos no es posible observar esta etapa.

Después del proceso de cristalización o solidificación (a partir del punto E de la figura 2.8) el proceso de enfriamiento continúa hasta que el material adquiere suficiente consistencia para poder ser extraído del molde. El material continúa enfriándose y una nueva revisión de la curva muestra un suave cambio de pendiente en el punto F. Esta inflexión tiene lugar cuando la pieza se separa de la pared del molde como consecuencia

de la contracción. A partir de ahí el enfriamiento es más lento puesto que hay una capa de aire entre la pared del molde frío y el plástico. Si cuando esto ocurre la pieza tiene una temperatura a la que ya puede ser manipulada se escoge este punto para el desmoldeo. En este caso la separación de la pieza del molde facilita la etapa de desmoldeo.

La morfología del material (porcentaje de cristalinidad, tipo y tamaño de microcristales) determina en gran medida las propiedades de las piezas obtenidas (propiedades mecánicas, barrera, ópticas,...) y depende fundamentalmente de la velocidad a la que se realizan las tres etapas de enfriamiento comentadas.

Durante el enfriamiento el flujo de calor se invierte respecto de lo que ocurre durante el calentamiento, de forma que la superficie más caliente es la del interior del plástico. Si las condiciones de enfriamiento son lentas, la pieza se enfría a velocidades homogéneas y no aparecen gradientes de temperatura elevados entre el exterior y el interior. En condiciones de enfriamiento lentas los materiales con capacidad de cristalizar desarrollan contenidos cristalinos altos. Para polímeros cristalinos si se emplean velocidades de enfriamiento bajas se produce una gran reducción del volumen específico, por lo que la densidad del material aumenta mucho al pasar del estado fundido al sólido, de modo que la pieza se encoge. Si por el contrario el enfriamiento es muy drástico, el contenido en cristalinidad medio de la pieza es menor (y también el encogimiento), pero la velocidad a la que se enfrían las capas de material en contacto con el molde es mayor que la velocidad a la que se enfrían las capas del interior, de modo que el material del interior de la pieza tendrá un volumen específico menor que el del exterior. Es, por tanto, más denso el interior que el exterior, de modo que aparecerán tensiones que podrían provocar el alabeo de la pieza.

En el caso de materiales amorfos, las condiciones de enfriamiento no afectan tanto a las propiedades del material, puesto que la variación de la densidad con la temperatura es pequeña y prácticamente independiente de la velocidad de enfriamiento, hasta el punto de que cuando se emplean estos materiales los moldes se suelen sumergir en cubas de agua, durando el enfriamiento unos pocos segundos.

La figura 2.14 muestra la variación de la cristalinidad, resistencia al impacto y resistencia a la tracción de piezas de PE rotomoldeadas sometidas a diferentes ciclos de enfriamiento. Al aumentar la velocidad de enfriamiento el calor de fusión que presenta el material disminuye, lo que indica un menor contenido cristalino. En consecuencia, en estas condiciones el material es más blando con lo que la resistencia a la tracción disminuye, mientras que la resistencia al impacto aumenta.

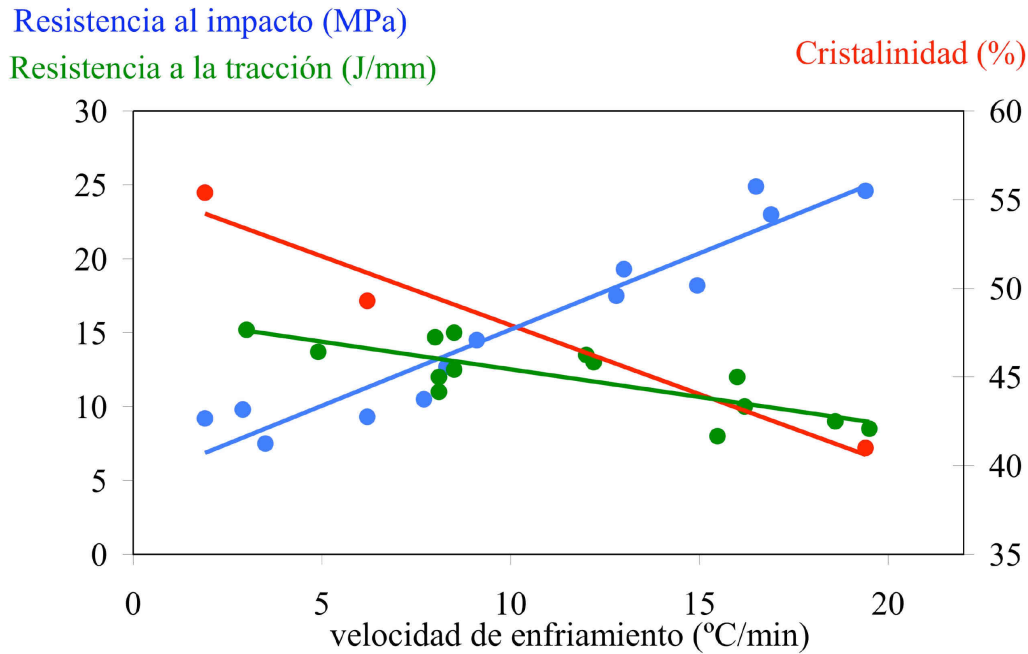


Figura 2.14. Evolución de la cristalinidad, resistencia al impacto y resistencia a la tracción para piezas de polietileno en función de la velocidad de enfriamiento en moldeo rotacional. [2]

Por tanto habrá que llegar a un compromiso entre velocidad de enfriamiento lenta y rápida. Una velocidad de enfriamiento rápida supone:

- Ciclos más cortos.
- Mayor alabeo si se emplea un material cristalino debido a la diferencia de densidad entre el interior y el exterior de la pieza.
- Menor contenido cristalino, por tanto mejores propiedades de impacto pero peor resistencia a la tracción.
- Bajo encogimiento debido a la menor cristalinidad del material.

Evidentemente una velocidad de enfriamiento lenta supone todo lo contrario, por lo que, teniendo en cuenta qué es lo más importante para el producto que se desea moldear y las características del material, se escogen las condiciones de enfriamiento más adecuadas.

## 2.4. MATERIALES UTILIZADOS PARA MOLDEO ROTACIONAL

Las características de la resina empleada, junto con las condiciones de procesado, van a determinar la calidad del producto acabado. Las propiedades de las resinas que

mayor influencia tienen sobre el producto transformado y sobre el proceso se exponen a continuación.

### 2.4.1. Forma, tamaño y distribución de tamaño de partícula

El tamaño de la partícula de los polímeros que se emplean en rotomoldeo varía entre 150 y 500  $\mu\text{m}$  [5]. En la figura 2.15 se muestra una distribución de tamaños típica.

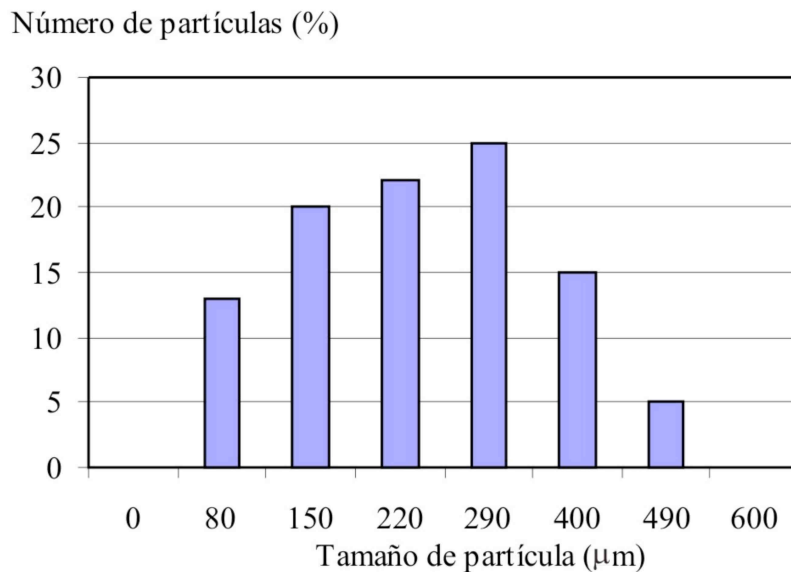


Figura 2.15. Distribución de tamaño de partícula típica para una resina de moldeo rotacional. [5]

El tamaño (TP) y la distribución de tamaños de partícula (DTP) juegan un papel fundamental sobre el flujo del polvo en el molde durante las etapas de inducción y sinterización. Las partículas más finas se moverán con facilidad entre las gruesas y serán las primeras en fundir en contacto con el molde caliente. Estas partículas producen varios efectos deseables como son producir texturas finas con un mínimo de porosidad (mejor acabado superficial) y reducir los tiempos de ciclo. Sin embargo, hay al menos dos limitaciones prácticas por las que el tamaño de partícula no debe ser excesivamente fino. Por una parte, para conseguir partículas muy finas la excesiva cizalla y temperatura desarrollada por los equipos de molienda puede conducir a una pérdida de la resistencia de las partículas y a la degradación parcial de las mismas.

Por otra parte, mover partículas muy finas por el interior del molde puede conducir a la aparición de altas cargas estáticas y a la aglomeración de las partículas. Esto provocaría una fusión y un espesor de pared poco uniformes. En contraste, si la proporción de

partículas gruesas es demasiado grande el proceso de fusión será más lento y el contenido en burbujas y la porosidad superficial mayor.

La forma de las partículas juega un papel muy importante tanto en la transmisión de calor, como en el flujo del polvo durante el rotomoldeo. Las partículas cilíndricas con relación L/D grande presentan diversos tipos de problemas durante el moldeo. Si la etapa de molienda ha sido deficiente pueden obtenerse polvos con una especie de colas o tallos alargados. Polvos de este tipo son difíciles de moldear y presentan propiedades mecánicas pobres. Esto se atribuye al enrollamiento de estas colas, entre las que puede quedar aire atrapado. Por otra parte, cuanto mayor sea la relación entre la superficie de las partículas en contacto con el molde o con otras partículas y su volumen, tanto mejor será la transmisión de calor por conducción hacia la partícula, por lo que desde el punto de vista de la transmisión de calor interesan partículas cúbicas.

Por tanto, se puede decir que desde el punto de vista de la transmisión de calor y del flujo del polvo, lo ideal serían polvos de entre 150 y 400  $\mu\text{m}$ , con formas cúbicas y con ángulos muy amplios. Es importante que haya presente una porción de finos tanto para mejorar el flujo del polvo y el acabado superficial como la transmisión de calor. Las partículas alargadas con colas no son deseables.

#### **2.4.2. Peso molecular y distribución de pesos moleculares**

Como medida del peso molecular de las resinas se emplea generalmente el índice de fluidez (MFI). El MFI de las resinas empleadas en rotomoldeo oscila por lo general entre 2 y 10 (g/10 min, 2.16 kg y 190°C).

Un resina con un MFI alto tendrá peso molecular bajo, y por tanto las propiedades mecánicas del producto obtenido serán pobres (impacto y tracción). Sin embargo, los materiales con un MFI excesivamente bajo no son adecuados para rotomoldeo, pues presentan viscosidades altas, lo que dificulta los procesos de sinterización y densificación, y además (o en consecuencia) requieren tiempos de ciclo muy largos.

#### **2.4.3. Cristalinidad**

La cristalinidad que el material sea capaz de desarrollar depende de su estructura. Los polímeros lineales (no ramificados), de pesos moleculares bajos y, en general, que presenten una estructura más regular (menos imperfecciones e impedimentos estéticos)

serán capaces de desarrollar una mayor cristalinidad si el enfriamiento se produce en las condiciones adecuadas. Los polímeros cristalinos presentan mayor densidad, mayor resistencia a la tracción y rigidez, sin embargo son menos tenaces y se encogen y alabean más que los polímeros no cristalinos, como consecuencia de las tensiones que pueden aparecer durante la cristalización, que a su vez son consecuencia de las diferentes velocidades a las que se enfriará el material a lo largo de su espesor.

## **2.5. INNOVACIONES EN MOLDEO ROTACIONAL**

Además de los elevados consumos energéticos, existen tres claros inconvenientes del moldeo rotacional frente a otras técnicas de transformación:

- Ciclos relativamente largos, pues en cada etapa el molde debe calentarse desde temperatura ambiente hasta altas temperaturas y luego enfriarse otra vez.
- La superficie de los productos rotomoldeados resulta relativamente pobre debido a la alta porosidad. Además el alto contenido en burbujas resulta en pobres propiedades mecánicas. La eliminación completa de las burbujas implica altos tiempos de horno, y en ocasiones esto puede suponer la degradación parcial del material.
- El alabeo es un problema frecuente en piezas rotomoldeadas, situación que se agrava en piezas grandes con superficies planas, tan frecuentes en moldeo rotacional .

Hay muchas estrategias que los rotomoldeadores adoptan para evitar estos problemas, como la introducción de aire frío-caliente en el interior del molde para reducir tiempos de ciclo, flameado de piezas porosas, diseño especial o acabados especiales en piezas grandes que evitan o disimulan el alabeo.

Las investigaciones en moldeo rotacional suelen centrarse en mejorar cualquiera de los tres aspectos mencionados. Entre los desarrollos más importantes que se están realizando para mejorar el proceso se encuentra la calefacción por infrarrojos, la calefacción por microondas y la presurización de moldes.

### **2.5.1. Métodos alternativos de calefacción**

Existen máquinas de rotomoldeo comerciales que emplean calefacción mediante infrarrojos, que resultan más eficientes que las máquinas convencionales aunque de momento no se están empleando demasiado en la industria.

Por otra parte, la calefacción mediante microondas parece muy prometedora, pero todavía se encuentra en fase de desarrollo: los ciclos pueden reducirse hasta en un 70%, si bien presenta el inconveniente de que, en principio, sólo se puede emplear con materiales polares y que los moldes deben estar fabricados con materiales transparentes a los microondas (apolares), como el teflón o el vidrio, que son materiales de baja resistencia.

Las investigaciones que se están realizando van encaminadas hacia estudios en el tipo de materiales para moldes.

### 2.5.2. Presurización de moldes

La presurización de moldes todavía no ha sido implantada en la industria de forma generalizada, pero es la innovación que por el momento parece más prometedora.

Se trata de introducir una ligera presión por el conducto de venteo del molde. La presión debe introducirse una vez que el polímero se encuentra completamente fundido y mantenerse tan sólo en el intervalo de temperaturas en que se mantiene fundido. Una vez que las burbujas se han producido en el fundido la presión actúa como una fuerza impulsora que provoca que las burbujas de gas se difundan a través del polímero hacia el exterior, como se muestra en la figura 2.16.

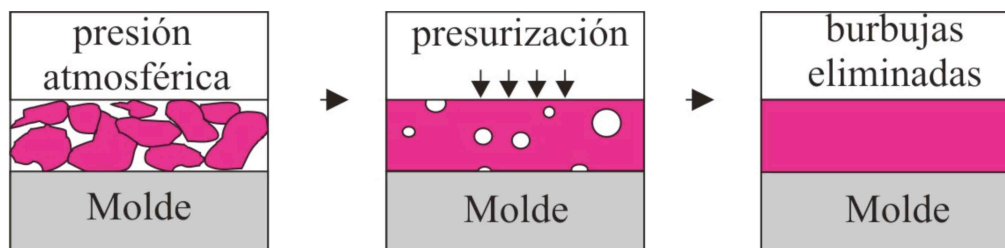


Figura 2.16. Efecto de la introducción de sobrepresión en el interior del molde durante las etapas de densificación y enfriamiento inicial. [6]

Dependiendo de la presión aplicada, el proceso de eliminación de burbujas puede requerir tan sólo unos segundos. En general, las presiones necesarias dependen de la viscosidad del polímero al comienzo de la presurización. Para la mayoría de los materiales una sobrepresión de 0,5 bares es suficiente para eliminar completamente las burbujas, y en muchos casos es suficiente con sólo 0,2 ó 0,3 bares.

La principal ventaja de presurizar los moldes es la mejora en la calidad de los productos debido a la eliminación de las burbujas y los poros, lo que a su vez implica la mejora de propiedades mecánicas. La presurización proporciona además otras mejoras,



como son una reducción de ciclos de horno (figura 2.17) puesto que las burbujas se eliminan rápidamente, y una mejora en las deformaciones y alabeos al obtenerse velocidades de enfriamiento más uniformes durante la primera etapa de enfriamiento.

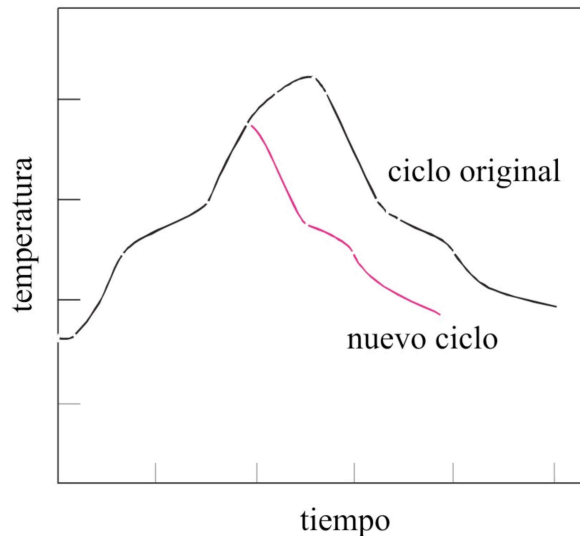


Figura 2.17. Evolución de la temperatura del aire del interior del molde para un ciclo convencional y un ciclo con presurización. [2]

El empleo de presión, sin embargo, tiene ciertas limitaciones y puede resultar extremadamente peligroso si no se toman las precauciones oportunas.

Para soportar las importantes fuerzas implicadas en el proceso de presurización se deben emplear moldes suficientemente resistentes (se debe tener en cuenta que aunque las sobrepresiones empleadas son relativamente pequeñas la superficie de los moldes típicos es muy grande, con lo que las fuerzas de apertura desarrolladas también lo serán). No es recomendable emplear presión en moldes no preparados para ello, pues incluso el empleo de una presión moderada puede causar la distorsión y hasta la rotura de los moldes. Los moldes deben estar especialmente fabricados para el empleo de presión, no deben tener superficies planas muy grandes o estas superficies deben tener estructuras de refuerzo, deben tener acabados superficiales muy buenos y líneas de partición muy bien definidas y por último deben incorporar una válvula de seguridad.

### 2.5.3. Últimas investigaciones y desarrollos

Las últimas investigaciones realizadas en el ámbito del moldeo rotacional y expuestas a la comunidad científica, pues la mayoría de los fabricantes guardan con recelo sus diferentes avances, pueden encasillarse fundamentalmente en la mejora de los

procesos de transferencia térmica tanto en las fases de calentamiento como en las de enfriamiento.

Respecto a las fases de enfriamiento, existen investigaciones como las realizadas por Abdullah, Bickerton y Bhattacharyya [7] próximas al año 2007, donde la incorporación de pines en el exterior del molde permite una mejora sustancial de la transferencia térmica entre los flujos de aire y el molde. Sus resultados, basados en el uso de tecnologías CFD, muestran reducciones del 21%, 32% y 38% en el tiempo de ciclo requerido en función del tipo de rugosidad exterior generada en el molde. A pesar de estas mejoras, el mecanizado de la rugosidad exteriores, fundamentalmente mediante la incorporación de pines supone un handicap desde el punto de vista del encarecimiento del molde y de los tiempos de fabricación requeridos, aunque la mejora del proceso queda justificada.

Otros análisis resultan de interés, como los realizados por Callan et al. [8], analizando diferentes procesos de enfriamiento y los efectos que producen sobre la microestructura y propiedades mecánicas de las piezas generadas. Queda de manifiesto las posibilidades en cuanto mejoras en las etapas de enfriamiento, aunque siempre condicionadas a las prestaciones de las piezas generadas. Estos estudios disponen de una gran utilidad subyacente, pues la reducción del tiempo de enfriamiento requerida en función de las propiedades obtenidas, o que se deseen obtener, reducirán los tiempos de ciclo globales del proceso, produciendo una mejora en la eficiencia global del proceso nada despreciable.

Los procesos de calentamiento, como parte principal del proceso de rotomoldeo, dispone de mayores líneas de desarrollo, como los estudios de calentamiento mediante elementos eléctricos realizados por Kearns y Crawford [9] en 2003. En dichos análisis, se obtuvieron importantes avances en la reducción del consumo energético, obteniéndose eficiencias térmicas entre el 20% y 25%, en comparación con el 1% alcanzado en los procesos de calentamiento mediante hornos. Sin embargo, el uso de resistencias eléctricas en los moldes debe ser optimizado, pues producen tiempos de ciclo muy elevados, en detrimento de la competitividad de dicha tecnología.

La incorporación de aceite como fluido térmico a través de canales externos ha sido estudiada desde hace años por varios investigadores, con resultados esperanzadores. Jared Sunday [11], ideó en el año 2000 un molde básico con canales exteriores de 3/8" de diámetro por los que circularía el aceite térmico. Además, su diseño contenía un sistema de depósitos de aceite a diferentes temperaturas, para la recirculación del aceite a través del

molde y el aprovechamiento de la temperatura residual del aceite, minimizando las necesidades energéticas a cambio de un complejo proceso de operación de la máquina.

En 2003 Wright y Crawford [10] desarrollaron una máquina experimental de calentamiento mediante aceite térmico, a través de pequeños conductos metálicos mecanizados externamente sobre el molde. Este procedimiento demostró las amplias posibilidades de reducción de tiempo de ciclo y de energía posibles con el calentamiento y enfriamiento mediante aceite térmico, aunque condicionado a un conveniente aislamiento térmico del molde desarrollado, en comparación con los hornos convencionales.

Las últimos adelantos que han servido de base para el desarrollo de este trabajo de investigación han sido realizados por el Laboratorio de Fabricación Integrada de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria [12], donde la incorporación de las tecnologías de electroconformado permiten la creación de nuevos moldes de rotomoldeo sobre los cuales pueden introducirse fluidos térmicos de forma envolvente a la pieza a conformar. El molde prototipo EDOH (electroforming direct oil heating) desarrollado por este grupo de investigación fue diseñado y fabricado experimentalmente, validándose los procesos de diseño utilizados (CFD), confirmando la posibilidad de la creación de moldes mediante electroconformado y estableciendo líneas futuras de investigación, que con el desarrollo de este trabajo de investigación se han convertido actualmente en una auténtica realidad.



## *Capítulo III*

### **DESARROLLO Y ANÁLISIS TEÓRICO DEL MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO**



### **3. DESARROLLO Y ANÁLISIS TEÓRICO DEL MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

El proceso de rotomoldeo se encuentra caracterizado por diversos procesos físicos entrelazados entre sí, convirtiéndolo en un hecho complejo y de difícil análisis. Por un lado, se encuentran los procesos mecánicos que generan los movimientos imprescindibles para el desarrollo de piezas. Por otra parte y de vital importancia se identifican los procesos de transferencia térmica precursores de los cambios de estado del material polimérico (sólido-líquido-sólido). Dichos procesos térmicos que tienen lugar entre los diferentes elementos y materiales son los de convección y conducción, además de los efectos de la gravedad, viscosidad, etc. Por tanto, existe una gran complejidad en el estudio que se plantea no sólo por los diferentes materiales involucrados sino por los procesos de cambios de estado que no se producen en un valor concreto de temperatura sino en un intervalo de ésta, con variación de la viscosidad, conductividad térmica, etc.

Todos estos procesos se suceden prácticamente de forma simultánea, por lo que el desarrollo de nuevos moldes y procesos de fabricación mediante rotomoldeo requiere de un complejo y amplio estudio que en ocasiones solo es posible realizar mediante herramientas informáticas.

Hoy en día se dispone de estas herramientas informáticas que permiten caracterizar y modelar todos o gran parte de los procesos de fabricación, incluyendo movimientos mecánicos, transferencia de calor o comportamiento de fluidos. Una de ellas se engloba en las tecnologías de la Dinámica de Fluidos Computacional, incorporadas en herramientas CAD, que permiten simular los procesos físicos, en este caso, del rotomoldeo.

#### **3.2. TECNOLOGÍAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujos de fluidos. Las computadoras realizan los cálculos necesarios para simular la interacción de sólidos, líquidos y gases bajo las condiciones establecidas. [1]

La base fundamental de los problemas de CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, que definen el flujo de gas o líquido de una sola fase. Estas son un conjunto de ecuaciones que definen el comportamiento dinámico de un fluido. Derivan de aplicar los principios de conservación de la mecánica y de la termodinámica al fluido, de donde se obtiene una formulación integral que generalmente se suele transformar en una formulación diferencial más práctica. [2]

$$\frac{du}{dt} = F - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 u$$

En el lado izquierdo de la ecuación se dispone el movimiento (variación del desplazamiento en el tiempo), y en el derecho los siguientes términos:

- F: Fuerzas aplicadas al fluido.
- p: presión en el fluido
- $\rho$ : densidad del fluido.
- $\nu$ : viscosidad del fluido.
- u: desplazamiento

### 3.2.1. El proceso de la dinámica de fluidos computacional

La aproximación de una variable continua en un número finito de puntos se llama discretización, como se puede observar en la figura 3.1.

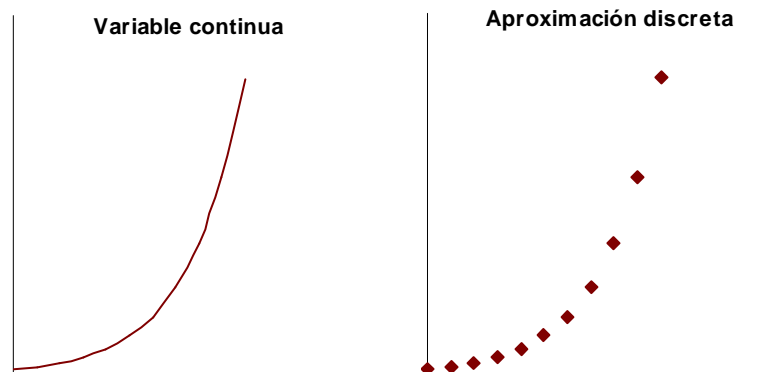


Figura 3.1: Discretización de variables.

Los elementos principales en la dinámica de fluidos computacional (CFD) son:

1. Discretización del flujo continuo, es decir, las variables de campo ( $\rho$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ ) se aproximan por un número finito de valores en puntos llamados nodos.



2. Las ecuaciones de movimiento también se discretizan, es decir, aproximadas en función de los valores en los nodos
3. El sistema de ecuaciones algebraicas se resuelve y se obtienen los valores de las variables en todos los nodos.

### **3.2.2. Etapas en un análisis de CDF**

Un análisis completo de dinámica de fluidos computacional consta de las siguientes etapas [3]:

- **Cálculos previos**

- Formular el problema y plantear las ecuaciones que lo gobiernan
- Establecer las condiciones de contorno
- La generación de una malla de volúmenes finitos

Todo esto depende del análisis que se desee realizar (fuerzas, flujos, distribución de concentraciones, transferencia de calor,...) y de la capacidad computacional.

- **Solución de las ecuaciones**

Esta es la etapa principal del CFD. En ella tiene lugar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema.

- **Análisis de los resultados**

Los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones se corresponden con el valor de las variables de campo ( $\rho$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ ,...) en cada punto de la malla. Esta enorme cantidad de números deben reducirse a los fundamentales para poder manejarse con facilidad y obtener lo que se pretendía el cálculo.

Una parte importante de esta etapa es la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, para tener una visión rápida y amena de los resultados obtenidos.

### 3.2.3. Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional ha sido empleada en una gran cantidad de campos de la ingeniería, entre los que se pueden destacar:

- Aerodinámica - aviones y automóviles
- Hidrodinámica de embarcaciones
- Motores
- Turbomáquinas - bombas y turbinas
- Transferencia de calor - sistemas de calentamiento o enfriamiento
- Combustión
- Ingeniería de procesos - mezclas y reacciones químicas
- Cargas de viento - fuerzas y respuesta dinámica de estructuras
- Riegos de fuego y explosiones
- Ingeniería medioambiental - transporte de efluentes líquidos y gaseosos
- Ingeniería costera - cargas en estructuras costeras y "offshore"
- Hidráulica - redes de tuberías, depósitos, canales, presas, ...
- Oceanografía - corrientes oceánicas y maremotos
- Meteorología - predicción numérica del tiempo
- Ingeniería biomédica - flujo de la sangre en el corazón, venas y arterias
- Electrónica - refrigeración de circuitos

### 3.2.4. Discretización espacial

El primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional consiste en la discretización espacial del dominio para posteriormente calcular sobre el mismo la aproximación numérica de los flujos.

Existen muchos métodos para la discretización del problema. A grosso modo, se pueden clasificar los distintos esquemas de discretización en tres categorías principales: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Todos estos métodos requieren una previa discretización geométrica (espacial) para poder realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Básicamente, existen dos tipos de discretización o mallado [3]:

- Mallados estructurados: cada punto de la malla está inequívocamente identificado por los índices  $i, j, k$ , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2-D y hexaedros en 3-D.
- Mallados no estructurados: las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, las celdas o nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos de la malla, en este caso, son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2-D y tetraedros y hexaedros en 3-D.

El tipo de discretización espacial a emplear, depende del tipo de discretización de las ecuaciones empleado, así como de la estructura interna de datos empleados para resolver el flujo. El método de las diferencias finitas, que discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes en forma diferencial, requiere una malla estructurada de puntos en los que se guardan las variables de flujo. Por otro lado, en el método de los volúmenes finitos es necesario definir puntos de control en cada volumen generado. Precisamente es, en esos vértices donde se guardan las variables, que dependiendo del método que se emplee pueden ser definidos en el centro del elemento (cell-centred) o en los vértices (cell vertex) de las celdas. (ver Figura 3.2)

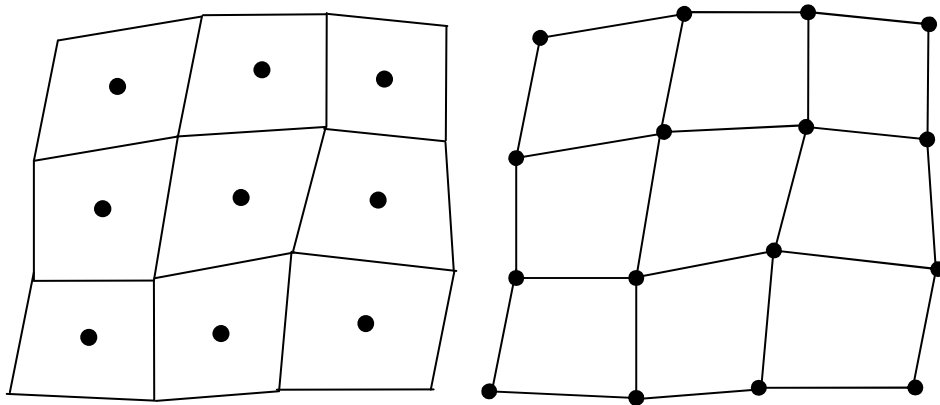


Figura 3.2: Mallas con nodos centrados en los elementos y centrados en los vértices.

#### 3.2.4.1. *Mallas estructuradas*

La principal ventaja de los mallados estructurados reside en la ordenación de los elementos en memoria, ya que de esta forma, el acceso a las celdas vecinas a una dada

resulta muy rápido y fácil, sin más que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Las mallas estructuradas pueden representarse en un sistema cartesiano o curvilíneo. En el primer caso, las líneas que configuran las celdas son siempre paralelas al sistema de ejes coordenados; por el contrario, en los sistemas curvilíneos, el sistema de coordenadas es deformado para adaptarse a la geometría del objeto de estudio.

Por otro lado, también pueden clasificarse en mallas ortogonales y mallas no ortogonales. Las mallas ortogonales son aquellas en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de  $90^\circ$ . Algunos flujos pueden considerarse como axisimétricos; en estos casos, las ecuaciones de flujo pueden ser expresadas en coordenadas polares, en vez de en coordenadas cartesianas.

#### 3.2.4.2. *Mallas no estructuradas*

El segundo tipo de mallas son los mallados no estructurados. Éstos ofrecen gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas. La principal ventaja de los mallados no estructurados reside en que los triángulos (2-D) o los tetraedros (3-D), se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. En la práctica, es necesario determinar unos parámetros adecuadamente para obtener una buena calidad de malla. El tiempo requerido por una computadora para generar un mallado no estructurado es mucho menor que el que requiere para uno estructurado.

Otra ventaja de este tipo de metodología es que la solución obtenida depende del refinamiento que se realice de la malla. Una desventaja de este tipo de mallado es el espacio que la malla ocupa en una computadora, es decir, requieren más memoria que los mallados estructurados.

#### 3.2.5. **Discretización de las ecuaciones**

El método de las diferencias finitas fue el primer método aplicado para obtener la solución numérica de unas ecuaciones diferenciales. La primera persona en emplearlo fue Euler (probablemente en 1768). Este método emplea el desarrollo en series de Taylor [3] para la discretización de las derivadas de las variables de flujo; por ejemplo, si se quiere calcular la derivada de una función escalar  $U(x)$  evaluada en un punto  $x_0$ , tenemos:

$$U(x_o + \Delta x) = U(x_o) + \Delta x \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x_o} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \Big|_{x_o} + \dots$$

con esto, se tiene que la primera derivada de  $U(x)$  puede aproximarse por:

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x_o} = \frac{U(x_o + \Delta x) - U(x_o)}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

Esta aproximación es de primer orden, porque el truncamiento del error es proporcional al término de mayor orden del resto de la serie.

Este mismo procedimiento se puede emplear para obtener aproximaciones más exactas del método de las diferencias finitas, sin más que aproximar con más términos de la serie de Taylor que se obtiene.

Una ventaja importante del método de las diferencias finitas es su simplicidad teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método sin más que aumentar el orden de aproximación de las derivadas.

Por otro lado, este método requiere una malla estructurada, con lo cual el campo de aplicación se ve reducido a algunos problemas, normalmente con geometrías sencillas. Además, este método no puede aplicarse directamente en coordenadas curvilíneas, teniéndose que transformar las ecuaciones de Navier-Stokes de curvilíneas a cartesianas para la resolución del problema.

Por este motivo, el método de las diferencias finitas sólo es aplicable en algunas geometrías sencillas.

El método de los volúmenes finitos emplea directamente las ecuaciones de conservación en su forma integral. Este método fue utilizado por primera vez McDonald [2] para la simulación de un problema 2-D no viscoso.

Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial. La integral de superficie que aparece en el término de la derecha de la ecuación de Navier-Stokes completa (en su

forma integral) es aproximada por la suma de los flujos que atraviesan cada una de caras del poliedro.

La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de las diferencias finitas.

Comparado con el método de las diferencias finitas, este método es muchísimo más flexible (puede implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas); por este motivo, el método de los volúmenes finitos es el más empleado para la resolución de flujos con geometrías complejas.

El método de los volúmenes finitos se basa en la discretización directa de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y de la energía. Esto nos lleva a otra característica importante de este método, que es la obtención de soluciones "débiles" de las ecuaciones. Sin embargo, en este caso, en las ecuaciones de Euler, es necesario añadir una ecuación más, llamada ecuación de la entropía.

Esta ecuación es necesaria porque no existe una única solución "débil". Es interesante resaltar que bajo unas ciertas condiciones, el método de los volúmenes finitos es equivalente al método de las diferencias finitas. Por todo esto, hoy en día, es el método más popular.

El método de los elementos finitos, introducido por Tuner et al. [4] en 1956, se empleó en principio, para el análisis estructural y fue diez años después cuando comenzó su utilización para la resolución de las ecuaciones de campo en medios continuos. Sin embargo, fue a principios de los 90 cuando el método de los volúmenes finitos adquirió una gran popularidad en la solución de las ecuaciones de Euler y de Navier-Stokes.

El método de los elementos finitos, como método general para la resolución de las ecuaciones de Euler/Navier-Stokes, comienza con una división del dominio en elementos triangulares (en 2-D) o tetraédricos (en 3-D), generando una malla no estructurada. Dependiendo del tipo de elemento y de la precisión que se quiera, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos. El número total de nodos multiplicado por el número de variables del problema es el número de grados de libertad del problema [5]

Además, tienen que definirse las llamadas funciones de forma que representan la variación de la solución en el interior de los elementos. En la práctica, se emplean normalmente funciones de forma lineales, que emplean únicamente los nodos pertenecientes a la malla. Las funciones de forma son distribuciones lineales de valor cero fuera del elemento correspondiente a la función. Esto da lugar, a una aproximación de segundo orden en la representación de los resultados.

Este método resulta muy atractivo por el uso de mallas no estructuradas (ampliamente empleadas para la formulación de problemas con geometrías complejas).

Además es empleado para el caso particular de fluidos no newtonianos. El método de los elementos finitos tiene una base matemática muy rígida, particularmente en problemas elípticos y parabólicos. Sin embargo, en ciertos casos, el método es matemáticamente equivalente al método de los volúmenes finitos, siendo el esfuerzo matemático mucho mayor. Esto explica porqué el método de los volúmenes finitos se ha hecho tan popular. Sin embargo, ambos métodos se combinan en ocasiones (normalmente en mallas estructuradas), como por ejemplo para el tratamiento de las condiciones de contorno y la discretización de los flujos viscosos.

### **3.2.6. Condiciones de contorno e iniciales**

Independientemente de la metodología empleada para resolver las ecuaciones de gobierno, se deben de especificar unas condiciones de contorno e iniciales.

Las condiciones iniciales determinan el estado de las variables fluidas en el instante  $t = 0$ , o en el primer paso de el esquema de integración. Es obvio pensar que cuanto más cercana sea la condición inicial a la solución final del problema, menor será el tiempo necesario empleado para la convergencia.

Además se reduce la posibilidad de que el problema se vuelva inestable y se llegue a la convergencia de la solución. Una práctica general en aerodinámica es imponer como valores iniciales las condiciones de flujo libre en velocidad, presión, densidad y temperatura.

En toda simulación numérica, se considera una parte del dominio fluido para la resolución de las ecuaciones. Esto da lugar a un contorno artificial donde el valor de las

variables fluidas tienen que ser especificados a través de lo que se conoce como condiciones de contorno (ver figura 3.3). En general, las condiciones de contorno se pueden clasificar en:

*Condiciones de contorno de flujo libre:* pueden ser de entrada, de salida o entrada/salida. Las condiciones de contorno de entrada de flujo se especifican mediante las condiciones en el infinito ( $\rho^\infty$ ,  $\mu^\infty$ ,  $u^\infty$ ,  $v^\infty$ ,  $w^\infty$ ,  $p^\infty$ ,  $T^\infty$ ). [5]

*Condiciones de contorno de pared:* modelan el comportamiento del flujo en las proximidades de la superficie. Se puede imponer una condición de contorno de no deslizamiento (velocidad nula en el punto de contacto,  $u = 0$ ), o de tangencia (velocidad normal a la superficie igual a cero).

### 3.3. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

Las aplicaciones informáticas, como las desarrolladas en el apartado anterior, concentran las principales etapas del desarrollo de nuevos modelos y procesos en la industria de la fabricación de componentes plásticos.

En el presente documento se pretende mostrar los principales aspectos de la optimización y desarrollo del proceso de rotomoldeo, teniendo como base fundamental el uso de la dinámica de fluidos computacional. Esta tecnología se ha utilizado mediante el uso específico del software comercial EFD.LAB 8.1 de los desarrolladores NIKA GMBH. Este software integra como herramienta de modelado CAD la potente aplicación SolidWorks de Dassault Systèmes que permite el desarrollo de las geometrías reales de los modelos a simular.

Todos los procesos informáticos se han desarrollado en varias unidades de procesamiento, principalmente en ordenadores con procesadores Intel Pentium M a 1,60 GHz y superiores, memorias RAM superiores a los 512 MB y sistemas operativos Windows XP.



### 3.4. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

El proceso de desarrollo y optimización de los moldes y procesos de rotomoldeo, basados en las tecnologías de CFD, disponen de una metodología concreta como se muestra a continuación:

1. Inicialmente se establecen los últimos modelos desarrollados por la industria del rotomoldeo, estudiando sus características técnicas, concretamente de los procesos de calentamiento por aceite, los cuales permiten un ahorro energético muy considerable respecto a los de calentamiento por aire.
2. Dichos modelos se caracterizan y se modelan informáticamente, estableciendo las mismas condiciones reales, permitiendo generar el proceso de forma virtual y obtener los parámetros necesarios del proceso.
3. Caracterizado virtualmente el proceso de calentamiento convencional por aceite, se desarrolla un nuevo modelo de calentamiento optimizado, que permita obtener mayores prestaciones. Mediante su modelado virtual y simulación es posible la obtención de los parámetros del proceso del nuevo modelo.
4. Tras la obtención de resultados de los diferentes modelos, se inicia el proceso de análisis comparativo, estableciendo las ventajas e inconvenientes de los modelos comparados, permitiendo conocer los elementos que permiten un avance en la técnica del rotomoldeo.
5. A través de los resultados obtenidos y el análisis comparativo, a modo de retroalimentación, se desarrollan nuevos modelos virtuales con nuevas mejoras y configuraciones, que tras su posterior simulación permitirán obtener nuevos resultados y comparativas respecto a los modelos convencionales hasta alcanzar los resultados deseados.
6. Tras la obtención de modelos óptimos para el rotomoldeo se establecen los elementos anexos necesarios para su fabricación y acople real en una máquina de rotomoldeo, permitiendo obtener un molde optimizado de aplicación real.

Este resumen de fases de desarrollo de un nuevo molde de rotomoldeo puede esquematizarse según el siguiente diagrama:

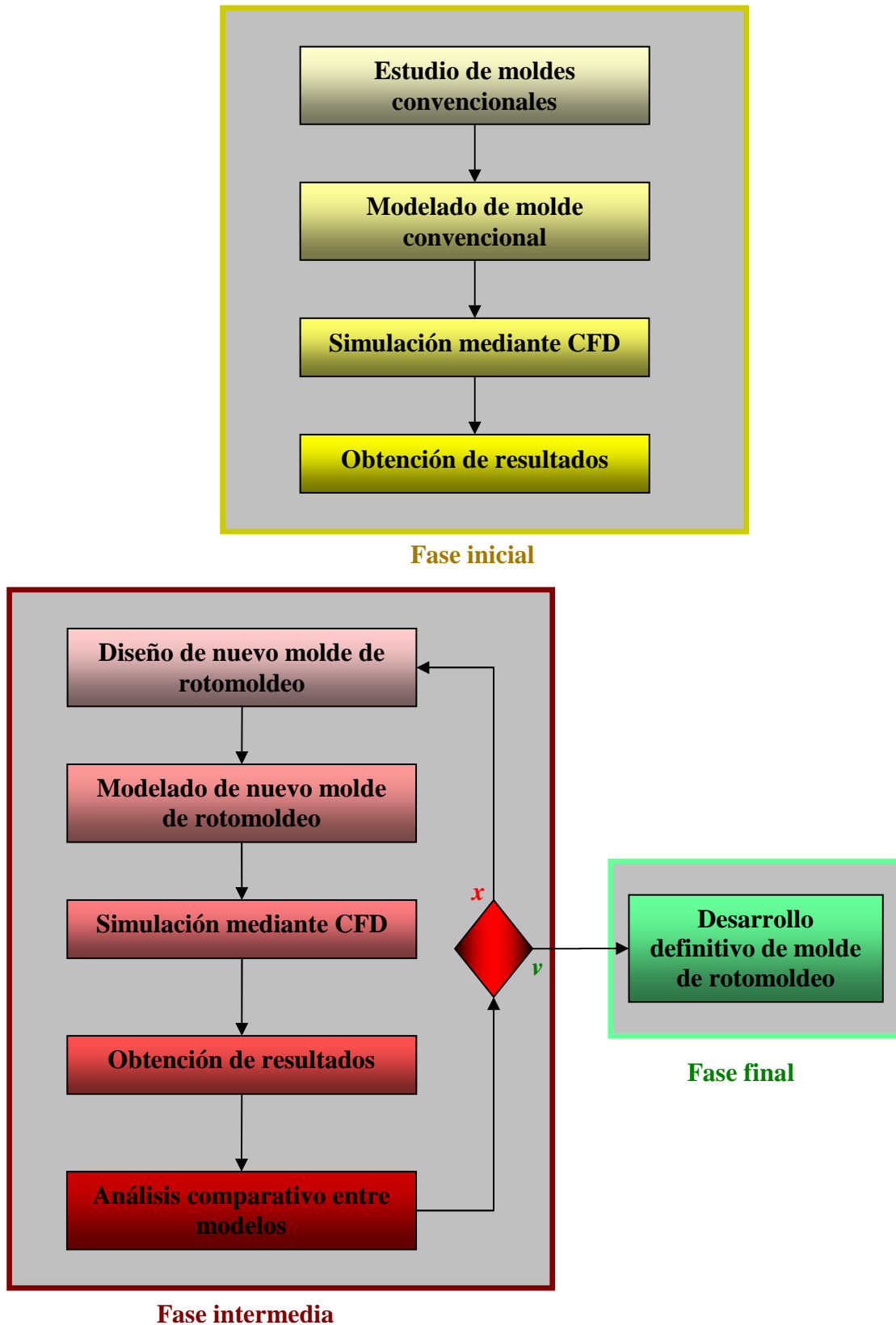


Figura 3.3: Diagrama retroalimentado de metodología de diseño y cálculo.

### **3.5. PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS DE MOLDES Y PROCESOS DE ROTOMOLDEO CONVENCIONALES**

#### **3.5.1. Parámetros principales del proceso de rotomoldeo**

Todos los procesos de rotomoldeo pueden caracterizarse a partir de un conjunto de parámetros, de los cuales se presentan los de mayor relevancia:

- Temperatura de calentamiento: identifica la temperatura, en valores generalmente medios, del fluido térmico, ya sea aire o aceite, que transfiere la energía térmica al molde, y consecuentemente, al material plástico final.
- Temperatura de aire en el interior del molde: Corresponde a la temperatura que alcanza el aire del interior del molde, siendo uno de los principales parámetros que identifican el proceso, permitiendo su regulación y control.
- Temperatura de molde: También resulta de interés el conocimiento de la temperatura del molde, el cual mediante conducción transmite la energía térmica al material plástico.
- Temperatura de enfriamiento: Adquiere importancia en las etapas finales de los procesos de rotomoldeo, permitiendo un control en los procesos de enfriamiento.
- Caudal de flujo forzado: Caracteriza el proceso de transferencia térmica, siendo una variable de gran importancia y de control del proceso, ya sea del flujo de aire o aceite térmico.
- Uniformidad térmica: Este parámetro, que puede establecerse de diferentes formas, permite valorar las diferencias de temperaturas de diferentes partes del molde caracterizando la homogeneidad de los procesos de transferencia térmica.
- Tiempo de ciclo: Identifica la duración del proceso de fabricación de una o varias piezas, así como la temporización de las diferentes etapas del proceso, y permite la valoración de gastos energéticos asociados al proceso.
- Consumo energético: aporta los datos energéticos de gasto y consumo, principalmente de los elementos electromecánicos y las materias primas necesarias para la producción de alta temperatura.

Si bien existe una gran variedad de parámetros relativos a las condiciones del flujo, parámetros térmicos, propiedades del material polimérico en sus diferentes fases de estado, calidades y prestaciones de las piezas generadas, entre otros, nuestro estudio se centra en las condiciones principales de calentamiento - enfriamiento, reducción de ciclo, uniformidad térmica y eficiencia energética, desplazando a un segundo plano, o a futuras líneas de investigación, el estudio del resto de parámetros que permitirían caracterizar por completo el complejo proceso de rotomoldeo.

### **3.5.2. Parámetros principales de moldes de rotomoldeo**

Los moldes de rotomoldeo a su vez disponen de una serie de parámetros que los caracterizan:

- **Espesor:** Se trata de una de los principales condicionantes del molde. El espesor condiciona la transferencia térmica del proceso, además de la rigidez y resistencia mecánica del molde.
- **Dimensiones exteriores:** Otro aspecto fundamental para todo el ciclo de proceso son las dimensiones principales del molde, las cuales generan una superficie y un volumen interior de aire que altera por completo la velocidad de calentamiento - enfriamiento y el tiempo de ciclo.
- **Canales de flujo:** En los moldes de calentamiento por aceite el volumen de aceite circulante exterior es un parámetro de relevancia, unido con la velocidad de circulación del fluido y la rugosidad de los canales.
- **Material:** Desde el punto de vista térmico adquiere vital importancia la elección del material del molde. Su calor específico o la conductividad térmica influyen significativamente en el proceso de rotomoldeo. Si bien el aluminio es el principal material utilizado en la fabricación de moldes, las nuevas tecnologías de fabricación incorporan al rotomoldeo moldes de materiales no convencionales que aún no disponiendo de las mismas capacidades de transmisión de calor del aluminio, permiten otras mejoras importantes.

### **3.5.3. Moldes de calentamiento por convección mediante circulación forzada de aire en hornos**

La mayoría de los procesos de rotomoldeo actuales se basan en la convección para el calentamiento y enfriamiento de los moldes de moldeo rotacional. Así pues, los hornos

son los elementos calefactores más generalizados, que mediante quemadores de gas natural o fuel-oil permiten obtener elevadas temperaturas. La circulación de grandes cantidades de aire a través de dichos elementos de calentamiento producen un proceso convectivo apropiado en el interior del molde. [6]



Figura 3.4: Horno de rotomoldeo de calentamiento por aire. Reduction Engineering, Inc.

Debido a que se trata de un proceso de convección, dichos moldes deben estar totalmente expuestos al aire forzado de calentamiento y/o enfriamiento del horno, por lo que deben ser mecánicamente estables y resistentes para su sustentación y movimiento interno en el horno. Dichos moldes disponen, en función de sus medidas exteriores, de espesores comprendidos entre 5 y 15 mm en los mejores casos, siendo superiores en ocasiones incluso a los 50 mm.

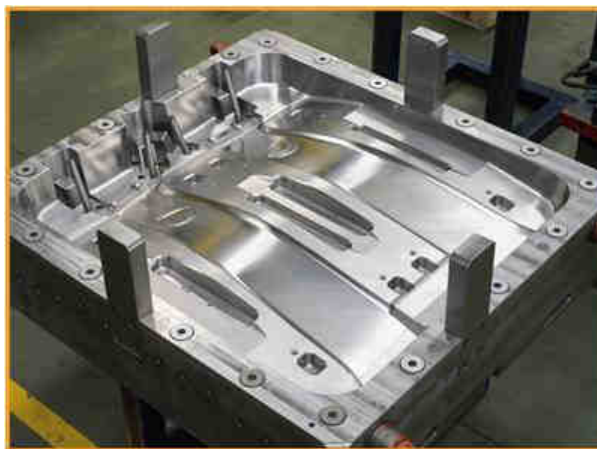


Figura 3.5: Molde de moldeo rotacional fabricado en aluminio. Versaplast.

Estos hornos se caracterizan por poseer unas dimensiones elevadas, al diseñarse para la fabricación de piezas dentro de un rango de medidas determinadas, de forma que los hornos, de forma aproximadamente cúbica, pueden disponer desde 1 m de lado hasta dimensiones superiores a 7 m en máquinas de gran volumen. [7] Por tanto, se requiere de grandes elementos de calentamiento y de generación de flujos forzados de aire que permitan mantener temperaturas en el interior del horno desde 200 hasta 450 °C, supliendo además las elevadas pérdidas térmicas que se producen tanto por los inevitables huecos del horno como por los procesos conductivos de las paredes del horno, conducciones, brazos de soporte de moldes, utillajes, etc.

Los modelos de máquinas de carrusel de pequeño tamaño, para la fabricación de piezas de hasta 1,5 m<sup>3</sup>, pueden requerir aportes caloríficos entre 200.000 y 2.257.000 kJ/h, consumos de gas propano licuado de entre 50 y 90 l/h, entre 30 y 60 m<sup>3</sup>/h de gas natural o de 25 a 50 l/h de fuel oil, para temperaturas de horno entre 250 °C y 450°C. A todo este elevado consumo energético debe añadirse flujos de aire de hasta 400 m<sup>3</sup>/min., aportados mediante grandes soplantes de potencia superiores a 7 kW, que unidas al resto de unidades motoras y elementos accesorios producen consumos entre 30 y 60 A para tensiones de 400 V. [7]

Estos datos permiten justificar las necesidades de desarrollo de nuevos procesos de rotomoldeo más eficientes que reduzcan drásticamente los costes energéticos y medioambientales de dichos procesos, mejorando la productividad y competitividad con otros procesos de fabricación más eficientes.

#### **3.5.4. Moldes de calentamiento por conducción mediante aceite térmico en circulación forzada**

Los procesos de calentamientos mediante hornos son los más tradicionales y generalizados y los avances en moldeo rotacional se han centrado en la automatización de estos procesos y en la mejora de las prestaciones de las piezas generadas. Sin embargo, y aunque muy reducidas, también existen líneas de desarrollo, promovidas generalmente por fabricantes de maquinaria del rotomoldeo, que han optimizado el proceso sobre todo desde el punto de vista energético mediante el uso del aceite como fluido térmico.

Actualmente se encuentran desarrollados procesos de rotomoldeo de calentamiento y enfriamiento por aceite, generalmente aceites térmicos sintéticos, que si bien requieren

procesos de calentamiento del propio aceite similares a los hornos, tales como quemadores de gas o fuel-oil, permiten aumentar en gran medida la eficiencia energética de los procesos de rotomoldeo.

Los moldes actualmente existentes de calentamiento por aceite, a partir de ahora moldes convencionales de aceite, disponen de ciertas similitudes respecto a los procesos de calentamiento por horno: los moldes mantienen el aluminio como principal material constitutivo, alcanzan espesores similares entre y las temperaturas, en función del material plástico a conformar, se sitúan en valores también similares.

Sin embargo el proceso de transferencia térmica, igualmente de naturaleza convectiva, es llevado a cabo por aceite térmico, recorriendo el molde por canales o pequeñas tuberías exteriores adosadas al mismo. Esto permite desarrollar una transferencia térmica muy superior entre el aceite y el metal, respecto al calentamiento mediante aire forzado en horno.

Estos procesos requieren de elementos que produzcan el calentamiento y enfriamiento del aceite, su circulación forzada, movimientos de rotación del molde, y otros procesos que de manera análoga se requerían en los procesos de convección por aire en hornos. Sin embargo la eficiencia energética del proceso se encuentra mejorada, en comparación con los procesos de calentamiento por aire en hornos, donde sólo el 1% de la energía suministrada alcanza al polímero. [8]

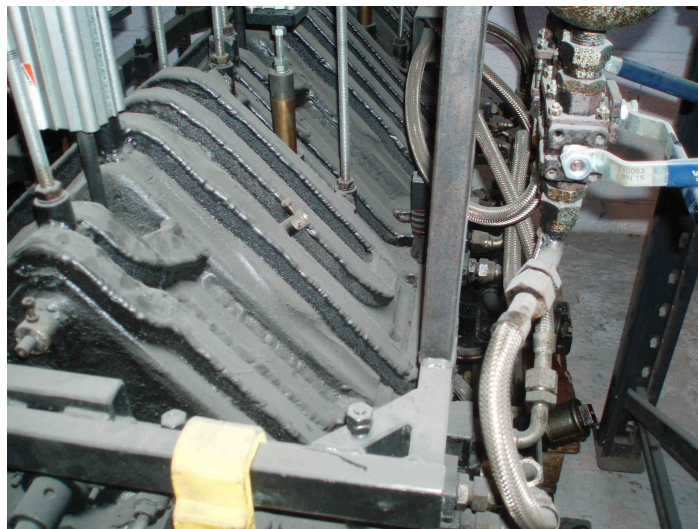


Figura 3.6: Molde de rotomoldeo de calentamiento por canales exteriores de aceite. Cortesía de Rototech.

A pesar de las grandes mejoras que aportan estos procesos de calentamiento por aceite, determinados parámetros del proceso son inferiores a los obtenidos en hornos, como puede ser la uniformidad del calentamiento en el molde. Debido a que los hornos producen un calor envolvente al horno, la homogeneidad del calentamiento es superior que la generada mediante canales de aceite, siendo dicho factor un objetivo a conseguir en los nuevos desarrollos de moldes

**3.5.5. Ventajas e inconveniente de los procesos de rotomoldeo mediante convección forzada por aire y por aceite térmico**

Los procesos descritos en los apartados anteriores disponen de importantes diferencias en cuanto a la transferencia térmica, sin embargo, ambos procesos tienen importantes condicionantes, así como ventajas e inconvenientes, siendo conveniente la aclaración para un mayor entendimiento de ambos procesos:

| <b>Convección por aire en hornos</b>  |   |
|---|---|
| <b>Ventajas</b>   | <b>Inconvenientes</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ No requiere de un fluido especial, con lo que no hay costes por dicho elemento.</li> <li>➤ Sistema más limpio y fiable en cuanto al fluido térmico.</li> <li>➤ La uniformidad del calentamiento en las diferentes caras del molde es muy elevada.</li> <li>➤ Requiere un utillaje simple y de fácil manipulación.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Consumo energético muy elevado, dada la ineficiencia del proceso, sobre todo por pérdidas térmicas.</li> <li>➤ Los moldes deben ser resistentes, con espesores generalmente superiores a los 5 mm.</li> <li>➤ Los moldes deben ser mecanizados mediante técnicas convencionales.</li> <li>➤ Existen limitaciones para rotomoldear piezas complejas.</li> </ul> |



| <b>Convección por aceite térmico en canales</b>   |  |
|---|--|
| <b>Ventajas</b>   | <b>Inconvenientes</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Menor tiempo de ciclos a igualdad de condiciones de flujo, temperatura y geometrías del molde.</li> <li>➤ Consumo energético muy inferior a los procesos de calentamiento por aire.</li> <li>➤ Debido a su buena eficiencia térmica pueden reducirse las temperaturas del proceso.</li> <li>➤ Posibilidad de fabricación de piezas complejas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La manipulación de aceite requiere de problemáticas juntas rotativas, conexiones y accesorios complejos.</li> <li>➤ Menor uniformidad al no abarcar los canales toda la superficie del molde.</li> <li>➤ Los moldes deben ser resistentes, con espesores generalmente superiores a los 5 mm.</li> <li>➤ Los moldes deben ser mecanizados mediante técnicas convencionales.</li> </ul> |

### **3.6. ANÁLISIS DE MOLDE DE ROTOMOLDEO DE ACEITE CONVENCIONAL**

#### **3.6.1. Modelado de molde de rotomoldeo convencional de aceite**

El uso de moldes y procesos de rotomoldeo mediante calentamiento por aire en hornos se encuentra ampliamente extendido por los fabricantes y desarrolladores del sector. La innovación en estos campos parece estancada en la automatización de los procesos, en la mejora de los acabados de las piezas y en la incorporación de nuevos materiales al proceso productivo. Sin embargo, reducidas son las innovaciones realizadas en los propios procesos de calentamiento, como los realizados mediante aceite a través de canales exteriores al molde, los cuales pueden considerarse como los más modernos en cuanto a fluidos térmicos de calentamiento y enfriamiento. A pesar de ello, existen grandes posibilidades de mejora y optimización, siendo éstas tecnologías por aceite la base de partida del presente estudio de investigación.

Actualmente son reducidos los investigadores y profesionales involucrados en el desarrollo de los moldes y máquinas de moldeo rotacional por calentamiento mediante aceite, y más aún los fabricantes a nivel industrial de este tipo maquinaria de rotomoldeo, por lo que no se dispone prácticamente de información de estos novedosos procesos.

Para el inicio de la optimización y rediseño de los moldes de rotomoldeo de aceite convencionales existentes, se ha modelado mediante herramientas CAD un molde cúbico estándar de rotomoldeo, de lado interior útil de 100 mm. Se ha establecido un espesor de 5 mm en toda su geometría, y el material de diseño es aluminio. Dicho molde se ha establecido con unos canales exteriores de sección cuadrada, 20 mm de lado interior, paredes de 5 mm de espesor, y de una configuración geométrica como puede observarse en la figura 3.7.

Este modelo básico, incorpora 4 aberturas de 10 mm de diámetro en una de las caras del mismo, para la entrada de aceite térmico en el interior de los canales. De igual forma pero en la cara opuesta se han dispuesto otras 4 aberturas de similares dimensiones para la salida del flujo de aceite.

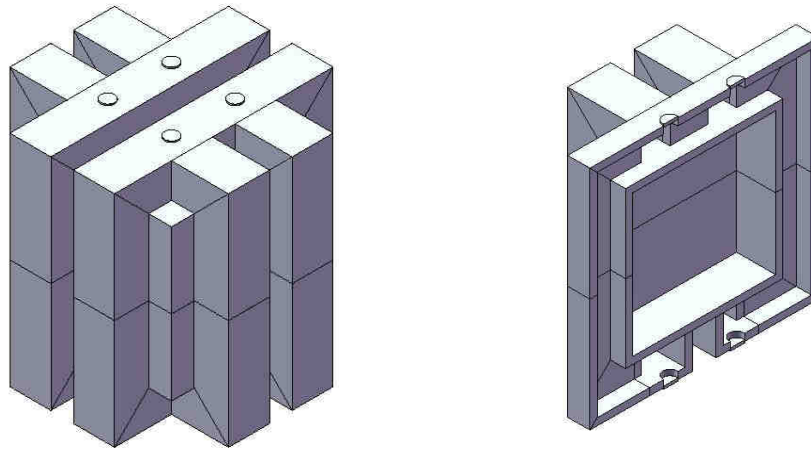


Figura 3.7: Modelo básico de molde de rotomoldeo de canales exteriores de aceite.

Este modelo básico ha sido objeto de estudio y simulación mediante las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional, sirviendo de base comparativa para los diseños que se han desarrollado.

### 3.6.2. Proceso de simulación numérica

Tras el modelado 3D mediante herramientas CAD del molde convencional de aceite, se procede a la simulación numérica mediante el software EFD.LAB 8.1 estableciéndose las siguientes etapas y condiciones de simulación:

### 3.6.2.1. *Preproceso de simulación*

#### 3.6.2.1.1. Configuración general

Se establecen las condiciones generales y básicas del proceso físico objeto de estudio, según los siguientes parámetros:

- Tipo de análisis: análisis interno (procesos físicos interiores al dominio computacional)
- Procesos físicos: Se establecen el estudio de los procesos de conducción térmica entre los posibles sólidos del modelo y la convección térmica entre los diferentes fluidos y sólidos. Asimismo se establece el estudio como dependiente del tiempo, es decir, transitorio.

Una de las principales limitaciones de las herramientas informáticas utilizadas es la imposibilidad del estudio del comportamiento del material plástico en el interior del molde, lo cual influye significativamente en el proceso. Debido a ello, todos los análisis serán en condiciones de vacío, que de cualquier modo serán validos para el estudio que se pretende realizar.

Es posible incorporar al análisis matemático que realiza el software los efectos gravitacionales y de movimientos de rotación que realmente se encuentran en el proceso de rotomoldeo, sin embargo, al no realizar análisis con material en el interior del molde, la simulación de dichos procesos físicos tienen un impacto muy poco significativo en los resultados, evitándose pues su uso, que además requiere de un coste en tiempo computacional considerable.

- Fluidos: Se establecen dos fluidos principales en el proceso. El aire como elemento interior de las cavidades del molde, y el aceite térmico, como fluido térmico de calentamiento y enfriamiento. En dicha fase se establecen las características de dichos fluidos, de los que se exponen en resumen los principales parámetros del aceite térmico estándar seleccionado [9]:

- Densidad: 870 kg/m<sup>3</sup>
- Calor específico: 1,972 kJ/(kg K)
- Conductividad térmica: 0,17 W/(m K)
- Coeficiente de consistencia: Según figura 3.8

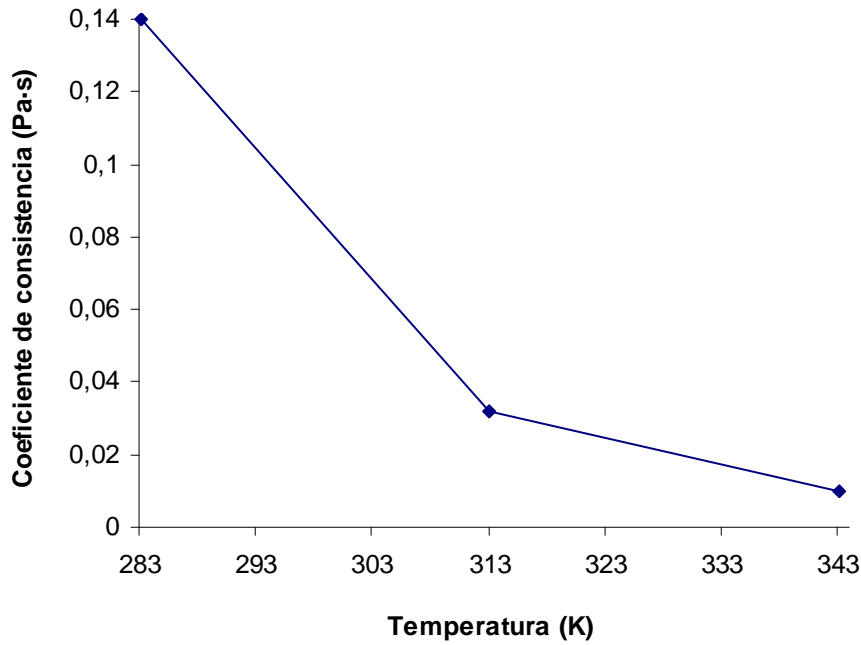


Figura 3.8: Distribución del coeficiente de consistencia del aceite térmico en función de su temperatura.

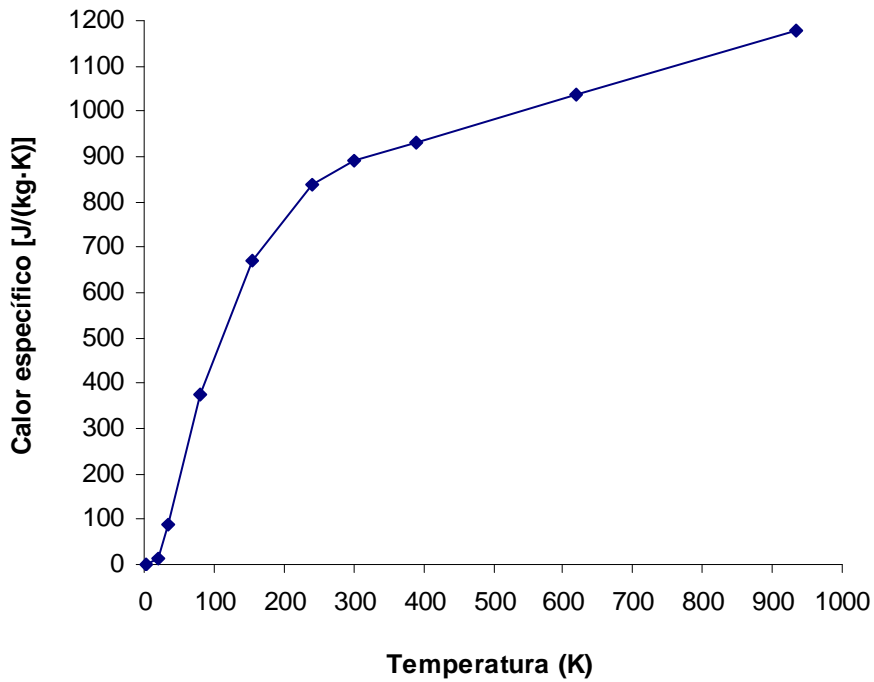


Figura 3.9: Distribución del calor específico del aluminio en función de su temperatura.

- Tipo de flujo: Se establecen condiciones de flujo laminar para la simplificación del modelo sin considerar posibles flujos turbulentos.
- Sólidos: Se determina los materiales de los elementos que conforman el modelo a simular. En este caso se establece como único material de elementos sólidos el aluminio, con las siguientes propiedades [9]:

- Densidad: 2688,9 kg/m<sup>3</sup>
- Calor específico: Según figura 3.9
- Conductividad térmica: Según figura 3.10

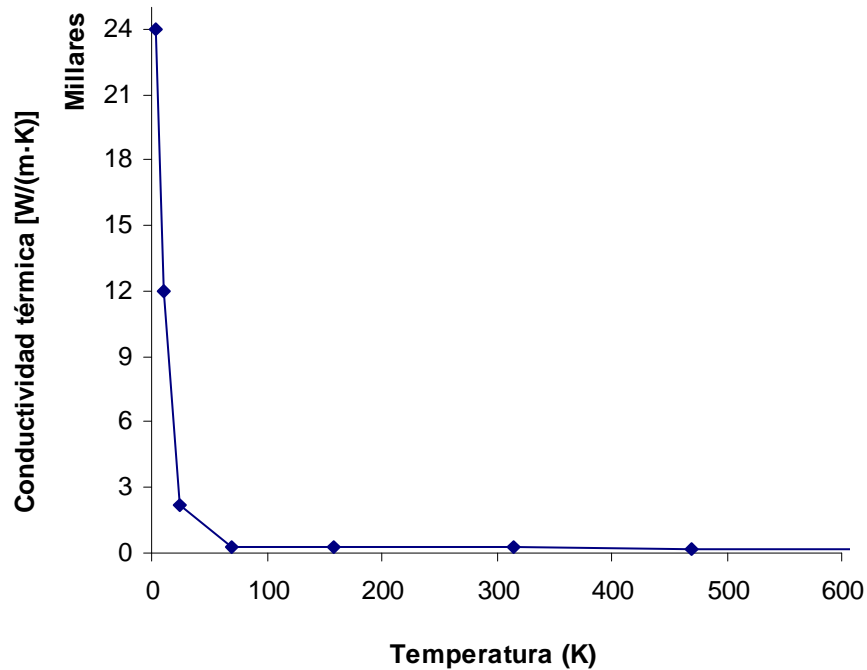


Figura 3.10: Distribución de la conductividad térmica del aluminio en función de su temperatura.

- Condiciones externas: Debido al desconocimiento inicial de las condiciones de transferencia térmica con el exterior, se establecen las paredes exteriores del molde como adiabáticas, no permitiendo la transferencia térmica hacia el exterior, así como una rugosidad estándar de los elementos sólidos de 50 micrómetros.
- Condiciones iniciales: Finalmente se encuentran las condiciones iniciales del molde, tanto en presiones como en temperaturas. Para ello, se consideran la presión ambiental de 1 atm. La temperatura requiere de un análisis más detallado, pues en el inicio del proceso de rotomoldeo la temperatura del molde y de los fluidos interiores no corresponderán a la temperatura ambiental, sino a la temperatura alcanzada en el proceso de enfriamiento del ciclo previo, al considerar el estudio de un proceso de moldeo rotacional lo más real posible. Por tanto, para cada proceso de rotomoldeo simulado, deberá establecerse la temperatura inicial del molde como aquella alcanzada en el proceso de enfriamiento.

### 3.6.2.1.2. Subdominios de fluidos

Tras la introducción de los parámetros generales del estudio, deben comenzarse con los parámetros específicos del mismo. En los moldes de calentamiento mediante aceite térmico intervienen dos fluidos: el propio aceite térmico y el aire interior del molde. Estos dos fluidos, separados físicamente por las paredes exteriores de la cavidad interior del molde y sin posibilidad de comunicación, deben establecerse geométricamente como subdominios de flujo, permitiendo diferenciar en los procesos de cálculos las propiedades de ambos y su interacción en el proceso. Por tanto, todas las superficies interiores de los canales del molde de aceite conformarán el subdominio de aceite térmico, mientras que las paredes interiores del molde conformarán el subdominio de aire.

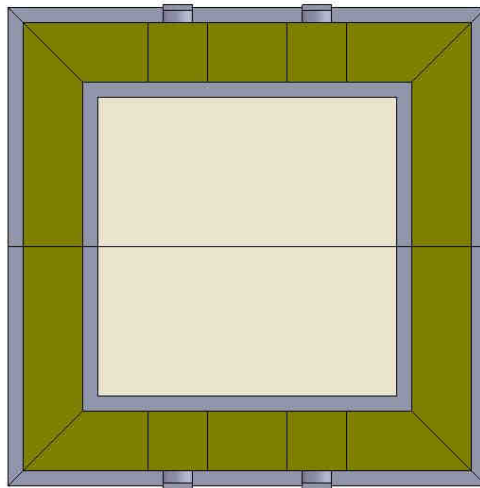


Figura 3.11: Imagen de subdominios de aceite (marrón) y aire (malva) en el interior del molde.

En esta sección es posible establecer para cada dominio una situación de flujo, laminar o turbulento, y las condiciones de presión y temperatura. En ambos casos coincidirán con los establecidos en la configuración general.

### 3.6.2.1.3. Materiales sólidos

Con el aluminio como único material de componentes sólidos, en este apartado se incorporan las propiedades de dicho material a todos los componentes del molde.

Como se explicaba con anterioridad en los procesos de modelado y simulación realizados no se incorporan los procesos de transformación del material plástico debido a que el software de cálculo no permite el estudio de dicho proceso, dada la complejidad de

la transformación de material en polvo en material sólido. Este estudio es posible realizarlo en otros softwares específicos, pero que a su vez no implementan los estudios que sí son posibles realizar con el software aquí utilizado.

Asimismo, es de importancia realzar que el presente estudio de investigación pretende desarrollar moldes de rotomoldeo desde el punto de vista de su eficiencia térmica, tiempo de ciclo y uniformidad, principalmente, no siendo objeto de estudio los propios procesos de la transformación del material, los cuales afectarían de manera similar a todos los modelos simulados, en igualdad de condiciones de proceso.

#### 3.6.2.1.4. Condiciones de contorno

Por tales condiciones se entienden aquellas que definen el comportamiento del modelo en sus límites. De esta forma, se establecen los principales elementos de interacción con el molde, tales como los flujos de fluidos, temperaturas y presiones, principalmente.

Al igual que en los procesos reales se establecen dos principales elementos de contorno: las superficies de entrada y de salida del fluido térmico. Las demás superficies se encuentran definidas por las condiciones generales, al disponerse las paredes exteriores como adiabáticas y con temperaturas iniciales.

A continuación se exponen las condiciones de superficies de entrada:

- Zonas de entrada de fluido: 4 aberturas circulares de 10 mm de diámetro
- Flujo volumétrico de aceite de entrada: 0,06 l/s
- Temperatura de entrada: corresponde a un ciclo estándar básico según se muestra a continuación:

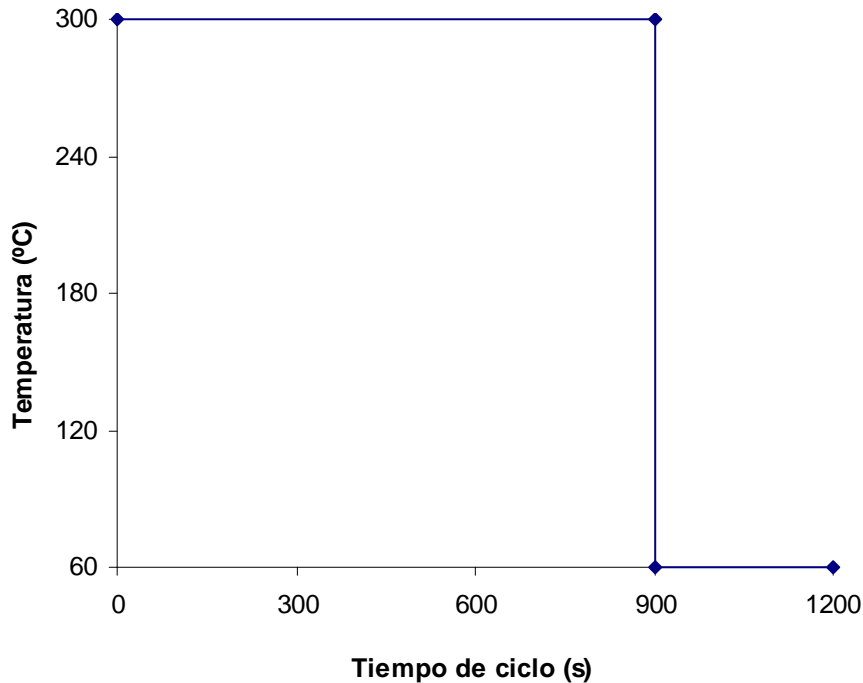


Figura 3.12: Distribución de temperaturas del flujo de entrada de aceite durante el ciclo.

La temperatura máxima de calentamiento corresponde a 300 °C, en un ciclo de calentamiento de 15 minutos, para posteriormente producir un enfriamiento continuado a 60°C durante 5 minutos.

- Presión de entrada: Si bien el software recalcula las condiciones de presión según las características del flujo, se establece una condición de presión a la entrada de 1,2 atm, no siendo una condición de contorno fija, sino inicial, posteriormente recalculada en función de la pérdida de carga que en el interior de los canales de circulación del aceite se produzca.

En cuanto a las condiciones de superficies de salida:

- Zonas de salida de fluido: De forma análoga a las zonas de entrada se disponen de 4 aberturas circulares de 10 mm de diámetro en la cara opuesta del molde, para la salida del fluido.
- Presión de salida: Se establece una presión estática de 1 atm.

Con el establecimiento de estas condiciones de contorno, el proceso de simulación se encuentra totalmente definido en cuanto a los parámetros físicos que intervienen en el mismo. El análisis computerizado, partiendo de las condiciones establecidas marcadas como estables, permitirá obtener la configuración completa de distribución de temperaturas,



presiones, flujos hidráulicos, transferencias térmicas, y otros parámetros según en el interior del molde tanto para los elementos sólidos como para los fluidos.

#### 3.6.2.1.5. Establecimiento de objetivos

Las posibilidades de resultados u objetivos a obtener en los procesos de simulación son extensos y ampliamente configurables.

Los principales resultados que se esperan obtener y que se han determinado en el modelo son los siguientes:

- Temperatura media de entrada de aceite. Permite obtener el valor medio de la temperatura de entrada el aceite, establecida como condición de contorno y promediada entre todas las superficies de entrada de flujo. Permite validar y verificar dicha condición.
- Temperatura central de aire. Mediante la creación de un punto de medida de temperatura en el centro de la cavidad interior del molde se obtiene la temperatura de dicho punto durante todo el ciclo de proceso.
- Temperatura central de cara de entrada. Se establece un punto central, en el interior de la cara del molde donde, se ubica la entrada de fluido. Permite conocer la velocidad de calentamiento de dicha cara del molde.
- Temperatura central de cara de salida. Idem. anterior en cara de salida del flujo de aceite.
- Temperatura central de cara lateral. Idem. anterior en cara lateral del molde.
- Flujo volumétrico de entrada. Corresponde al caudal en las aberturas de entrada. Permite validar y verificar la condición de contorno establecida.
- Flujo volumétrico de salida. Idem. anterior en aberturas de salida.

Además de los objetivos puntuales establecidos, durante y tras el proceso de simulación es posible obtener la distribución completa o el valor puntual de un parámetro determinado en cualquier parte del molde, desde temperaturas, velocidades, flujos caloríficos, etc. Por tanto, tras el proceso de simulación se extraerán diferentes conjuntos de datos, mediante la selección de superficies, planos de sección, flujos de trayectorias, distribuciones tridimensionales, isosuperficies o puntos de parámetros. Todos estos procedimientos corresponden a la obtención de resultados en la etapa de postproceso de simulación.

## 3.6.2.1.6. Discretización del modelo

Un aspecto relevante en la precisión de cálculo y de los posteriores resultados a obtener es la discretización o mallado del modelo objeto de simulación. Cualquiera de los métodos de cálculo de forma diferencial requiere de una discretización de dominio computacional, con el fin de aplicar el conjunto de ecuaciones, datos y variables a cada parte diferencial del modelo.

La principal característica del mallado es el tamaño de los elementos mínimos que dividen el dominio computacional, denominado celda, de forma que a menor tamaño de celda, mayor precisión de cálculo. Sin embargo también se produce un efecto de incremento del coste computacional, influyendo en un aumento en la duración del proceso de cálculo.

En todos los procesos de simulación llevados a cabo se ha establecido una discretización básica inicial con celda de forma cúbica, de 11 mm de lado, disponiendo un total de 2.744 celdas. Posteriormente, el software optimiza mediante un refinamiento del mallado en función de la configuración del modelo, disponiendo de un mallado final de 50.344 celdas, lo que supone una discretización con celda cúbica de 4,33 mm de lado.

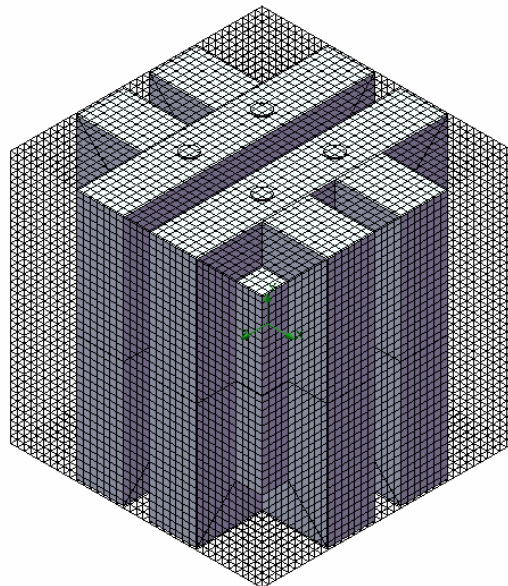


Figura 3.13: Representación del mallado realizado sobre el molde de canales exteriores de aceite.

#### 3.6.2.1.7. Opciones de control de cálculo

El proceso de cálculo puede ser configurado según diferentes parámetros en función del estudio a realizar.

Duración y criterio de finalización de cálculo: Se han establecido los parámetros básicos de cálculo, siendo la principal opción de control el tiempo de simulación máximo de 1200 s. Se han desactivado las funciones de finalización de cálculo por criterios de cumplimiento de objetivos al considerarse un proceso de cálculo transitorio durante el intervalo establecido.

Almacenamiento de datos: Posteriormente se selecciona la opción de guardado de datos en intervalos de 30 s. Esta opción permite almacenar todos los resultados parciales obtenidos cada 30 s durante todo el proceso de cálculo, permitiendo una vez finalizado las simulaciones, rescatar todos los parámetros del molde en el momento del proceso deseado, siempre en intervalos de igual tamaño que la selección realizada.

Tiempo de paso de cálculo: Finalmente debe introducirse el paso de tiempo de cálculo. Este parámetro será considerado como inicial, pues el software recalculará dicho paso computacional a las condiciones de máxima precisión de resultado. Se establece un paso inicial de 1 segundo que posteriormente se autoadaptará a valores inferiores a 0,1 segundos para mayor precisión.

#### 3.6.2.2. *Procesos de simulación*

##### 3.6.2.2.1. Resolución

Definidos todos los parámetros y condiciones del modelo, se procede a la resolución analítica computerizada de los procesos físicos caracterizados.

En el proceso de resolución se suceden las etapas de mallado básico, refinamiento de mallado, mallado definitivo, regeneración de volumen sólidos y fluidos, establecimiento de condiciones iniciales, condiciones de contorno, y finalmente, el proceso de cálculo.

Dependiendo de la complejidad de los modelos y de las condiciones establecidas, los procesos de cálculo pueden durar desde pocos minutos hasta varias horas. La duración media del procesado computacional ha sido de 22 minutos por simulación.

### 3.6.2.3. *Postproceso de simulación*

#### 3.6.2.3.1. Obtención de resultados

Una vez finalizado el proceso de cálculo, se obtienen todos los resultados establecidos como objetivos. Dichos resultados son extraídos en formato de hoja de cálculo permitiendo el posterior tratamiento de datos.

##### 3.6.2.3.1.1. Uniformidad térmica

No se dispone de ningún parámetro específico que defina de forma global o parcial la uniformidad del proceso de calentamiento de forma que pueda conocerse de forma comparativa el grado de disparidad de calentamiento entre diferentes partes del molde. Es por ello, que a partir de los resultados obtenidos, se define un coeficiente de variación de la uniformidad térmica, para el conjunto de caras del molde objeto de calentamiento.

Este coeficiente se ha obtenido seleccionando 25 puntos distribuidos uniformemente en cada cara del molde donde se produzca la transferencia térmica. En este caso, todas las caras son consideradas partes activas del molde, por lo que se obtiene un conjunto de 150 puntos.

Se establece un tiempo de almacenamiento de datos de 30 s, durante el proceso de cálculo, de forma que cada intervalo de 30 s se dispondrá de un valor de temperatura de molde en cada uno de los 150 puntos preestablecidos. Para cada instante almacenado de proceso de rotomoldeo simulado, se obtendrá el siguiente coeficiente de variación de la uniformidad térmica:

$$Cu_i = (\text{valor absoluto de desviación típica de temperaturas respecto al valor medio en instante } i) / (\text{valor medio de temperaturas instante } i)$$

Dicho parámetro nos permitirá conocer la uniformidad térmica del proceso en cada instante del mismo así como su evolución global en el ciclo completo de moldeo rotacional simulado, permitiendo comparar la idoneidad de los procesos y moldes diseñados. Valores reducidos del coeficiente implicarán una elevada uniformidad térmica, siendo cero el valor mínimo posible, mientras que valores elevados supondrán una baja uniformidad.

### 3.6.3. Obtención de resultados de proceso de simulación

#### 3.6.3.1. Distribución de temperaturas

Los resultados del proceso de moldeo rotacional simulado para el molde convencional de aceite se muestran en las figuras 3.14 y 3.15.

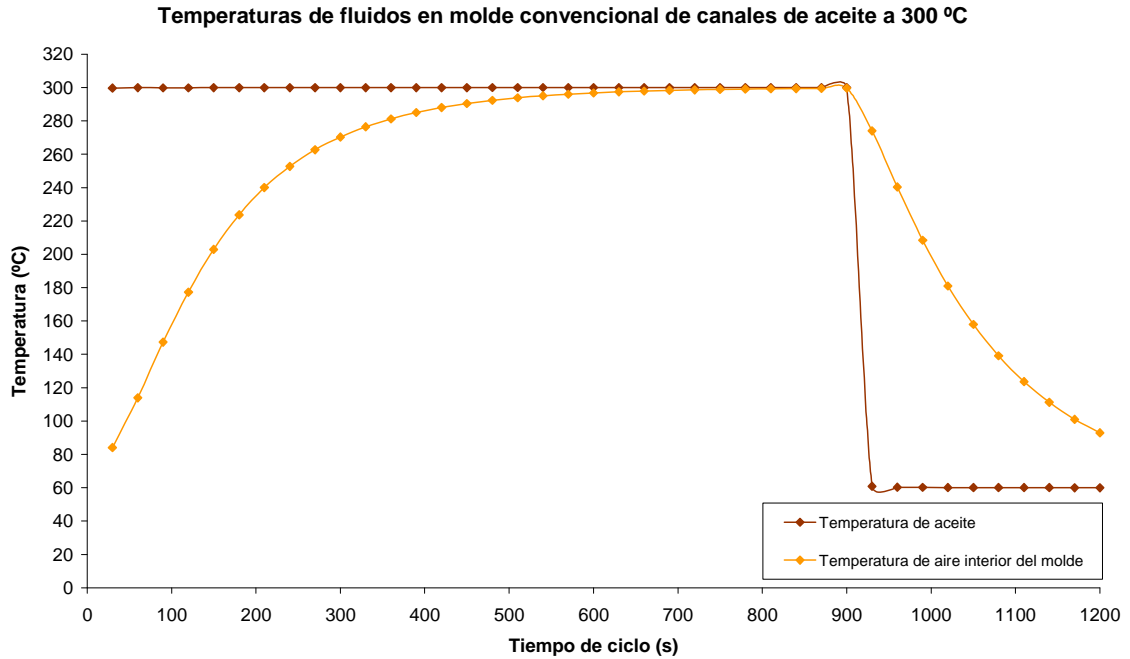


Figura 3.14: Temperaturas de los fluidos del proceso simulado de rotomoldeo del molde de canales exteriores.

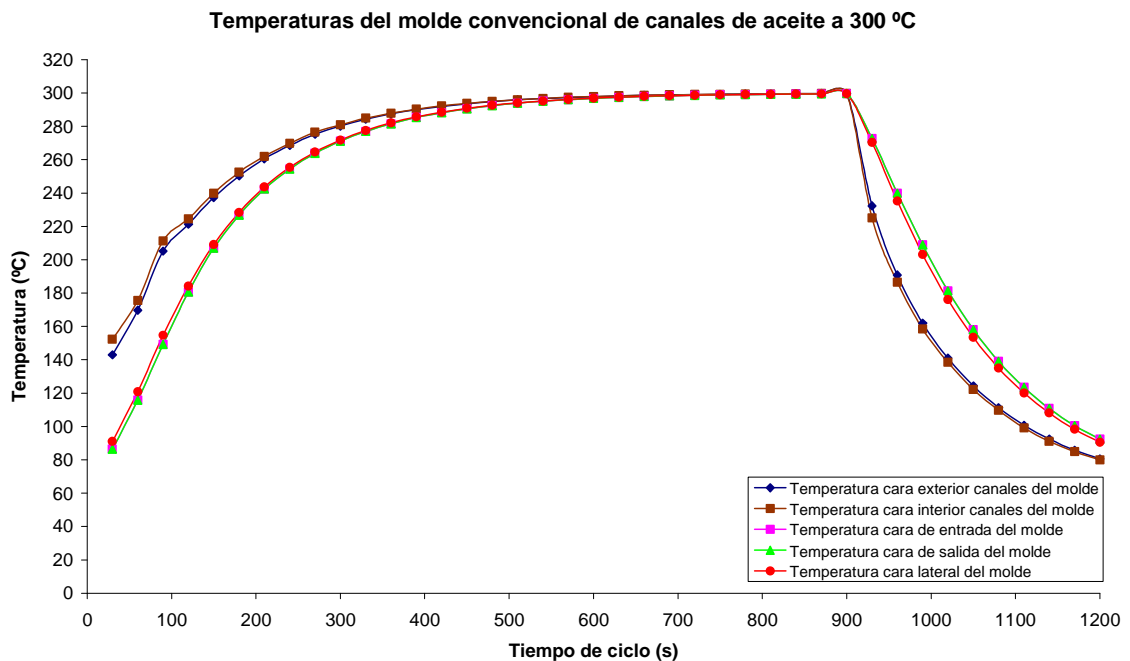


Figura 3.15: Temperaturas de sólidos del proceso simulado de rotomoldeo del molde de canales exteriores.

3.6.3.2. Uniformidad térmica

La uniformidad del proceso puede observarse a partir del coeficiente de variación de la uniformidad térmica, figura 3.16, permite identificar al comienzo del ciclo una notable diferencia de temperaturas entre diferentes partes del molde. Este efecto corresponde a la diferencia de temperatura entre las caras de entrada de aceite y las restantes, las cuales sufren un proceso de calentamiento retardado por la entrada del flujo de aceite. A medida que transcurre el paso del fluido a través del interior del molde se reducen significativamente las diferencias de temperatura entre las diferentes partes del molde hasta obtener una plena uniformidad. El mismo efecto se produce en el inicio del enfriamiento.

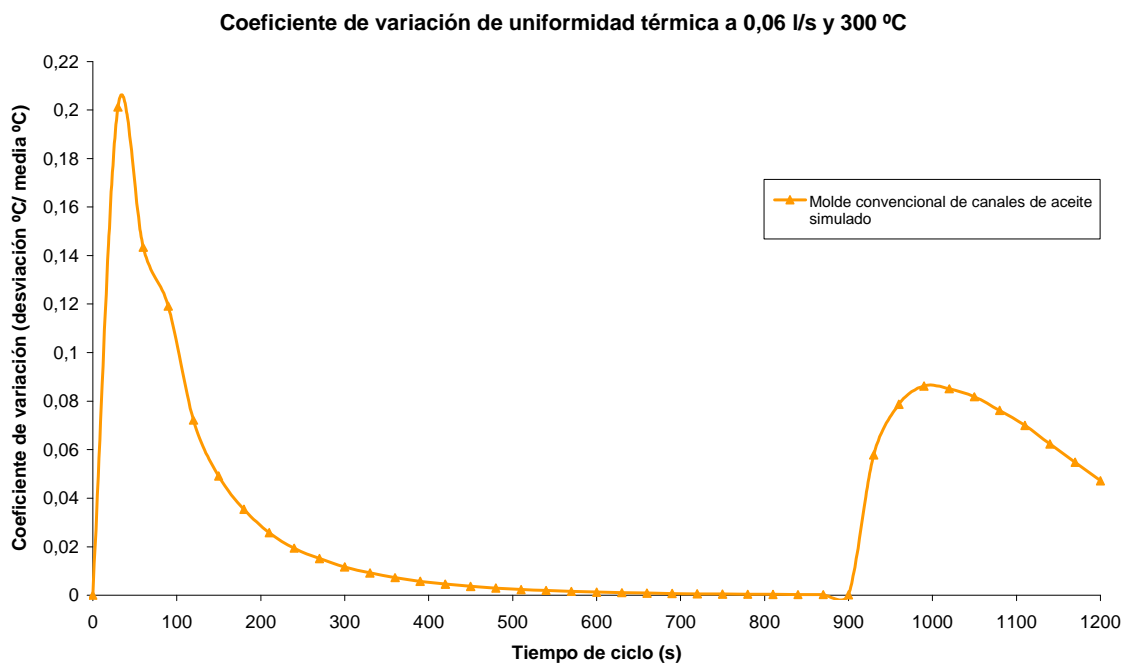


Figura 3.16: Coeficiente de variación de la uniformidad térmica del proceso simulado de rotomoldeo de la cavidad interior del molde de canales exteriores

**3.7. DISEÑO BÁSICO DEL MOLDE DE ROTOMOLDEO DE CALENTAMIENTO POR ACEITE ENVOLVENTE**

**3.7.1. Limitaciones de molde de rotomoldeo de calentamiento por aceite convencional**

Los moldes de calentamiento por aceite convencionales disponen de varios problemas asociados a su sistema de calentamiento y enfriamiento, no presentados en los moldes de calentamiento por aire, pudiéndose limitar a dos aspectos los fundamentales:

- Mecanizado de los canales exteriores del molde
- Baja uniformidad térmica

Estos moldes requieren de un complejo trazado de canales o conductos de circulación de aceite acoplados en su exterior. Esto produce un sobre coste en la fabricación de moldes así como un incremento de tiempo considerable en su ejecución. Además, el molde debe disponer de una capacidad mecánica suficiente para el soporte de dichos elementos.

En cuanto a la uniformidad térmica, es inevitable disponer de una peor uniformidad respecto al calentamiento por horno debido a la necesidad de establecer zonas concretas de entrada y salida del fluido que producen un gradiente transitorio de temperatura. Además, la propia geometría de los canales, los cuales ocupan un área reducida de la superficie total exterior del molde, no abarcando el mismo en toda su amplitud, produce zonas de contacto con el aceite y zonas de contacto con el aire exterior. A pesar de las amplias ventajas energéticas que se obtienen, estas limitaciones hacen que los moldes de calentamiento por aceite pierdan competitividad respecto al calentamiento por horno, sobre todo para los fabricantes que busque precisión en el espesor de las piezas generadas

Por otra parte, ambos tipos de molde siguen teniendo unas importantes limitaciones. El mecanizado de los moldes desde su diseño original hasta su final fabricación es un proceso costoso, limitándose en la mayoría de las ocasiones a la fabricación en serie de grandes cantidades de piezas, pues de lo contrario los costes unitarios para cortas tiradas de fabricación serían muy elevados.

### **3.7.2. Configuración base de molde prototipo de rotomoldeo de calentamiento por aceite envolvente**

El modelo prototipo diseñado debe responder a las necesidades y limitaciones de los moldes convencionales, tanto de calentamiento por aire como por aceite.

Como primer elemento característico e innovador en el nuevo molde diseñado se encuentra la creación de una envolvente que recubra por completo todas las partes activas del molde, de forma que el aceite térmico, tanto en el proceso de calentamiento como en el de enfriamiento, transcurre por toda la superficie exterior del molde objeto de transmisión térmica. De esta forma, es posible obtener procesos térmicos de mayor velocidad y mejor uniformidad térmica.

Otro aspecto vital introducido en el diseño del nuevo molde se encuentra la incorporación de las tecnologías de Rapid Prototyping y Rapid Tooling, fundamentalmente las tecnologías de electroconformado, para la fabricación de los componentes principales del molde. Estas tecnologías, permitirá la fabricación en níquel o cobre de la cavidad del molde que conformará la pieza plástica, permitiendo alcanzar espesores de pared de tan solo 1 mm, con grandes capacidades mecánicas y reproducibilidades inalcanzables mediante tecnologías convencionales.

### 3.7.3. Diseño básico de molde prototipo de rotomoldeo de calentamiento por aceite envolvente

Se ha modelado mediante herramientas CAD un molde cúbico estándar de rotomoldeo similar al modelo base de calentamiento por aceite convencional, de lado interior útil de 100 mm. Se ha establecido un espesor de 1 mm en toda su geometría, con níquel como material de diseño cuyas características principales como se resumen [10]:

- Densidad:  $8908 \text{ kg/m}^3$
- Calor específico:  $440 \text{ J/kg K}$
- Conductividad térmica:  $90,7 \text{ W /m K}$

Dicho molde se ha diseñado con un canal exterior envolvente a la cavidad interior del molde, de 5 mm de anchura, por el cual discurrirá el aceite térmico. El volumen interior de aire así como de aceite es semejante tanto en el modelo de molde convencional como en el diseñado, estableciéndose un mismo marco comparativo.

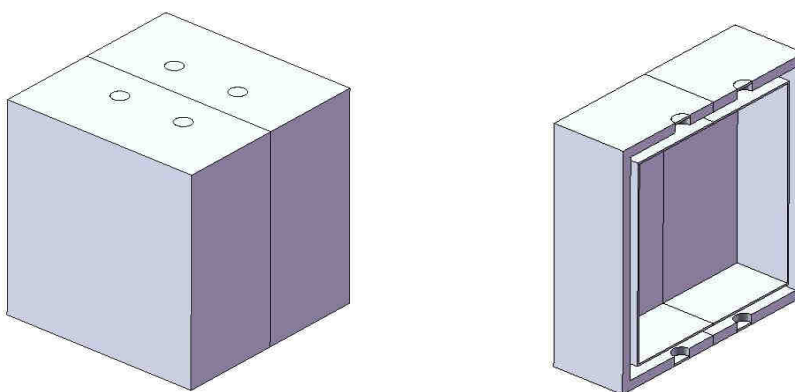


Figura 3.17: Modelo básico del molde de rotomoldeo prototipo de canal envolvente de aceite

Este modelo básico, incorpora al igual que el modelo convencional, 4 aberturas de 10 mm de diámetro en una de las caras para la entrada de aceite térmico en el interior del



canal envolvente. De igual forma pero en la cara opuesta se han dispuesto otras 4 aberturas de similares dimensiones, para la salida del flujo de aceite.

Por tanto, se ha diseñado un modelo básico de calentamiento por aceite envolvente de forma que permita, a través de los mismos métodos utilizados para simulación del molde convencional, una simulación completa y su posterior análisis comparativo con el molde convencional.

Realizando el mismo procedimiento de simulación, se obtienen los siguientes resultados expuestos en los siguientes apartados.

### 3.7.3.1. Distribución de temperaturas

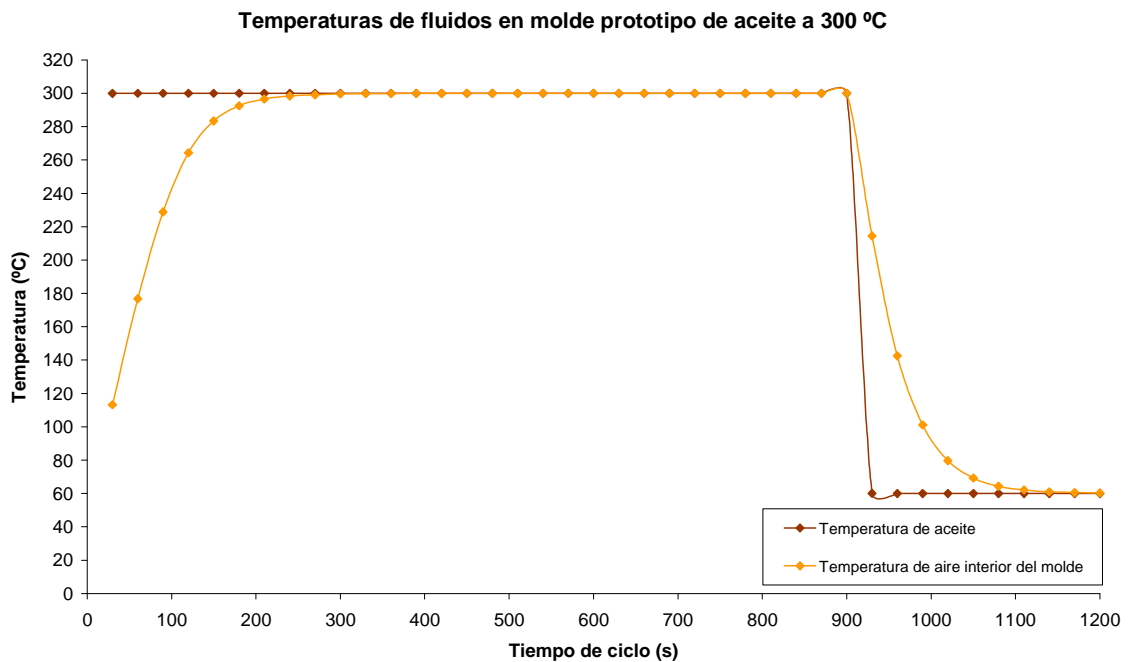


Figura 3.18: Temperaturas de los fluidos del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente.

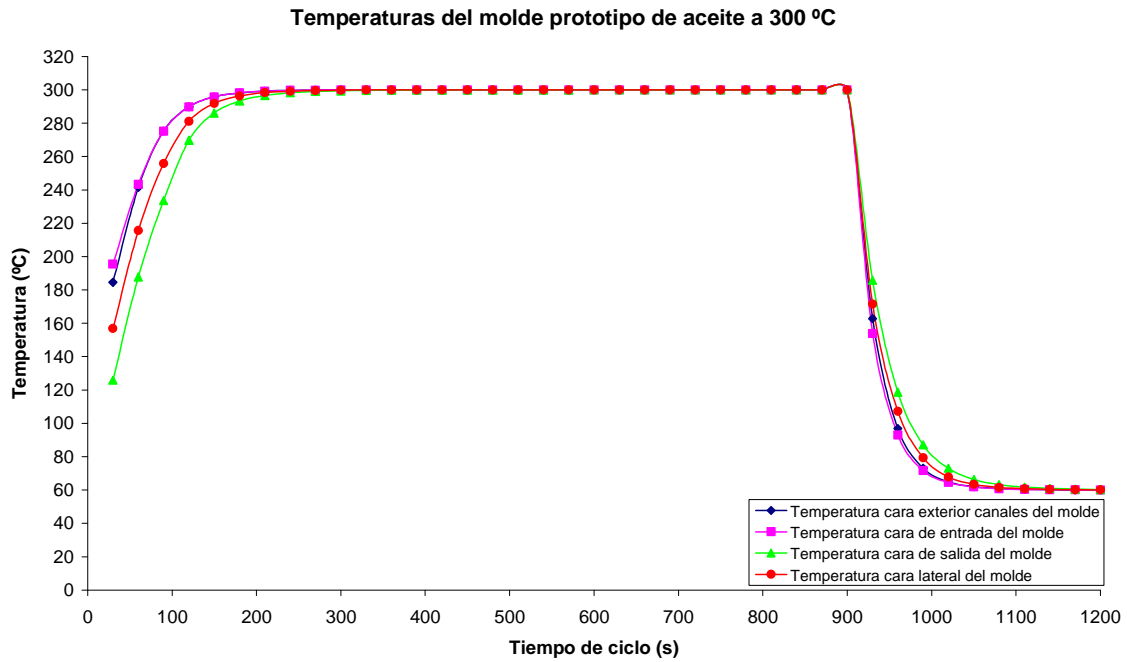


Figura 3.19: Temperaturas de sólidos del proceso simulado de rotomoldeo del molde de canales exteriores.

3.7.3.2. Uniformidad térmica

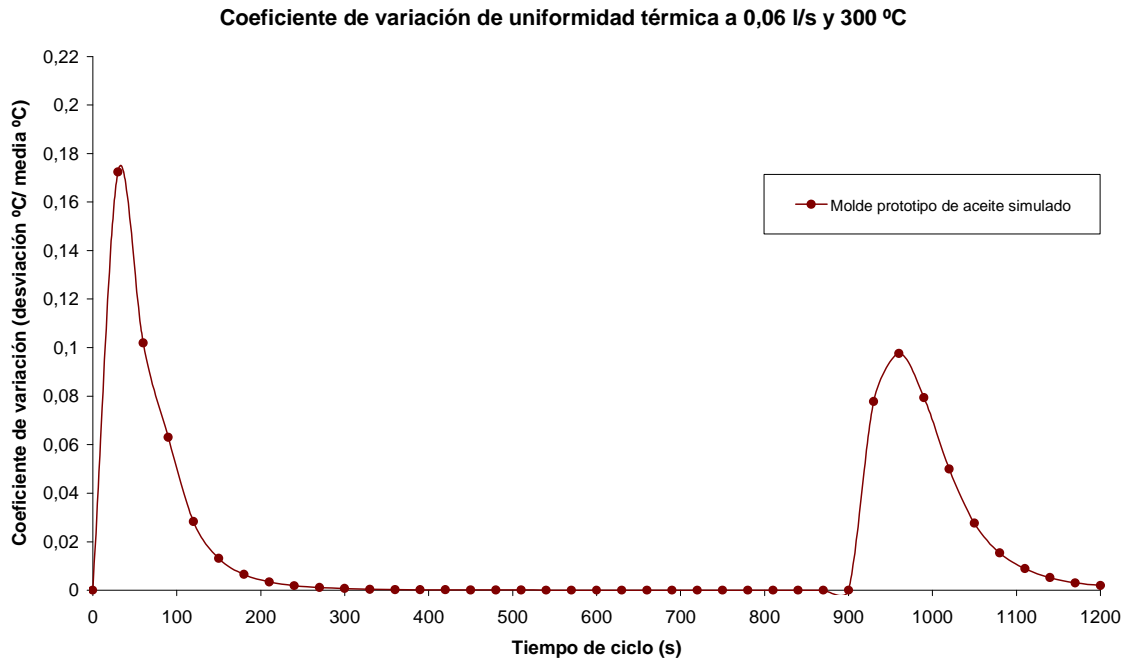


Figura 3.20: Coeficiente de variación de la uniformidad térmica del proceso simulado de rotomoldeo de la cavidad interior del molde prototipo de canal envolvente.

### 3.8. ESTUDIO BÁSICO COMPARATIVO DE MOLDES DE ROTOMOLDEO CONVENCIONALES Y MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO

Con los resultados obtenidos para los dos tipos de modelos es posible analizar comparativamente los comportamientos térmicos.

Respecto a la respuesta de calentamiento y para un supuesto real de ciclo de rotomoldeo donde el proceso de calentamiento finaliza al alcanzar 260 °C de temperatura de interior de aire, por ejemplo, obtenemos el ciclo de calentamiento según la figura 3.21.

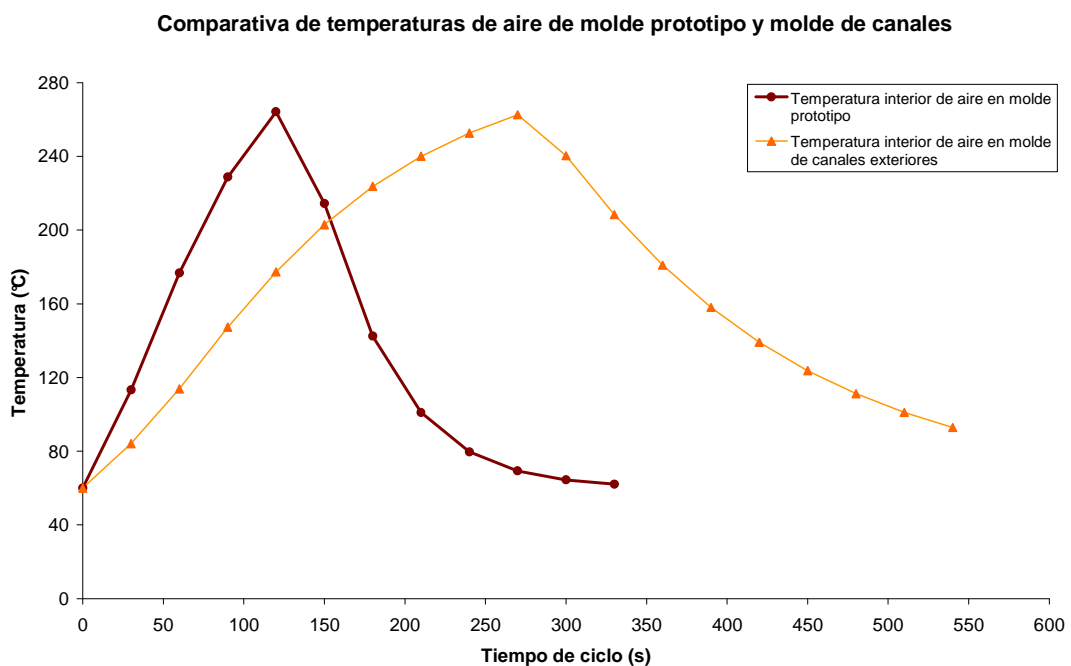


Figura 3.21: Comparativa de temperaturas de aire interior del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores.

Puede observarse en el caso del molde convencional de canales la necesidad de un tiempo de calentamiento superior a los 260 s para alcanzar dicha temperatura de consigna. En el molde de canal envolvente dicha temperatura es alcanzada a los 120 s de proceso, produciéndose una disminución del tiempo de ciclo superior al 53%. Para un ciclo completo, con procesos de enfriamiento completo, la reducción del ciclo superaría el 60%.

En el caso de las temperaturas de molde, la figura 3.22 muestra igualmente la mayor respuesta en calentamiento del modelo envolvente.

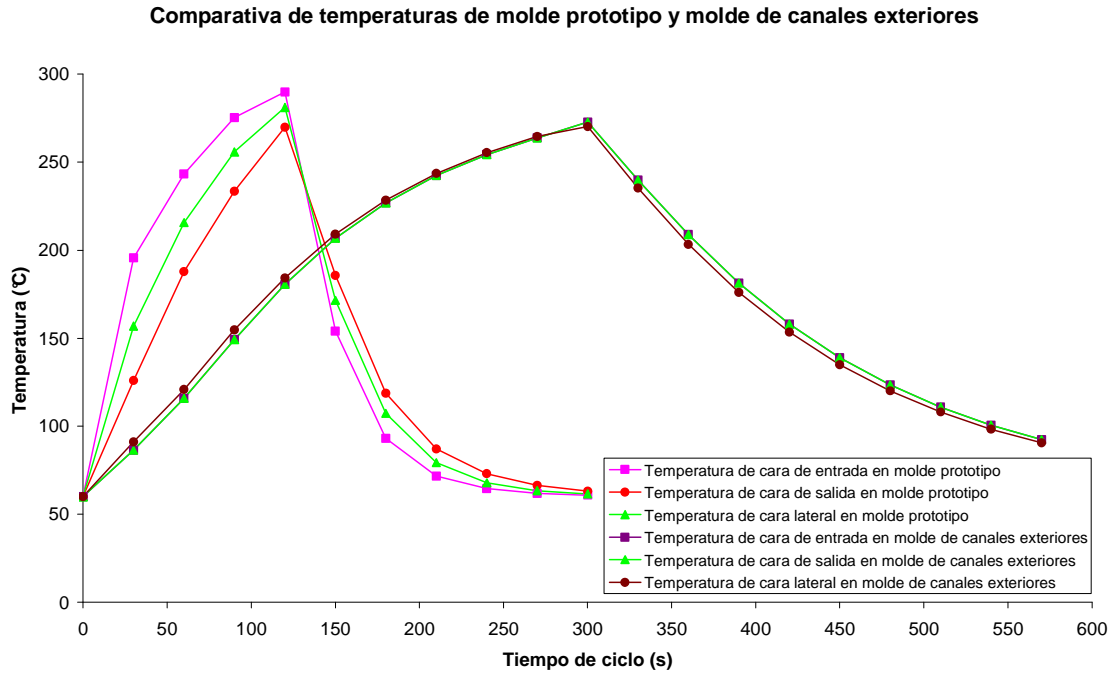


Figura 3.22: Comparativa de temperaturas del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores.

Respecto a la uniformidad del proceso completo de 1200 s, la uniformidad térmica en el molde de envolvente se ve mejorada respecto del molde de canales.

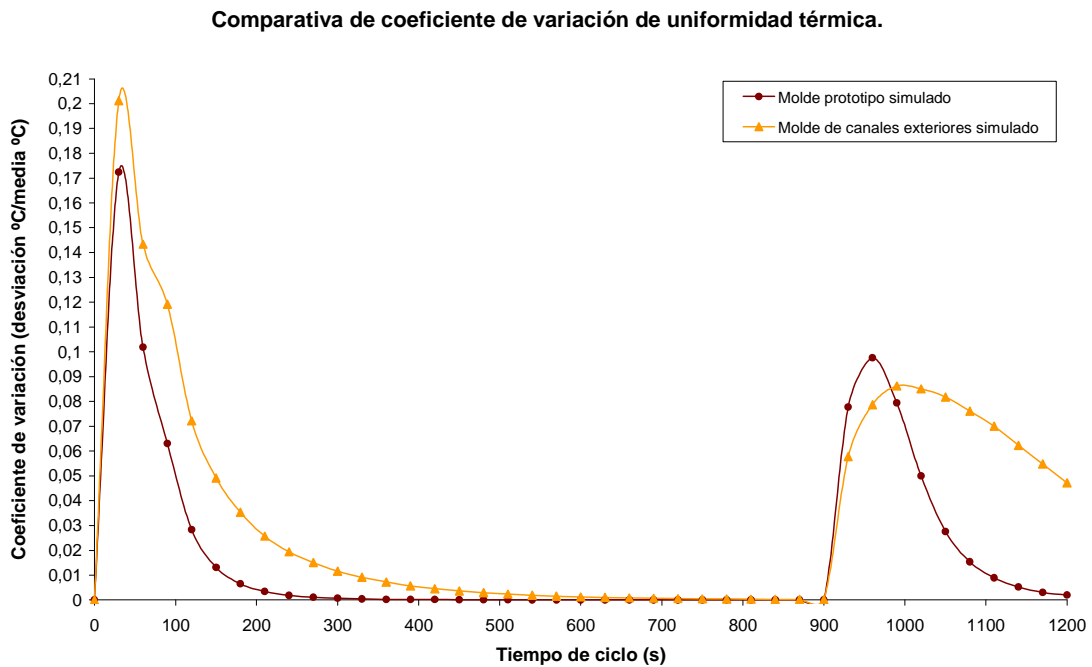


Figura 3.23: Comparativa del coeficiente de variación de la uniformidad del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores.

En el caso del ciclo real de temperatura máxima de aire interior de 260°C la uniformidad y desplazando el inicio del enfriamiento en el molde envolvente, para una mejor comparativa, se obtiene una clara visión de los resultados obtenidos.

Comparativa de coeficiente de variación de uniformidad térmica.

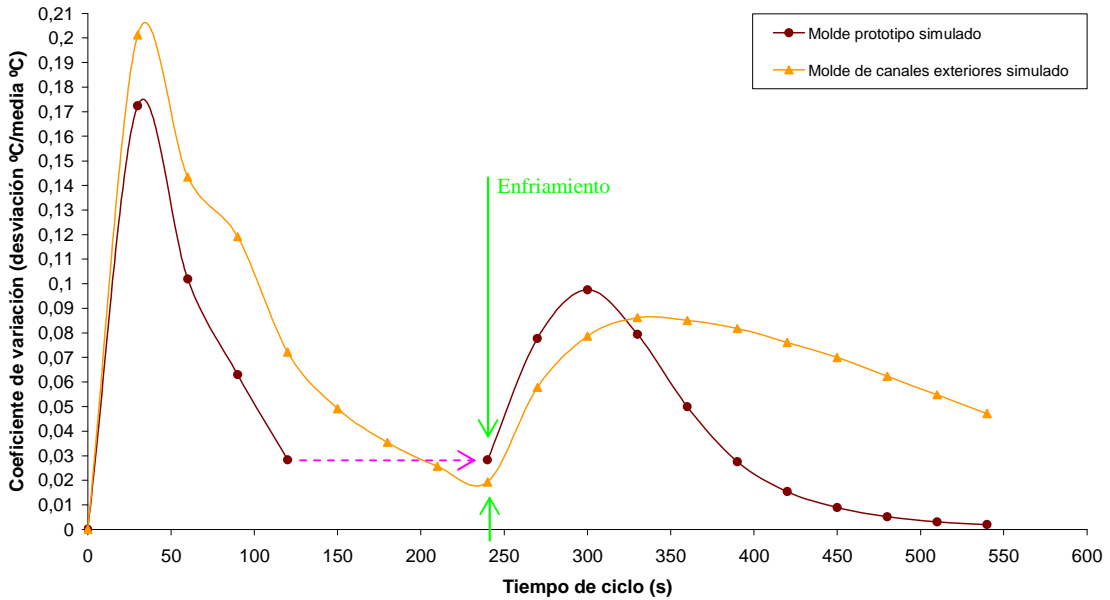


Figura 3.24: Comparativa del coeficiente de variación de la uniformidad desplazada, del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores.

Durante el proceso de calentamiento, la mejora porcentual de uniformidad alcanzada se muestra en las siguientes gráficas:

Comparativa de coeficiente de variación de uniformidad térmica.

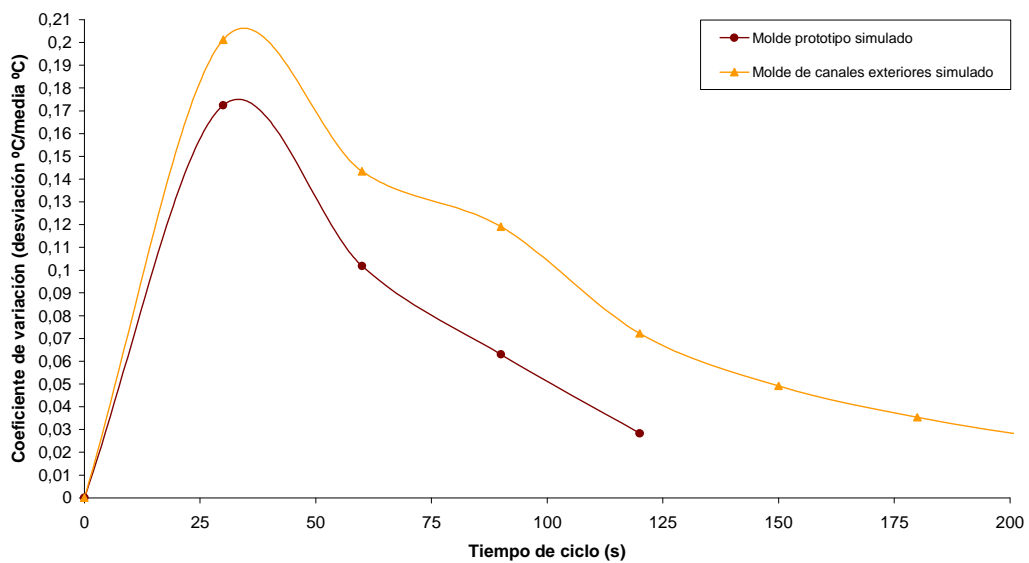


Figura 3.25: Comparativa de la uniformidad del calentamiento del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores.

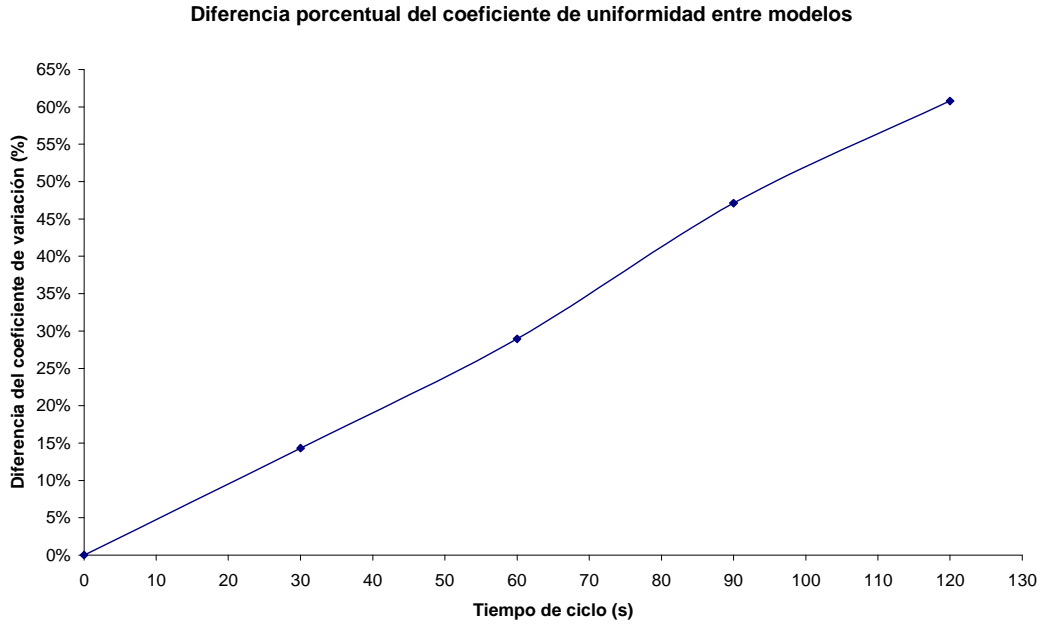


Figura 3.26: Diferencia porcentual del coeficiente de variación de la uniformidad del molde prototipo de canal envolvente en relación al molde de canales exteriores en el proceso de calentamiento.

La disminución de la desviación del coeficiente de variación adquiere una tendencia porcentual positiva, alcanzando reducciones superiores al 60% en la etapa final de calentamiento. En el proceso de enfriamiento, se produce un repunte de dicho coeficiente en el modelo envolvente que posteriormente se ve mejorado rápidamente hasta alcanzar igualmente grandes cotas de uniformidad.

**Comparativa de coeficiente de variación de uniformidad térmica.**

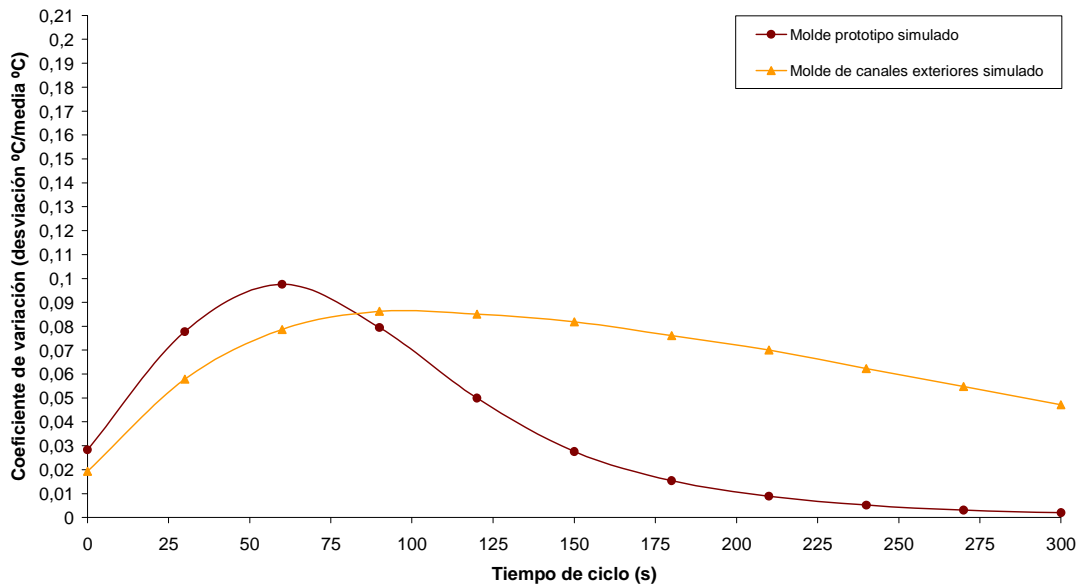


Figura 3.27: Comparativa del coeficiente de variación de la uniformidad de enfriamiento del proceso simulado de rotomoldeo del molde prototipo de canal envolvente y de canales exteriores.

Estos efectos pueden verse mejorados radicalmente, en vistas a su competitividad con los procesos de calentamiento por horno, incrementando el caudal de flujo de aceite o incorporando entradas y salidas en otras caras, entre otras posibilidades.

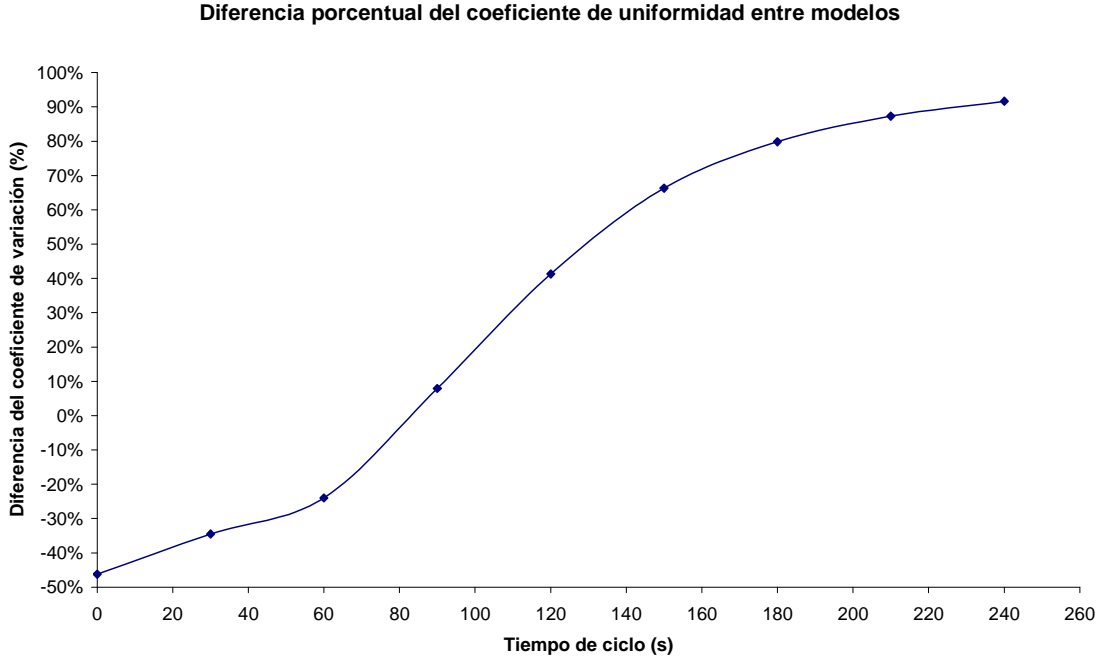
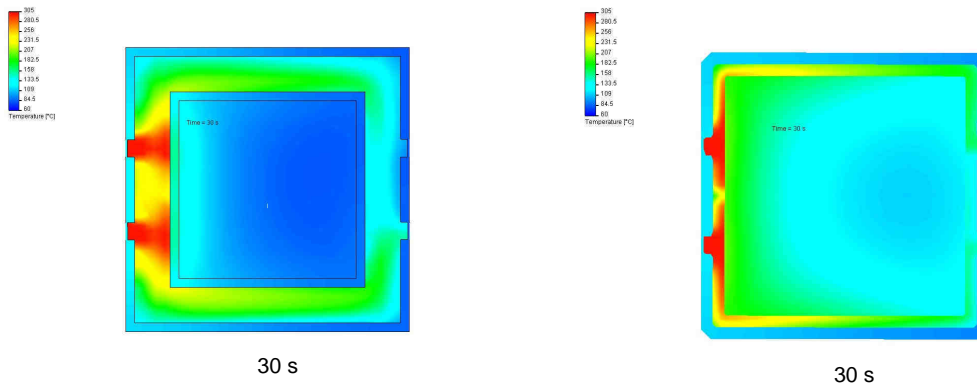
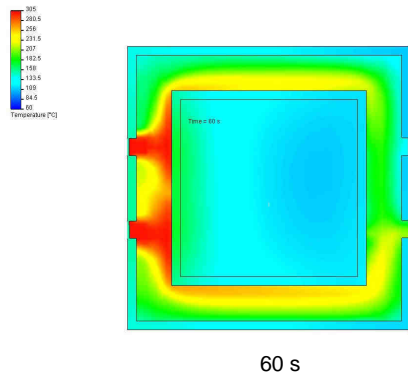


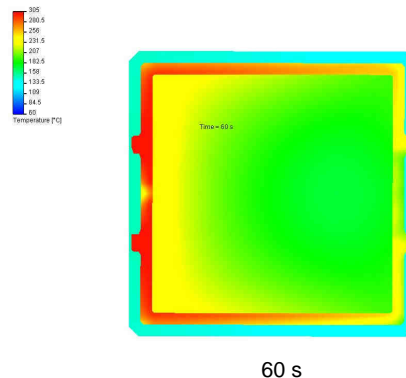
Figura 3.28: Diferencia porcentual del coeficiente de variación de la uniformidad del molde prototipo de canal envolvente en relación a molde de canales exteriores en el proceso de enfriamiento.

En las imágenes de la figura 3.29 puede observarse la distribución de temperaturas interior tanto del molde de canales exteriores como en el de canal envolvente, así como la evolución del proceso de moldeo rotacional, tanto para los fluidos que intervienen en el proceso como en las partes sólidas de los moldes.

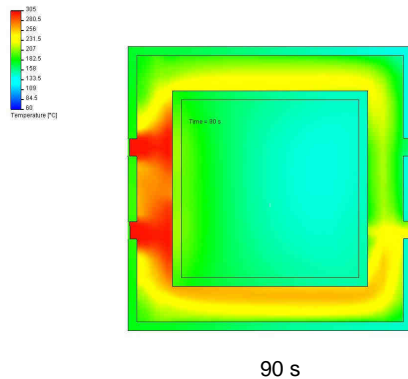




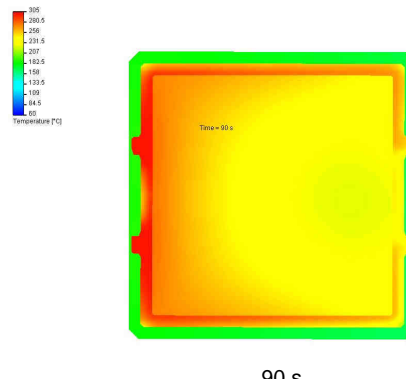
60 s



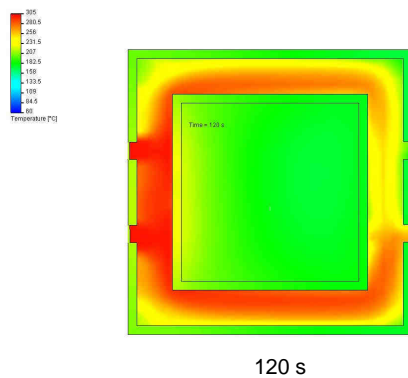
60 s



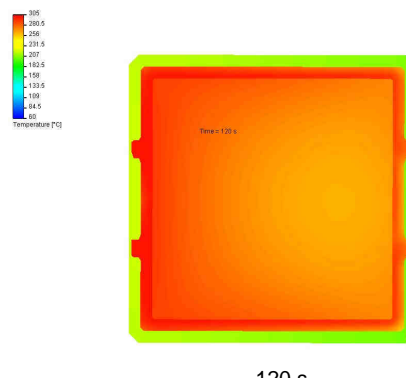
90 s



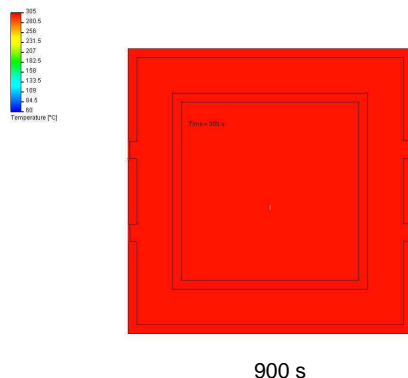
90 s



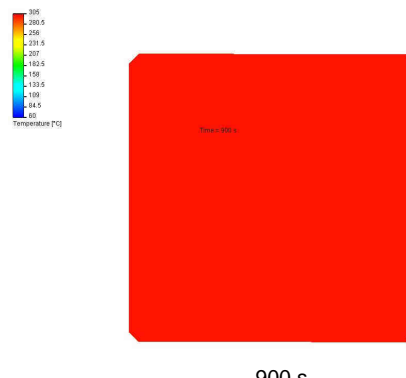
120 s



120 s

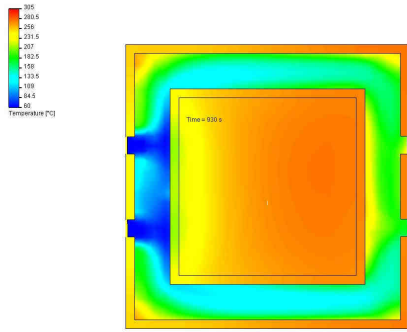


900 s

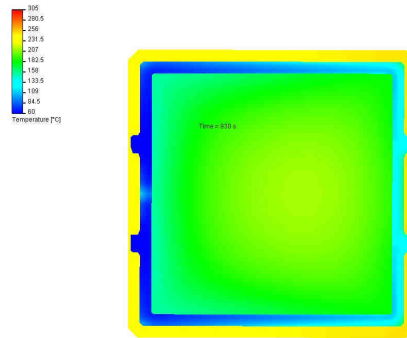


900 s

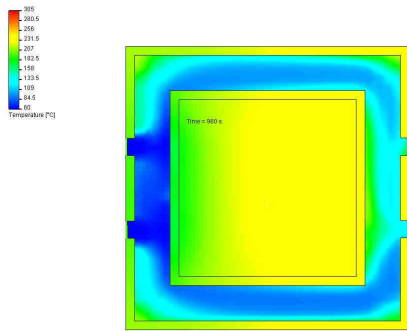




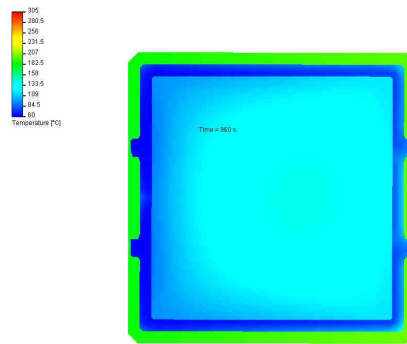
930 s



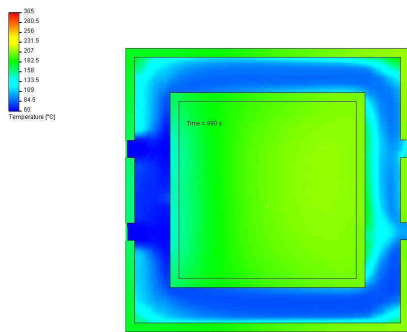
930 s



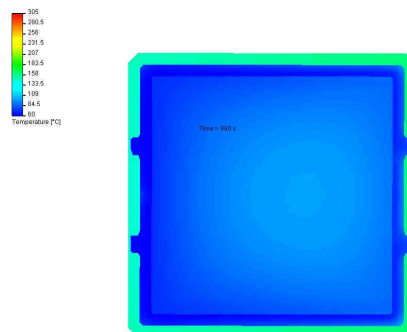
960 s



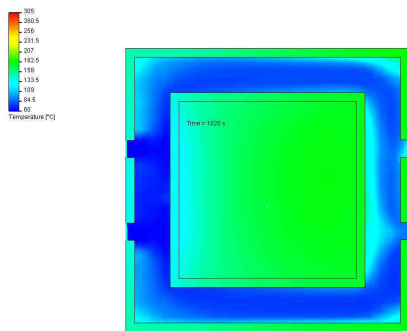
960 s



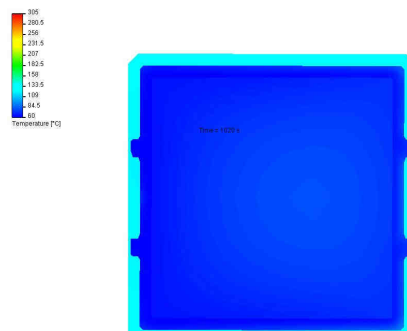
990 s



990 s



1020 s



1020 s

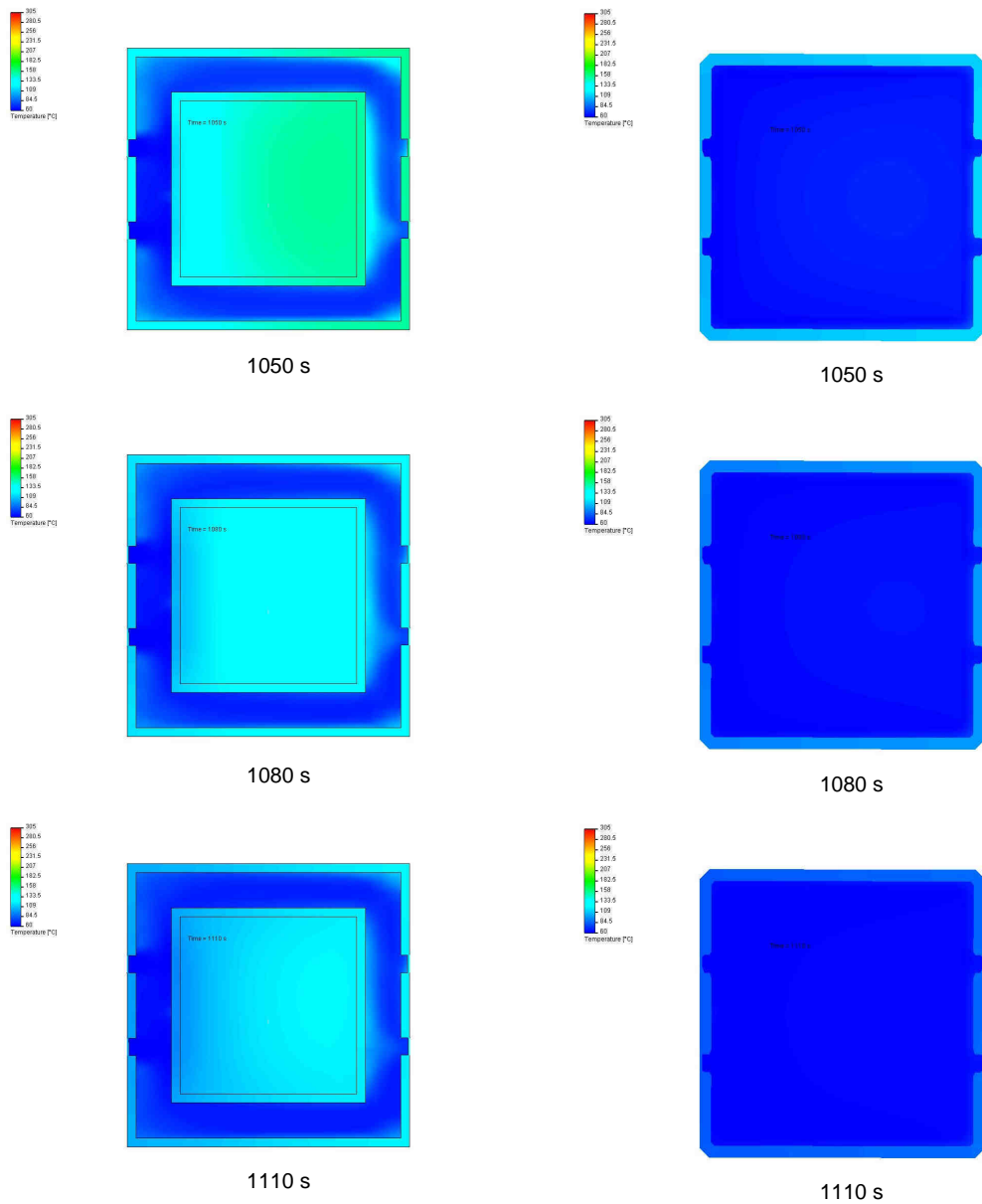


Figura 3.29: Distribución de temperaturas interiores del molde de canales exteriores (izquierda) y molde prototipo de canal envolvente (derecha) en diferentes momentos del proceso simulado de rotomoldeo.

### 3.9. DISEÑO AVANZADO DE MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO

A partir de los datos obtenidos con anterioridad, donde queda confirmada la mayor eficiencia del proceso de calentamiento envolvente con aceite térmico, tanto desde el punto de vista de velocidad de calentamiento como de la uniformidad térmica, se continúa con el desarrollo del molde de prototipo, cuyas bases fundamentales son la utilización de una envolvente completa para la circulación del fluido térmico a la par del uso de las tecnologías

de Rapid Tooling, concretamente el electroconformado, para la obtención de una cavidad de molde en níquel y de 1 mm de espesor.

### 3.9.1. Limitaciones del molde prototipo

Múltiples son las variables existentes en el proceso de moldeo rotacional, así como las posibles configuraciones del molde y los procesos de transferencia térmica, que hacen complejo tanto en estudio de los moldes de rotomoldeo actuales como el diseño de nuevos modelos y configuraciones. Por ello, es necesario establecer unas limitaciones de diseño, fundamentalmente geométricas, que permita desarrollar de forma acotada un modelo prototipo.

El modelo prototipo quedará limitado geoméricamente para la fabricación de piezas de forma cúbica, de medidas útiles máximas exteriores de 100 mm de lado:

100 mm de ancho - 100 mm de largo - 100 mm de alto

Asimismo, y al tratarse de un desarrollo de prototipo completo y de aplicación real, incluyendo su posterior proceso de fabricación y ensayo, se limitarán las superficies activas hasta un máximo de 5 caras, de forma que la cara restante quedará aislada térmicamente, para el acceso al interior del molde. De esta manera, la pieza de fabricación será un elemento en forma de cubo totalmente hueco, con 5 caras conformadas.

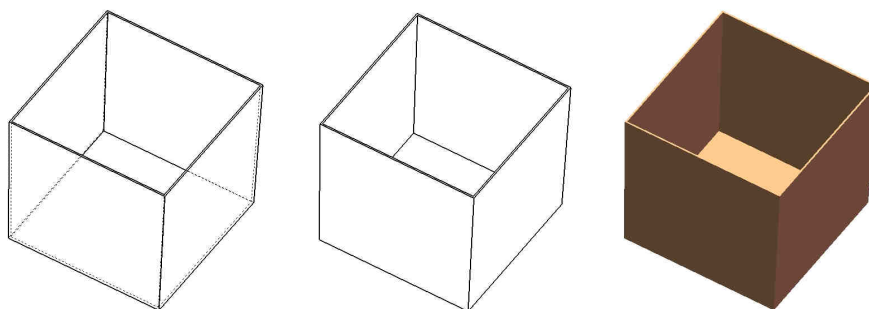


Figura 3.30: Imágenes de cavidad interior del molde básico de níquel de 1 mm de espesor.

### 3.9.2. Estudio del caudal óptimo

Un aspecto fundamental en el desarrollo de un molde de rotomoldeo por calentamiento por aceite es el volumen de aceite circundante al mismo. Este volumen, tanto

para el caso de múltiples canales como concretamente para el molde prototipo objeto de estudio, influye significativamente en los procesos de transferencia térmica.

El volumen de aceite se ha minimizado disponiendo el espesor mínimo requerido para un paso adecuado de aceite alrededor del molde. De esta manera, se ha especificado un canal envolvente de 5 mm de anchura, que permite un flujo adecuado de aceite por su interior, sin producir una elevada pérdida de carga, a la vez que permite una rápida renovación del aceite interior.

Sin embargo, el parámetro que ha sido evaluado y estudiado con detenimiento ha sido el flujo volumétrico de aceite, pues una vez determinado un volumen de aceite mínimo envolvente, dicho flujo determinará las renovaciones de dicho volumen. Además, el flujo volumétrico es un parámetro de fácil control en la práctica, en sistema de bombeo y conducción del aceite.

Para la determinación del caudal óptimo para el molde prototipo se ha establecido como principal criterio la velocidad de calentamiento producido en el proceso de moldeo rotacional tanto del aire interior del molde como de las paredes del molde.

A partir del modelo básico de molde prototipo, se han establecido 14 flujos volumétricos, desde  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  (0,08 l/s), manteniendo el resto de condiciones invariables tales como la geometría del modelo, temperatura de entrada de 300 °C, parámetros de cálculo, etc.

Para evaluar la influencia de flujo volumétrico en el proceso, se han simulado todas las configuraciones de flujo, únicamente en el proceso de calentamiento, y se han obtenido los tiempos de calentamientos necesarios para alcanzar, en cada caso, la temperatura de 250°C tanto en el punto central interior del aire interior del molde, como de las paredes del mismo. De esta manera, es posible determinar la influencia del flujo volumétrico en el proceso.

La tabla 3.1 refleja la duración del proceso de calentamiento necesaria para alcanzar la temperatura de consigna en las diferentes partes del molde y para cada flujo volumétrico analizado.

| Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /s) | Aire interior | Cara de entrada de molde | Cara de salida de molde | Cara lateral de molde |
|---------------------------------------|---------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| $2,50 \cdot 10^{-6}$                  | 459,51        | 192,44                   | 594,30                  | 432,12                |
| $5,00 \cdot 10^{-6}$                  | 231,75        | 112,65                   | 295,63                  | 205,19                |
| $7,50 \cdot 10^{-6}$                  | 174,83        | 91,52                    | 209,14                  | 149,14                |
| $1,00 \cdot 10^{-5}$                  | 152,54        | 85,64                    | 173,64                  | 128,93                |
| $1,25 \cdot 10^{-5}$                  | 141,38        | 81,31                    | 153,42                  | 116,76                |
| $1,50 \cdot 10^{-5}$                  | 131,19        | 77,48                    | 138,96                  | 107,74                |
| $1,75 \cdot 10^{-5}$                  | 122,77        | 74,61                    | 127,11                  | 100,40                |
| $2,00 \cdot 10^{-5}$                  | 117,86        | 72,64                    | 118,22                  | 92,58                 |
| $2,50 \cdot 10^{-5}$                  | 114,43        | 70,78                    | 113,03                  | 90,03                 |
| $3,00 \cdot 10^{-5}$                  | 118,24        | 74,44                    | 114,98                  | 95,68                 |
| $4,00 \cdot 10^{-5}$                  | 116,20        | 70,59                    | 114,74                  | 95,70                 |
| $5,00 \cdot 10^{-5}$                  | 111,15        | 67,54                    | 108,28                  | 88,97                 |
| $6,50 \cdot 10^{-5}$                  | 106,43        | 65,06                    | 101,66                  | 84,18                 |
| $8,00 \cdot 10^{-5}$                  | 103,12        | 63,74                    | 96,50                   | 81,10                 |

Tabla 3.1. Tiempo de ciclo requerido según caudal y zona de molde para alcanzar 250°C.

Analizando los resultados obtenidos, puede establecerse que el incremento del flujo volumétrico de aceite permite obtener mayores velocidades de calentamiento, sin embargo, este efecto disminuye paulatinamente hasta alcanzar una velocidad máxima de calentamiento, produciéndose una saturación de transferencia térmica, de forma que un incremento del flujo no incrementa la velocidad de calentamiento. Por tanto, debe establecerse un límite de flujo a partir del cual el gasto energético asociado al aumento del caudal no produce mejora en el proceso. Este valor máximo recomendable puede establecerse en  $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , aunque a partir de  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0,025 \text{ l/s}$ ) el incremento de velocidad de calentamiento es prácticamente irrelevante para el proceso.

Cabe destacar que dichas consideraciones tienen carácter orientativo al pretender establecer un valor de referencia de flujo de aceite necesario en el molde, para las geometrías y condicionantes establecidos con anterioridad. Deben evaluarse otros factores que puedan influir en la elección del flujo volumétrico óptimo del proceso para una optimización final en un proceso real de fabricación. Por tanto, el flujo óptimo establecido solo obedece a un criterio de eficiencia térmica y reducción de tiempo de ciclo, pudiendo

existir otros condicionantes como la calidad de pieza final, o los procesos de uniformidad térmica que requieran un estudio avanzado del flujo de aceite.

**Velocidad de calentamiento del aire interior del molde**

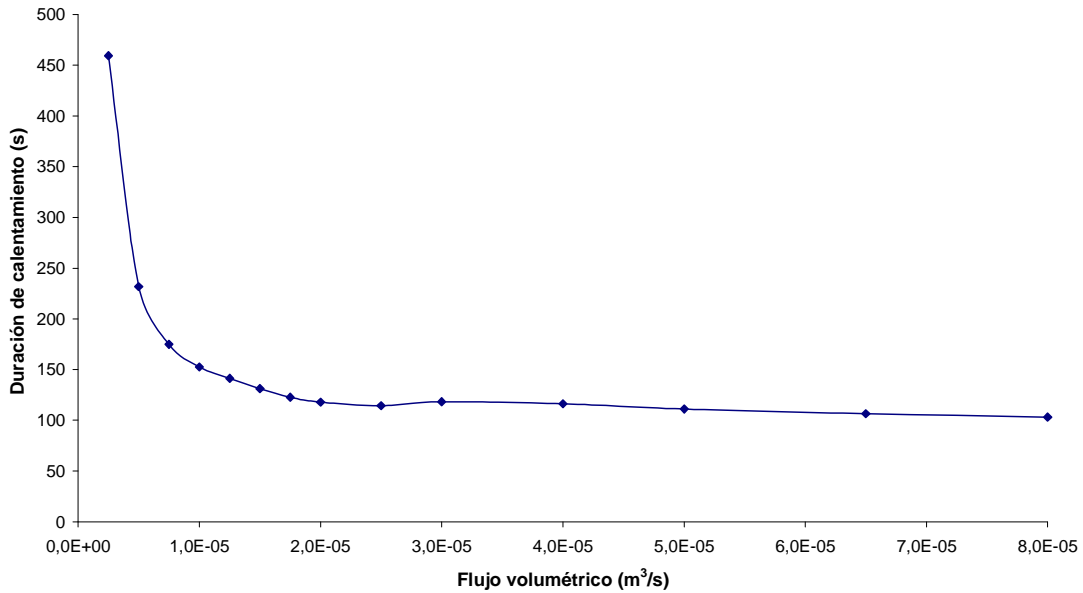


Figura 3.31: Velocidad de calentamiento del interior del aire en proceso simulado de rotomoldeo de molde de canal envolvente. Duración de ciclo necesaria para alcanzar 250°C en temperatura interior de aire en función del flujo volumétrico de aceite.

**Velocidad de calentamiento de la cara de entrada del aceite en el molde**

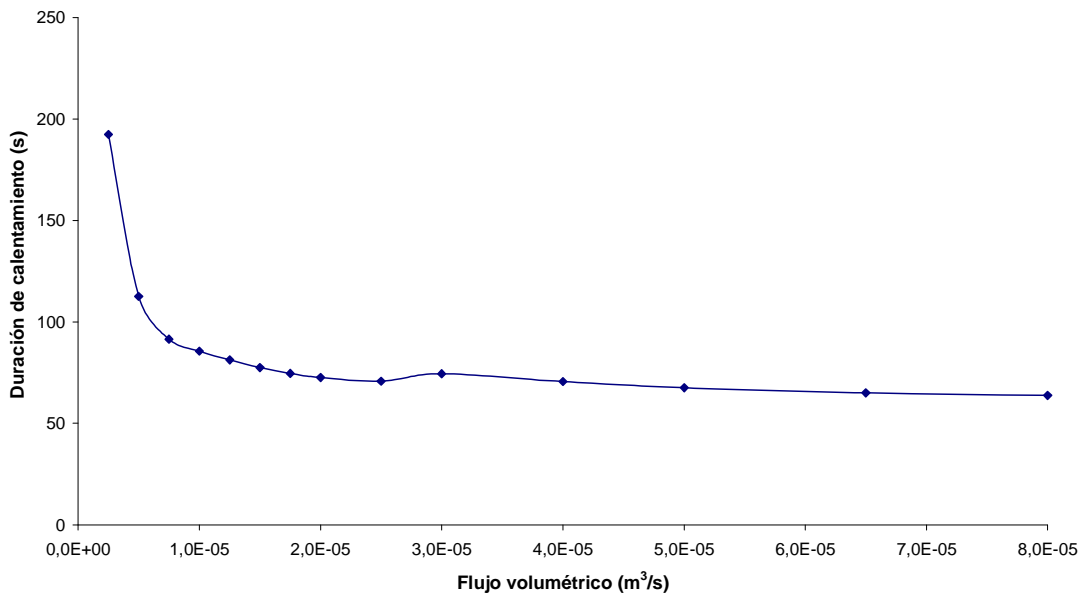


Figura 3.32: Velocidad de calentamiento de cara de entrada de molde de canal envolvente en proceso simulado de rotomoldeo. Duración de ciclo necesaria para alcanzar 250°C en temperatura de cara de entrada en función del flujo volumétrico de aceite.

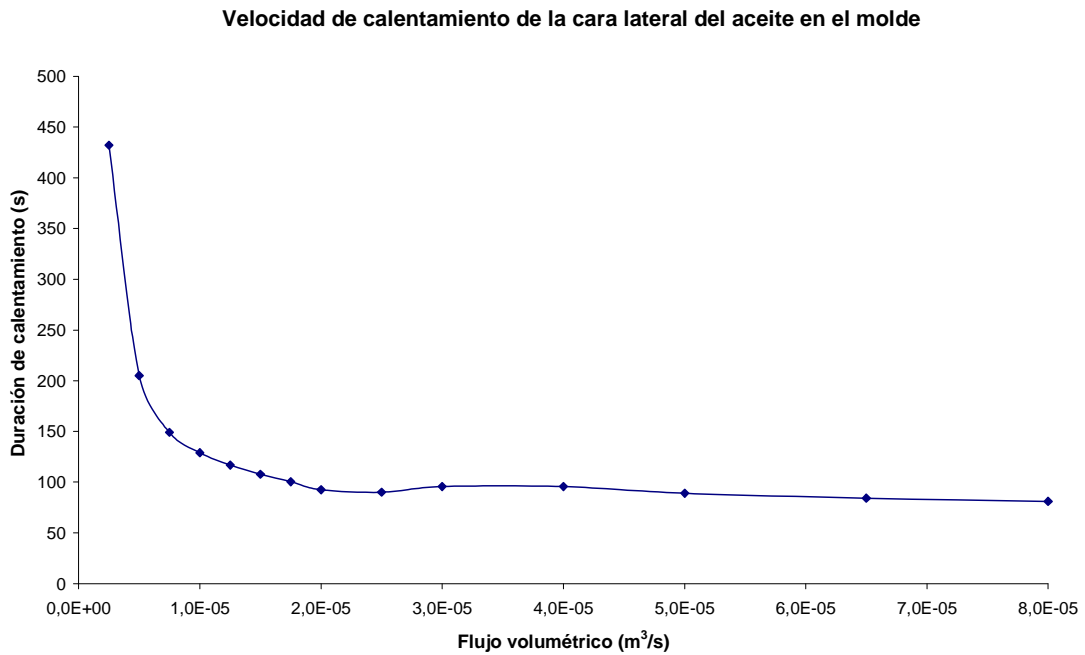


Figura 3.33: Velocidad de calentamiento de cara lateral de molde de canal envolvente en proceso simulado de rotomoldeo. Duración de ciclo necesaria para alcanzar 250°C en temperatura de cara lateral en función del flujo volumétrico de aceite.

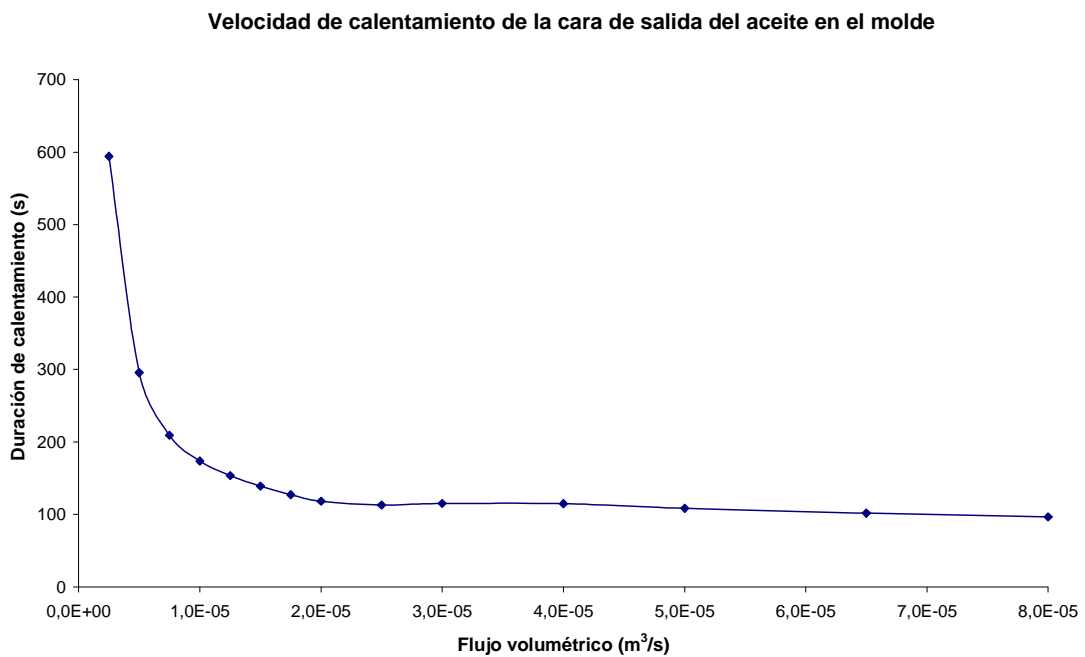


Figura 3.34: Velocidad de calentamiento de cara de salida de molde de canal envolvente en proceso simulado de rotomoldeo. Duración de ciclo necesaria para alcanzar 250°C en temperatura de cara de salida en función del flujo volumétrico de aceite.

### **3.9.3. Estudio de configuraciones de entrada y salida**

#### *3.9.3.1. Introducción*

La introducción del fluido térmico en el interior de la envolvente exterior del molde está expuesta a infinidad de posibilidades, de forma que es posible introducir el fluido por cualquiera de las partes exteriores del molde, de forma puntual en un solo punto, o de forma múltiple, mediante varias entradas.

La forma y tipología de las entradas, y también salidas del fluido, influyen significativamente en el proceso de calentamiento y enfriamiento del molde, y por ende, del proceso de moldeo rotacional. Por ello, ha de establecerse qué configuración de introducción y extracción del flujo es óptima, o al menos, dentro de las limitaciones reales de fabricación del molde las que presentan mayor eficiencia.

Para definir las mejores configuraciones de entrada y salida del fluido del molde deben establecerse unos criterios o parámetros indicadores que lo confirmen. Los parámetros seleccionados han sido la reducción del tiempo de ciclo (o velocidad de calentamiento y enfriamiento), la uniformidad térmica y la eficiencia energética.

En la presente Tesis Doctoral, tal y como se ha expresado con anterioridad, se pretende optimizar el proceso de moldeo rotacional mediante calentamiento por aceite desde el punto de la eficiencia energética y económica, a través de la reducción de los tiempos y costes de fabricación, sin obviar la importancia de la uniformidad térmica. Sin embargo, no se desarrollan los aspectos de calidad y prestaciones de las piezas fabricadas al considerarse un campo muy amplio para incluirlo en el presente estudio...

Por tanto, para la optimización de la configuración de entrada y salida del fluido en el molde se utilizarán los parámetros de tiempo de ciclo y uniformidad térmica como elementos indicadores, de forma que la configuración óptima será aquella que permita obtener el menor tiempo de ciclo y la mayor uniformidad posibles. La eficiencia energética está garantizada en el molde de canal envolvente exterior al mejorarse el tiempo de ciclo en igualdad de gasto energético. Dicho aspecto será estudiado en mayor detalle en posteriores capítulos.



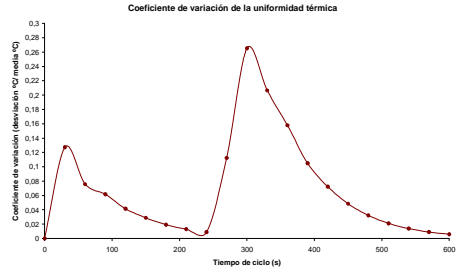
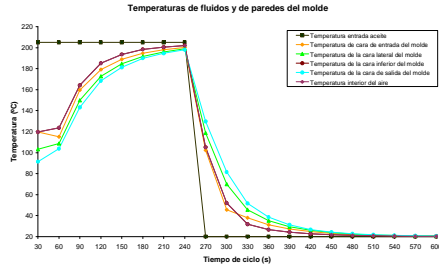
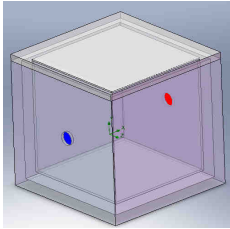
### 3.9.3.2. *Bases de cálculo*

A partir del modelo básico de molde prototipo se han realizado 25 configuraciones de entradas y salidas de aceite en el molde. Para ello, se han realizado múltiples entradas y salidas de forma circular, de 3 mm de diámetro, simulándose todas las configuraciones para un ciclo estándar de 300 s de calentamiento a 200 °C y 300 s de enfriamiento a 20°C. El flujo volumétrico establecido para este estudio ha sido de  $2 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s para garantizar la mínima afección de resultados que dicho parámetro pudiera producir.

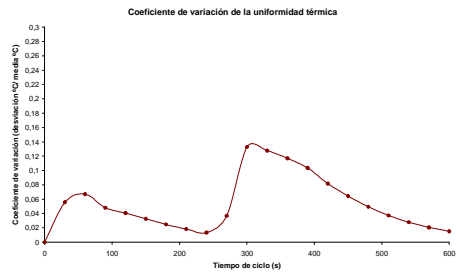
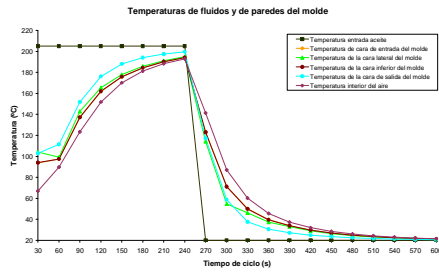
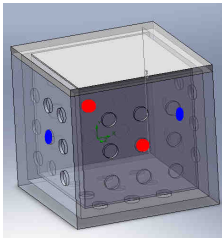
### 3.9.3.3. *Resultados de cálculo*

Las configuraciones estudiadas, sus curvas de calentamiento-enfriamiento y el coeficiente de variación de la uniformidad térmica del proceso se muestran en las imágenes de la figura 3.35. Para identificar las entradas de flujo en el molde se han matizado de color azul, mientras que las aberturas de salida del molde corresponden a las coloreadas en rojo.

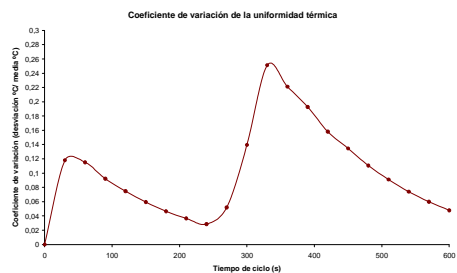
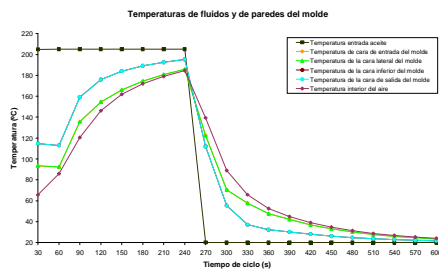
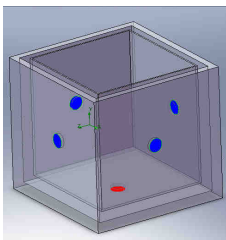
### 1 entrada - 1 salida en caras opuestas



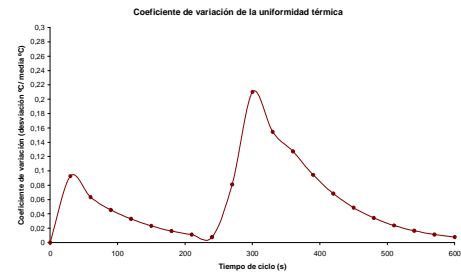
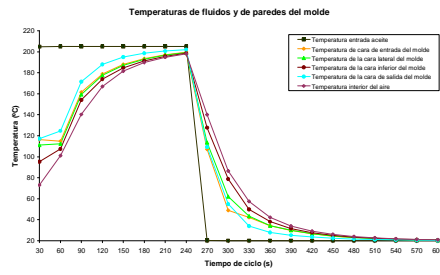
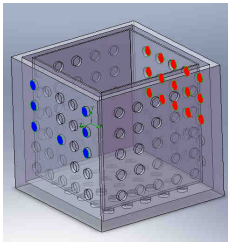
### 2 entradas en caras enfrentadas - 2 salidas en caras enfrentadas y opuestas



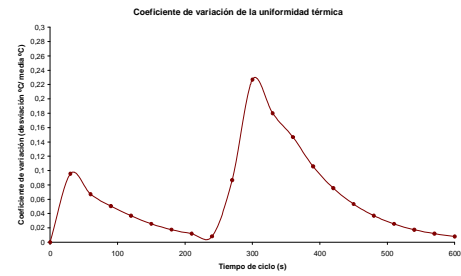
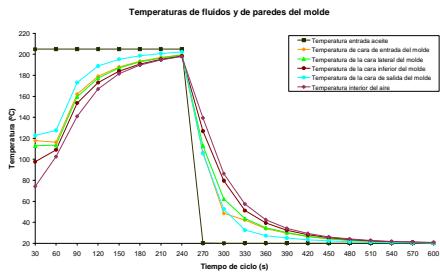
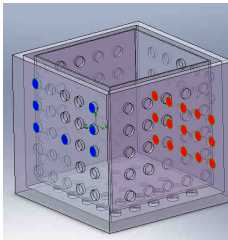
### 4 entradas en caras enfrentadas – 1 salida en cara inferior



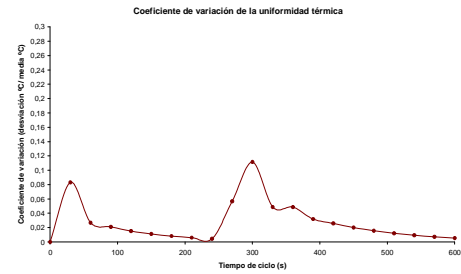
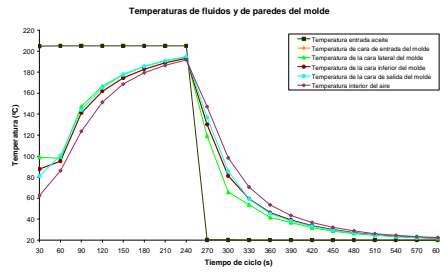
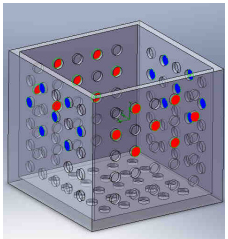
### 7 entradas superiores - 15 salidas superiores en cara opuesta



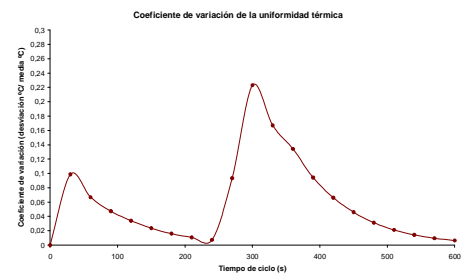
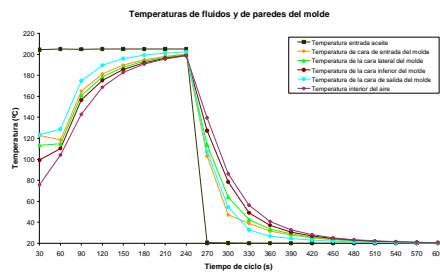
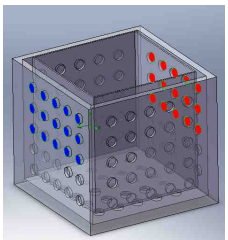
### 7 entradas superiores - 15 salidas inferiores en cara opuesta



### 14 entradas en caras enfrentadas – 14 salidas en caras enfrentadas y opuestas

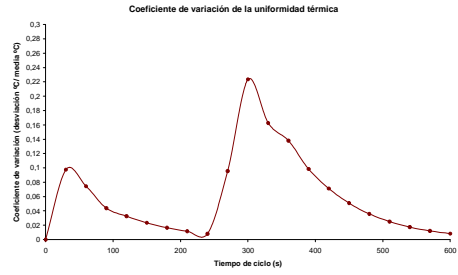
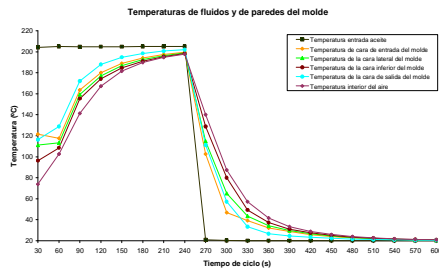


### 15 entradas superiores – 15 salidas superiores en caras opuestas



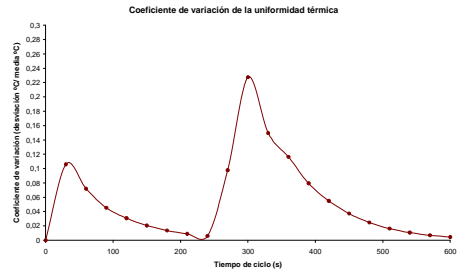
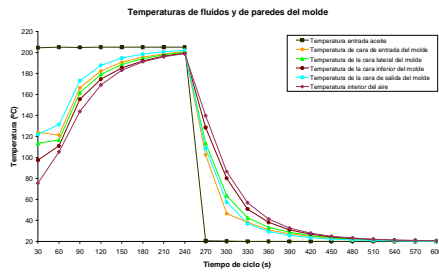
### 15 entradas superiores – 15 salidas superiores en caras opuestas canal inferior 10 mm

Idem. anterior con canal envolvente en cara inferior de 10 mm de espesor.

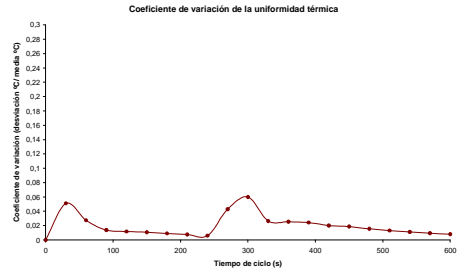
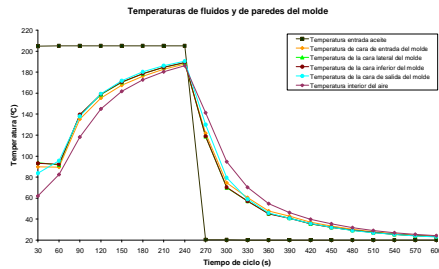
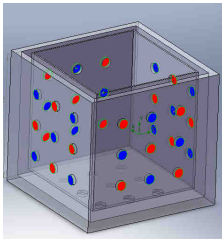


### 15 entradas superiores – 15 salidas superiores en caras opuestas canal inferior 2,5 mm

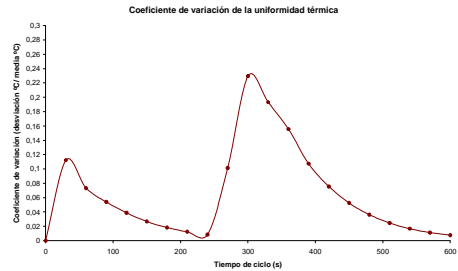
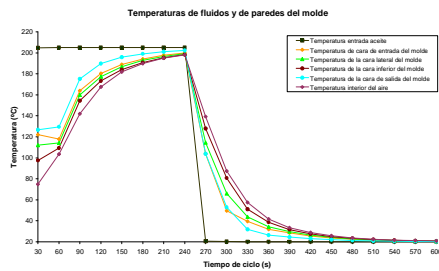
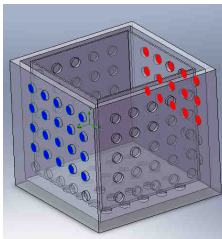
Idem. anterior con canal envolvente en cara inferior de 2,5 mm de espesor.



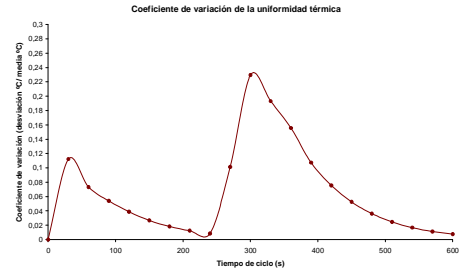
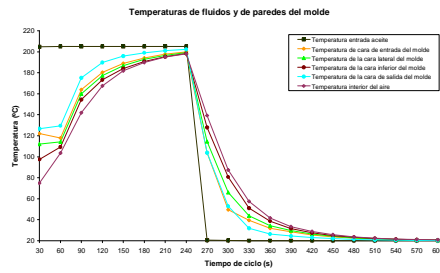
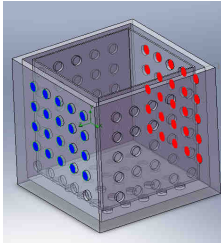
### 18 entradas en 4 caras – 18 salidas en 4 caras



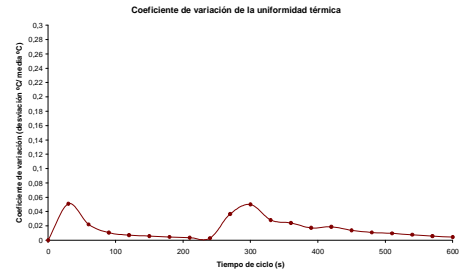
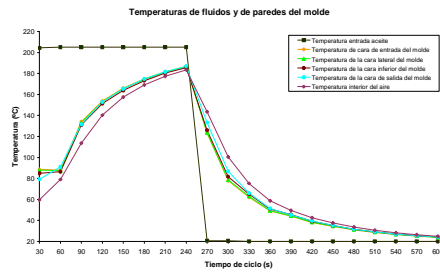
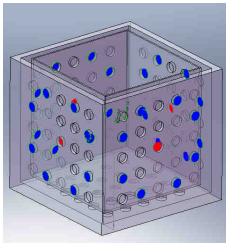
### 20 entradas superiores – 15 salidas superiores en caras opuestas



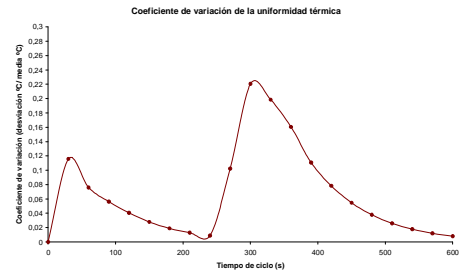
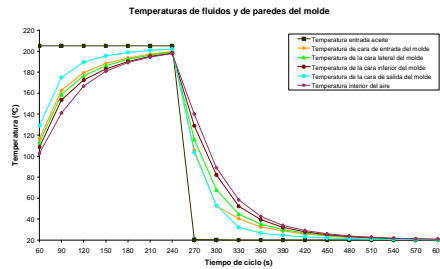
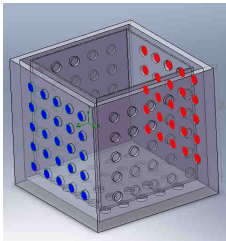
### 20 entradas superiores – 25 salidas en caras opuestas



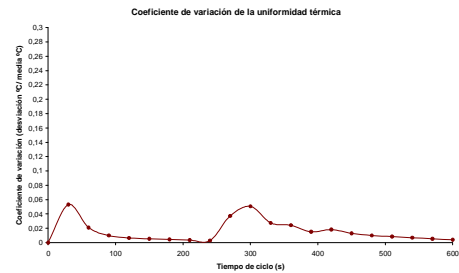
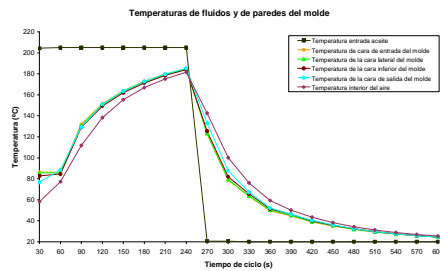
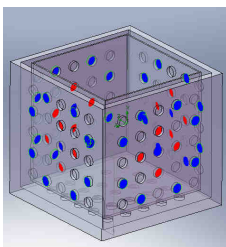
### 32 entradas en 4 caras – 4 salidas en 4 caras



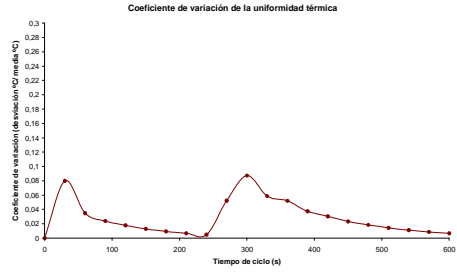
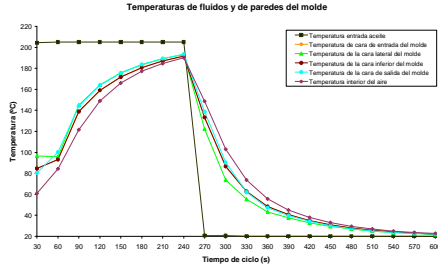
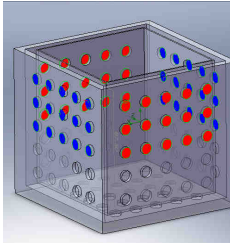
### 25 entradas – 25 salidas en caras opuestas



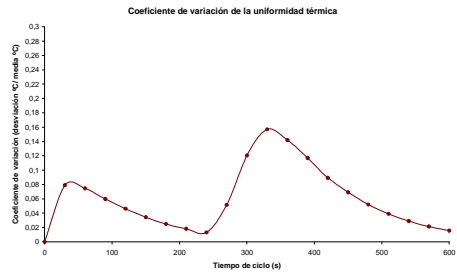
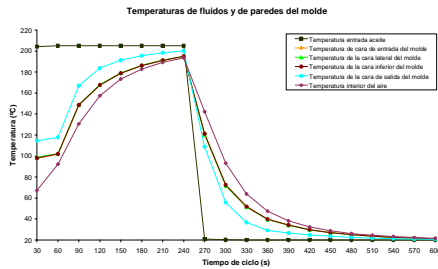
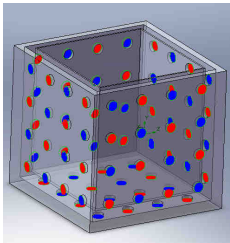
### 36 entradas en 4 caras – 16 salidas en 4 caras



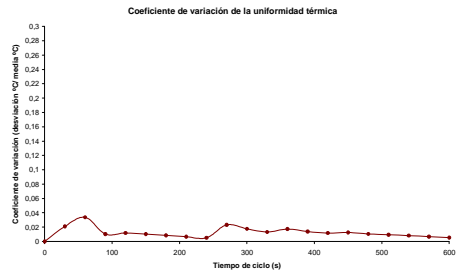
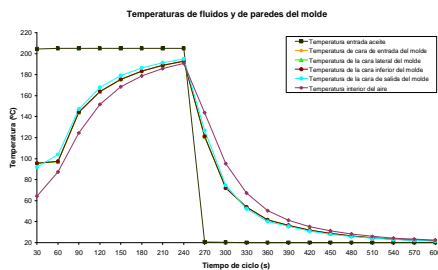
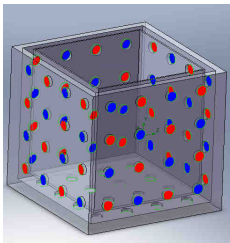
### 30 entradas superiores en caras enfrentadas - 30 salidas superiores en caras enfrentadas y opuestas



### 40 entradas en 5 caras – 40 salidas en 5 caras

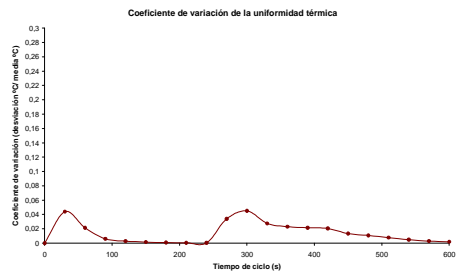
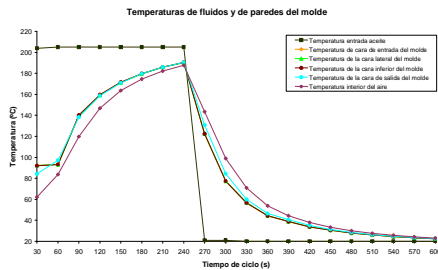


### 32 entradas en 4 caras – 32 salidas en 4 caras

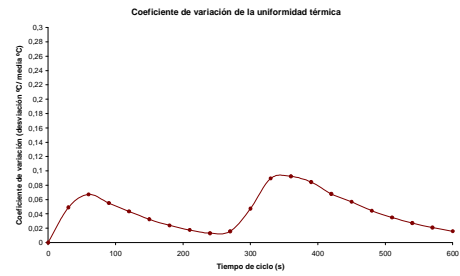
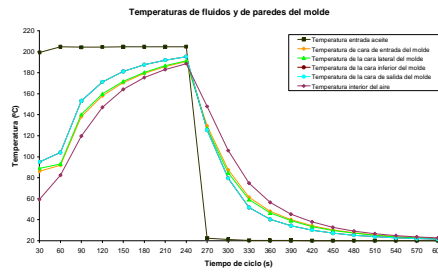
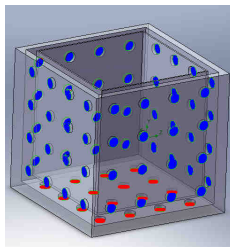


### 50 entradas en 4 caras – 50 salidas en 4 caras

Idem. diagrama anterior con 50 entradas y 50 salidas

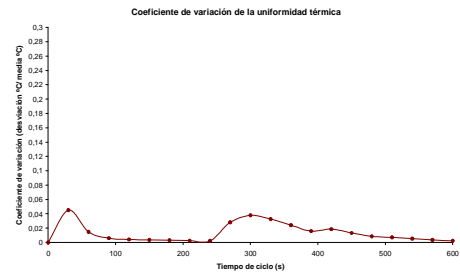
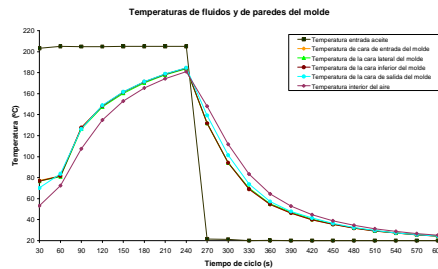


**64 entradas en 4 caras – 16 salidas en cara inferior**



**84 entradas en 4 caras – 16 salidas en 4 caras**

Idem. diagrama 36  
entradas en 4 caras – 16  
salidas en 4 caras con 84  
entradas.



**96 entradas en 4 caras – 4 salidas en 4 caras**

Idem. anterior con 96  
entradas y 4 salidas.

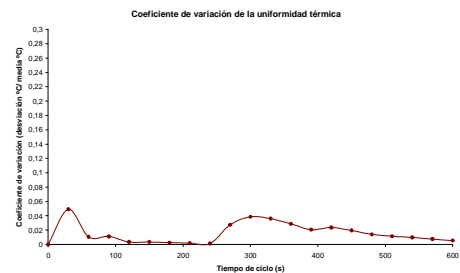
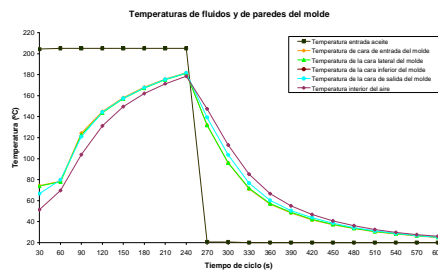


Figura 3.35: Diagramas de configuración de entradas y salidas de flujo en molde de rotomoldeo de canal envolvente (izquierda), distribución de temperaturas de la configuración de entradas y salidas en proceso simulado de rotomoldeo (centro) y el Coeficiente de variación de la uniformidad térmica de la cavidad interior del molde para la configuración de entradas y salidas simulada (derecha).

**3.9.3.4. Análisis de resultados**

Es posible listar en orden descendente las mejores configuraciones tanto desde el punto de vista de la velocidad del proceso de calentamiento como de la uniformidad térmica conseguida ente las diferentes caras del molde. Véase tabla 3.2.

No necesariamente la mejor configuración de entradas y salidas en el molde, en cuanto a uniformidad, corresponde a la de mayor velocidad de calentamiento. La notación de las entradas y salidas de flujo en el molde se han simplificado, correspondiéndose el índice **e** a entradas y **s** a salidas.

| Orden | Uniformidad                        | Velocidad                          |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1.    | 32 e - 32 s                        | 15 e - 15 s y 2 salidas inferiores |
| 2.    | 84 e - 16 s                        | 15 e - 15 s inferior estrecha      |
| 3.    | 50 e - 50 s                        | 15 e - 15 s                        |
| 4.    | 96 e - 4 s                         | 15 e - 15 s inferior amplia        |
| 5.    | 32 e - 4 s                         | 20 e - 15 s                        |
| 6.    | 36 e - 16 s                        | 25 e - 25 s                        |
| 7.    | 18 e - 18 s                        | 7 e - 15 s                         |
| 8.    | 30 e - 30 s                        | 1 e - 1 s                          |
| 9.    | 14 e - 14 s                        | 40 e - 40 s                        |
| 10.   | 64 e - 16 s                        | 2 e - 2 s                          |
| 11.   | 2 e - 2 s                          | 32 e - 32 s                        |
| 12.   | 40 e - 40 s                        | 14 e - 14 s                        |
| 13.   | 7 e - 15 s                         | 4 e - 1 s                          |
| 14.   | 15 e - 15 s                        | 64 e - 16 s                        |
| 15.   | 15 e - 15 s inferior 10 mm         | 30 e - 30 s                        |
| 16.   | 15 e - 15 s inferior 2,5 mm        | 50 e - 50 s                        |
| 17.   | 15 e - 15 s y 2 salidas inferiores | 18 e - 18 s                        |
| 18.   | 20 e - 15 s                        | 32 e - 4 s                         |
| 19.   | 25 e - 25 s                        | 36 e - 16 s                        |
| 20.   | 1 e - 1 s                          | 84 e - 16 s                        |
| 21.   | 4 e - 1 s                          | 96 e - 4 s                         |

Tabla 3.2. Tabla de ordenación de configuraciones de entradas y salidas, de mejor a peor configuración según uniformidad del proceso y velocidad de calentamiento.

#### 3.9.3.4.1. Uniformidad térmica

De los resultados expuesto puede determinarse, como era de esperar, que las configuraciones que disponen de mayor uniformidad térmica son aquellas que introducen y extraen el fluido por todas las caras posibles, de forma que se homogenice los puntos de



contacto entre el fluido y el molde. Puede observarse como introduciendo el fluido por 32 puntos distribuidos en 4 caras, y extrayendo el mismo a través de un conjunto de salidas similares, se produce una mayor uniformidad respecto a la entrada mediante 30 puntos en dos caras opuestas, y otros 30 puntos de salida en dos de las caras restantes.

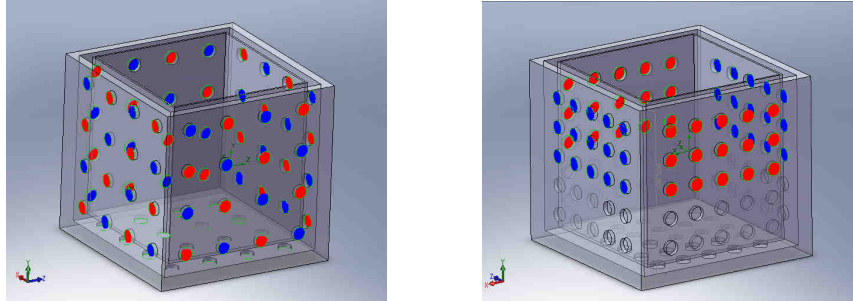


Figura 3.36: Configuración de 32 entradas y 32 salidas de flujo en el molde (izquierda) y configuración de 30 entradas y 30 salidas de flujo en el molde (derecha)

Asimismo, generalmente las configuraciones con grandes cantidades de puntos de entradas y salida permiten distribuir aún más uniformemente el fluido. Nótese dicho efecto comparando la configuración de 32 entradas y 32 salidas, respecto a su misma configuración pero de menor cantidad de aberturas, 18 entradas y 18 salidas.

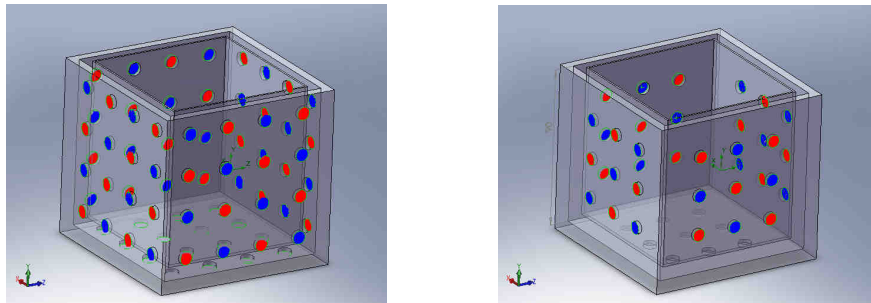


Figura 3.37: Configuración de 32 entradas y 32 salidas de flujo en el molde (izquierda) y configuración de 18 entradas y 18 salidas de flujo en el molde (derecha)

En función de las necesidades que se requieran, es posible generar una configuración concreta de entradas y salidas del fluido que permitan incrementar la velocidad del proceso, a costa de una menor uniformidad, o viceversa. Incluso es posible la elección de una configuración balanceada entre la uniformidad y la velocidad de transferencia térmica del proceso.

#### 3.9.3.4.2. Velocidad del proceso

Respecto a la velocidad del proceso, considerando fundamentalmente la etapa de calentamiento y entendida esta de forma global para el conjunto de partes activas del molde (punto central de aire y caras interiores del molde), las mejores configuraciones son aquellas que introduce en fluido por una de las caras activas, denominada de entrada, y es extraído por la cara opuesta, quedando el resto de caras activas del molde sin puntos de entrada o salida de fluido.

Estas configuraciones de mayor velocidad, introducen el fluido de forma localizada en una cara del molde, produciendo un incremento elevado de la temperatura en dicha cara y en el interior del molde, al centralizar todo el flujo en dicha zona a máxima temperatura. La distribución de estas entradas en varias caras disminuyen el caudal unitario de cada una de las mismas, y el proceso se ralentiza. Sin embargo, aquellas configuraciones producen un diferencial de temperatura mayor entre las diferentes caras del molde, lo que produce una menor uniformidad del conjunto.

Otro aspecto a destacar en el molde base de estudio, de 5 caras activas, radica en que el fluido envuelve al molde en dichas caras, esto es en todas las caras del molde exceptuando la cara superior, por lo que la cara inferior del modelo recibirá una circulación mayor de flujo debido a la distribución hidráulica interior del flujo de aceite, lo que unido a la inexistencia de aporte calorífico en la parte superior del molde produce que la temperatura media de la cara inferior del molde sea siempre mayor que la del resto de caras, en prácticamente todo el proceso. Este aspecto puede ser beneficioso para producir mayores espesores en dicha parte, pero en el caso de no ser así, la modificación del tamaño del canal envolvente en dicha zona o la incorporación nuevas salidas del fluido solventarían dicho efecto.

Por tanto, las configuraciones de mayor velocidad de calentamiento de las estudiadas corresponden a las de 15 entradas y 15 salidas en caras opuestas en sus diferentes variantes.

#### 3.9.3.4.3. Determinación de modelos óptimos

Según lo expuesto, sería muy complejo obtener una configuración óptima que disponga tanto de la máxima uniformidad como de la mayor velocidad de calentamiento

dados las limitaciones y condicionantes establecidos. Sin embargo, es posible identificar con claridad la solución óptima en función de una mayor uniformidad o de la velocidad de calentamiento.

La configuración que aporta mayor uniformidad térmica corresponde al modelo de 32 entradas y 32 salidas distribuidas en todas las caras excepto la inferior.

La configuración de mayor velocidad de proceso corresponde al modelo de 15 entradas y 15 salidas distribuidas en dos caras opuestas e incorporando dos salidas centrales en la cara inferior.

De las 5 configuraciones con mejor uniformidad térmica, el modelo de 32 entradas y 32 salidas dispone de la mejor velocidad de proceso.

De manera análoga, la configuración de 15 entradas y 15 salidas en caras opuestas dispone de la mejor uniformidad térmica, perteneciendo a las 5 mejores configuraciones de velocidad de proceso.

Para establecer un completo marco comparativo entre diferentes modelos habría que ponderar la relevancia tanto de las diferencias de prestaciones entre los diferentes modelos y la relevancia del indicador en el proceso en sí. Es decir, debería evaluarse las diferencias netas entre las diferentes uniformidades de los modelos, pues en muchos casos, las uniformidades son muy similares. Lo mismo sucede con la velocidad de calentamiento, cuyas diferencias entre varios modelos son despreciables.

Por otra parte, las reducciones del tiempo de ciclo debido al incremento de la velocidad del calentamiento pueden ser considerables, mientras que en el caso de la uniformidad, dichas mejoras pueden ser despreciables.

Si se compara la incidencia de la velocidad de calentamiento en el proceso de simulación, concretamente para los mejores modelos de 15 entradas y 15 salidas como mejor modelo en velocidad de calentamiento, y 32 entradas y 32 salidas como de mejor uniformidad, se puede observar como la reducción de tiempo de proceso de calentamiento del primer modelo respecto del segundo es de hasta el 29,03% para la cara de entrada de los moldes, y del 21,97% para el punto central interior de aire.

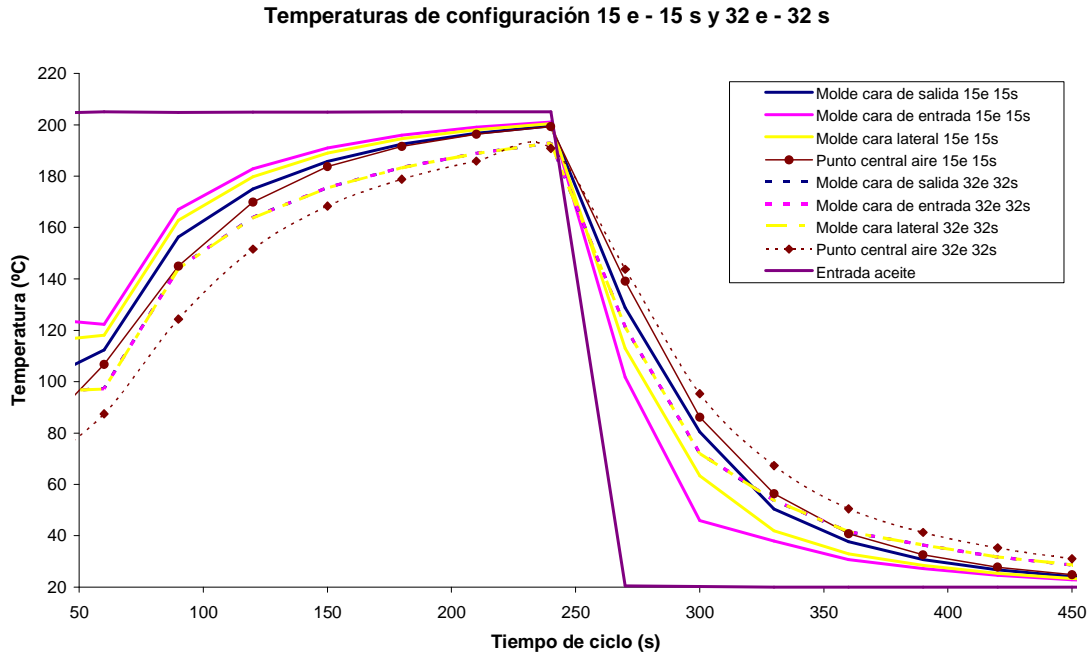


Figura 3.38: Comparativa de temperaturas de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente

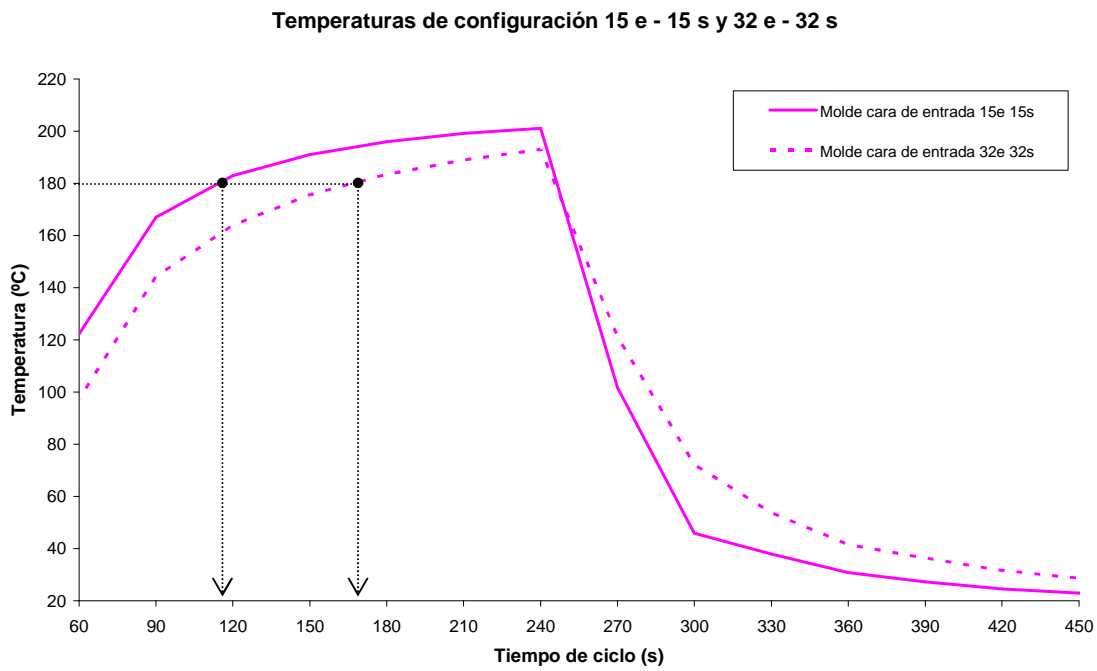


Figura 3.39: Comparativa de temperaturas de caras de entradas de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente

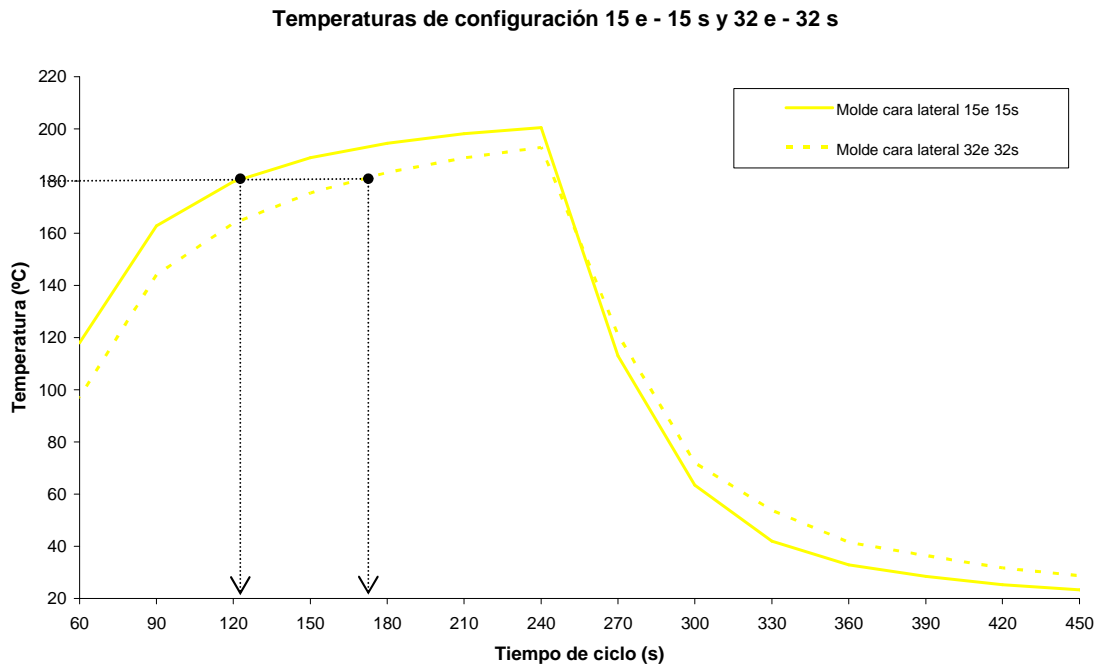


Figura 3.40: Comparativa de temperaturas de caras laterales de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente

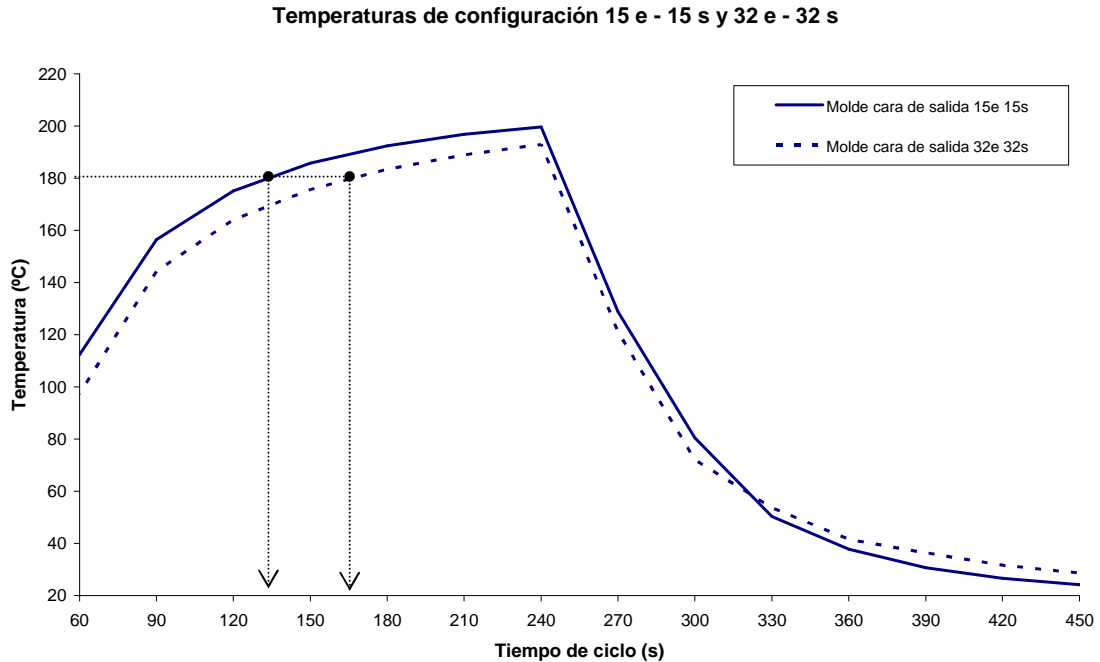


Figura 3.41: Comparativa de temperaturas de caras de salidas de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente

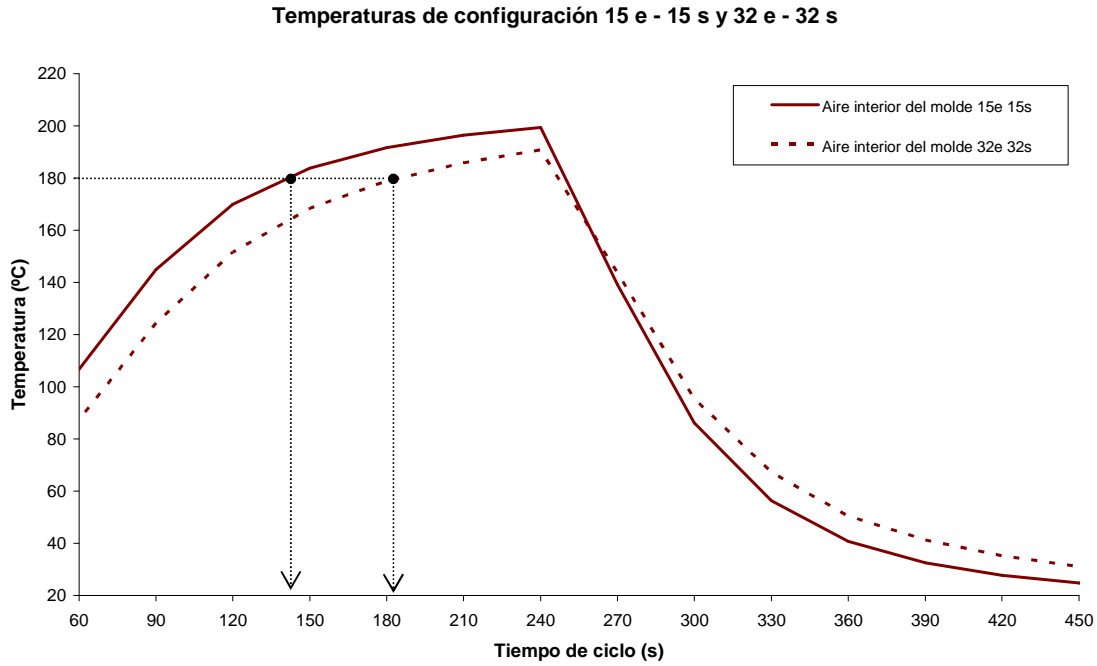


Figura 3.42: Comparativa de temperaturas de punto interior de aire de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente

Realizando el mismo análisis para la uniformidad térmica, entre dichos modelos, el segundo modelo dispone de una mayor uniformidad de hasta un 80% en el proceso de calentamiento y de hasta un 92,92% en el de enfriamiento. Cabe destacar que estas diferencias son puntuales, en intervalos inferiores a un minuto.

Finalmente respecto al estudio del coeficiente de variación de la uniformidad térmica, debe tenerse en cuenta que un valor, adimensional, de 0,1 implica una desviación media de temperatura de 10° C entre las diferentes partes del molde y para una temperatura media de 100 ° C (recuérdese que dicho factor resulta del cociente entre la desviación típica de un conjunto de temperaturas y el valor medio de las mismas).

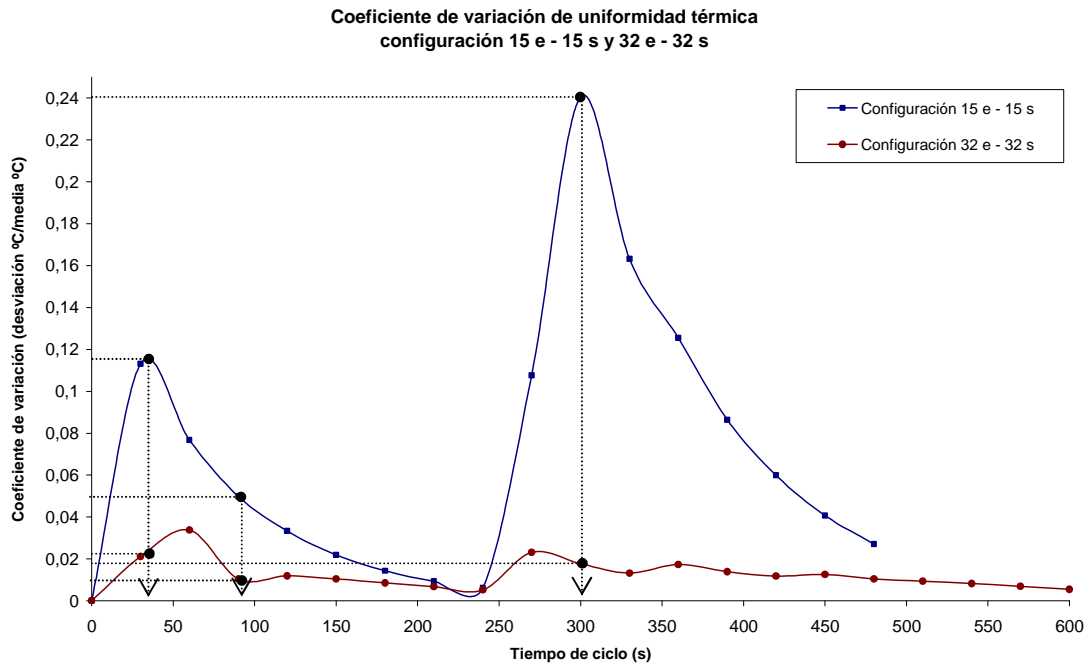


Figura 3.43: Comparativa del coeficiente de variación de la uniformidad térmica de caras de molde de configuración de 32 entradas y 32 salidas y configuración de 15 entradas y 15 salidas, en procesos simulados de rotomoldeo de molde de canal envolvente

Según lo expuesto anteriormente, en la comparación de dos configuraciones debe considerarse cuán relevante es la mejora de un indicador respecto al otro, para verificar la completa idoneidad del modelo.

Existen otras configuraciones que si bien no destacan en ninguno de los dos indicadores utilizados para la comparación entre diferentes tipos de distribuciones de entrada y salida de flujo de aceite, mantienen una relación uniformidad-velocidad de calentamiento intermedia, como pueden ser los modelos de 2 entradas y 2 salidas, o 14 entradas y 14 salidas. Estas configuraciones mantienen una uniformidad aceptable, a la vez de una velocidad de calentamiento razonable siendo buenas opciones cuando se requiera mantener adecuadamente ambos parámetros simultáneamente.

### 3.9.3.5. Selección de configuración para molde prototipo

Con el fin de continuar en el desarrollo completo del molde prototipo de rotomoldeo por calentamiento mediante fluido térmico debe seleccionarse una configuración concreta, para posteriormente proceder a su fabricación, ensayo y validación.

Las configuraciones estudiadas con anterioridad han sido evaluadas desde el punto de vista del proceso térmico del moldeo rotacional, sin embargo, también existen otros aspectos de importancia que influyen en la elección de un molde, como es su complejidad geométrica, que podría dificultar o incluso imposibilitar su fabricación en un proceso real de fabricación del molde. La dificultad o costes de su fabricación, la durabilidad del molde o la complejidad de su manipulación en el propio proceso, entre otros, pueden ser condicionantes que impidan la ejecución de determinadas configuraciones de molde, por muy eficientes u óptimos para el proceso sean.

De las configuraciones estudiadas, se ha seleccionado definitivamente el modelo de 25 entradas y 25 salidas como configuración básica para la continuación del desarrollo del molde prototipo. Como se expone en el siguiente apartado, esta configuración dispone de todas las entradas en una sola cara del molde, al igual que las salidas de flujo, dispuestas en otra cara opuesta a la de las entradas. Esta configuración permite su mecanizado de forma relativamente sencilla, además de requerir un sistema de “inyección” de flujo más simple que si se tratase de múltiples entradas y salidas en una misma cara., donde se requeriría una separación previa del flujo según fuese de entrada o salida, complicando la fabricación del molde.

Este tipo de configuraciones son de fácil implantación en un molde, simplificando tanto su fabricación, como su manipulación y control en el proceso de rotomoldeo real, en comparación, por ejemplo, del modelo de 32 entradas y 32 salidas, las cuales se encuentran distribuidas en varias caras activas del molde y cuya aplicación real resultaría muy compleja y costosa.

Por otra parte, la configuración de 25 entradas y 25 salidas es un modelo versátil, ya que otras configuraciones pueden obtenerse mediante la simplificación de dicha configuración, mediante el cierre de las aberturas que se deseen, obteniéndose modelos de 1, 4, 7, 15 ó 20 entradas y/o salidas, entre otras posibles configuraciones, entre las que se encuentra la configuración de 15 entradas y 15 salidas, considerada óptima en cuanto a velocidad de proceso. De esta forma es posible experimentar y validar múltiples configuraciones en un proceso de moldeo rotacional real.



### 3.9.4. Desarrollo de manifold de molde de rotomoldeo

#### 3.9.4.1. Consideraciones iniciales

El uso de aceite térmico para los procesos de transferencia térmica requiere de la manipulación de dicho fluido. Esto implica la utilización de un sistema de bombeo, compuesto fundamentalmente por una bomba centrífuga de aceite y una pequeña red de conductos. Dicho sistema dispone de un único punto de impulsión, debido a que las bombas están configuradas generalmente con una única salida de flujo. Por tanto, existe una interfase del flujo hidráulico que se inicia en un único punto (la salida de impulsión de la bomba) y finaliza en las múltiples entradas que se disponen en el molde, según la configuración elegida. De igual forma, las múltiples salidas deben recircularse nuevamente hasta un tanque de recepción de aceite, para proceder posteriormente a su nueva introducción en el molde, si se tratase de un circuito cerrado.

Los resultados obtenidos en los procesos de diseño y cálculo anteriormente expuestos están basados en una serie de condicionantes geométricos, de flujo, temperatura, etc. Por tanto, para continuar con el proceso de diseño de un molde prototipo de rotomoldeo sin modificar dichos resultados, deben mantenerse las hipótesis iniciales de estudio, fundamentalmente las de flujo. Para ello debe diseñarse un distribuidor o manifold que a partir de un único punto de aceite (salida de la impulsión del sistema de bombeo) distribuya el flujo de aceite en las múltiples entradas al molde (puntos de introducción de aceite en el molde) de forma que permanezca invariable la geometría del canal envolvente de aceite, la temperatura de entrada y el flujo volumétrico del aceite.

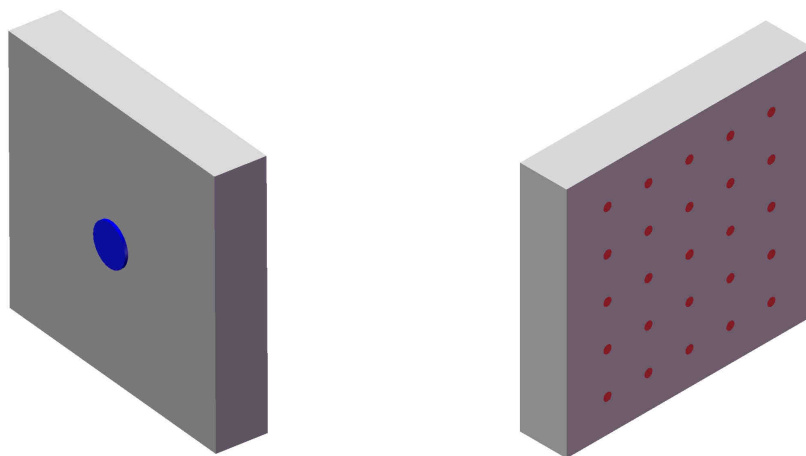


Figura 3.44: Configuración básica inicial de manifold de 1 entrada y 25 salidas.

#### 3.9.4.2. *Limitaciones iniciales y diseño básico de manifold*

Como primer aspecto de diseño del manifold a desarrollar, éste deberá ser exterior al molde y a su envolvente de aceite, manteniendo los condicionantes geométricos ya desarrollados, así como permitir la entrada de aceite en el molde desde un único punto externo hasta un máximo de 25 puntos interiores del canal envolvente, según la distribución de entradas en el molde seleccionada.

El molde prototipo a desarrollar dispondrá de una zona de introducción de aceite localizada en una de las caras del molde, con 25 aberturas. En su cara opuesta, se centralizarán de forma análoga otras 25 aberturas para la salida del fluido. En el resto de caras no se producirá ninguna transferencia de flujo volumétrico de entrada ni salida desde el exterior.

Respecto a la posible afección que pueda producir el manifold sobre la temperatura, sobre todo por la pérdida de la temperatura de entrada del aceite, se ha reducido en la medida de lo posible mediante la fabricación de dicho componente en material de mínimo coeficiente de transmisión de calor así como el uso, en caso necesario, de elementos aislantes que reduzcan las pérdidas de calor en dicha zona. Por tanto, los efectos de pérdida de temperatura no serán considerados como condicionantes para el diseño del manifold. En cualquier caso, las posibles pérdidas de temperatura en dicho elemento pueden ser compensadas en el proceso incrementando la temperatura de entrada de aceite, corrigiendo así la temperatura de aceite hasta alcanzar la deseada en la entrada del molde.

El único factor que pudiera verse afectado por la introducción de un manifold en el molde correspondería al flujo volumétrico de aceite, el cual se ha considerado distribuido uniformemente entre todas las aberturas de entrada del molde y está enormemente condicionado por las características geométricas del manifold tales como la rugosidad, dimensiones interiores, turbulencias, pérdidas de presión, etc. pudiendo producir que determinadas zonas de entrada dispongan de un mayor o menor flujo de aceite, afectando drásticamente al proceso de transferencia térmica y su uniformidad, y por tanto, a la validación de los desarrollos realizados.

Para obtener una velocidad adecuada de flujo, la entrada única del manifold será de forma circular de 12,5 mm de diámetro, para facilitar su posterior acople a accesorios hidráulicos. La velocidad de flujo en la entrada para un flujo volumétrico de  $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , y

considerando como fluido de referencia agua en condiciones normales, es de 0,5 m/s. Cada una de las 25 aberturas de salida del manifold será de 3 mm de diámetro, siendo en tal caso la velocidad de cada salida de 0,34 m/s. En ambas situaciones la velocidad de flujo puede considerarse baja, reduciendo las pérdidas de presión y limitando los procesos turbulentos.

#### 3.9.4.3. *Desarrollo de manifold*

Para el desarrollo del manifold se han diseñado diferentes configuraciones geométricas con el objetivo de minimizar el espesor del mismo, su tamaño y el peso del conjunto final del molde. Igualmente, se ha pretendido maximizar la uniformidad del flujo volumétrico en todas las aberturas de salida del fluido del manifold, o lo que es lo mismo, las entradas a la envolvente exterior del molde.

La metodología de desarrollo utilizada ha sido la siguiente:

- Generación de modelos 3D de manifolds mediante herramientas CAD
- Simulación de flujo mediante EFD.Lab de los manifolds generados
- Obtención de resultados de configuración de flujos
- Análisis de resultados y estudio comparativo.

En la figura 3.45 se muestran las diferentes configuraciones de manifolds estudiadas. En todos los casos se ha analizado el flujo volumétrico y la presión interna en el manifold, estableciéndose como principal objetivo obtener la mayor uniformidad de flujo volumétrico entre las diferentes aberturas de salida.

Se han analizado configuraciones simples mediante canales interiores circulares, piramidales o elípticos, entre otros, hasta configuraciones complejas de tipo mallada o de sección variable. En todos estos casos se producen flujos preferenciales en determinadas zonas impidiendo obtener un flujo equivalente y uniforme en todas las aberturas de salida.

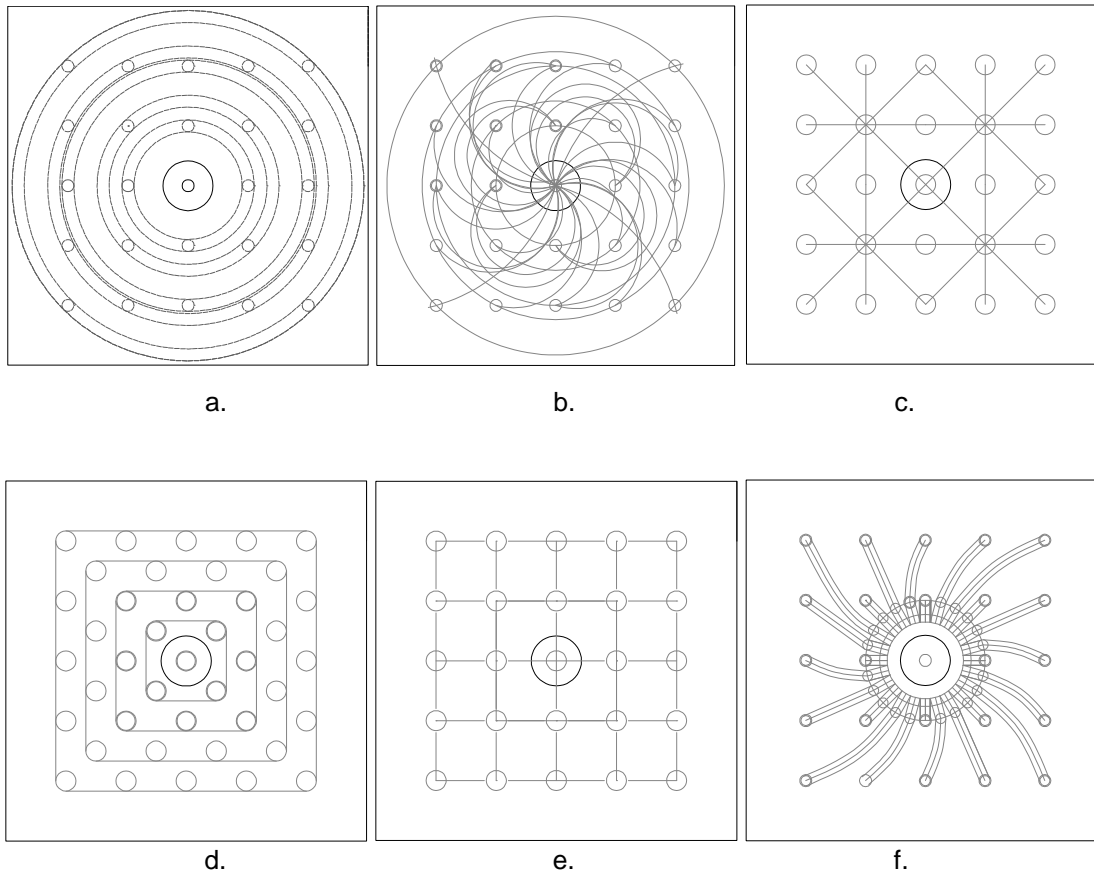


Figura 3.45: Manifold de canales circulares interiores concéntricos (a), manifold de canales interiores elípticos (b), manifold de canales interiores en ramificación piramidal múltiple (c), manifold de cavidades interiores piramidales (d), manifold de canales interiores en ramificación mallada (e) y manifold de canales interiores ramificados cilíndricos (f).

Finalmente, se ha desarrollado un manifold de canales interiores cilíndricos, ramificados y de sección constante, desde un único colector de entrada, hasta las múltiples salidas de similar flujo volumétrico. Este manifold, denominado *octopus* por su configuración geométrica, se ha obtenido a partir de la consideración de mantener la misma pérdida de presión en los diferentes canales interiores del manifold, produciendo así un flujo uniforme en cada orificio. Para ello, se ha mantenido una sección constante de 3 mm de diámetro a modo de canales interiores, y una longitud de canal tal que el trazado de todos los canales disponga de la misma pérdida de presión. De esta forma, es posible obtener las mismas condiciones de flujo interior en todos los canales.

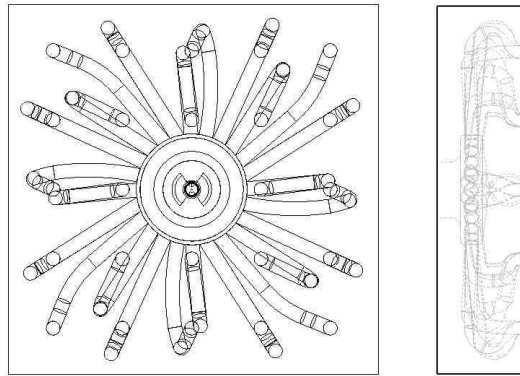


Figura 3.46: Manifold octopus, de canales interiores ramificados, cilíndricos, sección constante y longitudes equivalentes. Vista frontal (izquierda) y vista lateral con trazado interior oculto (derecha).

El manifold octopus se ha generado a partir de 6 canales principales los cuales, a modo de patrones, han sido cuadruplicados radialmente, hasta generar 24 canales totales.

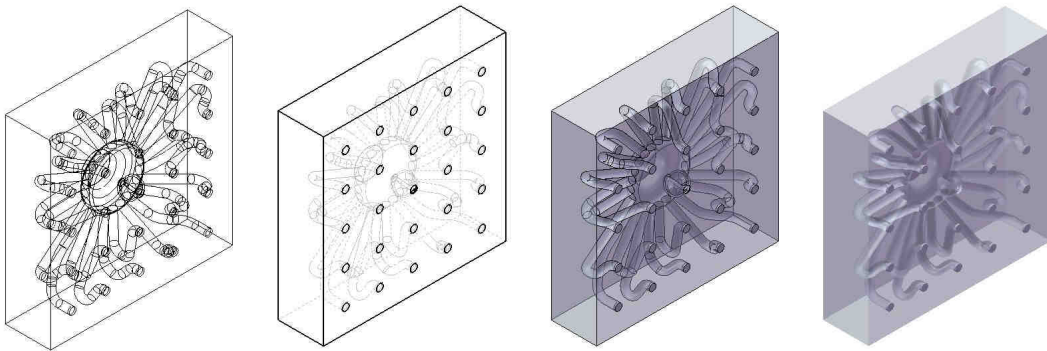


Figura 3.47: Vistas varias de manifold octopus.

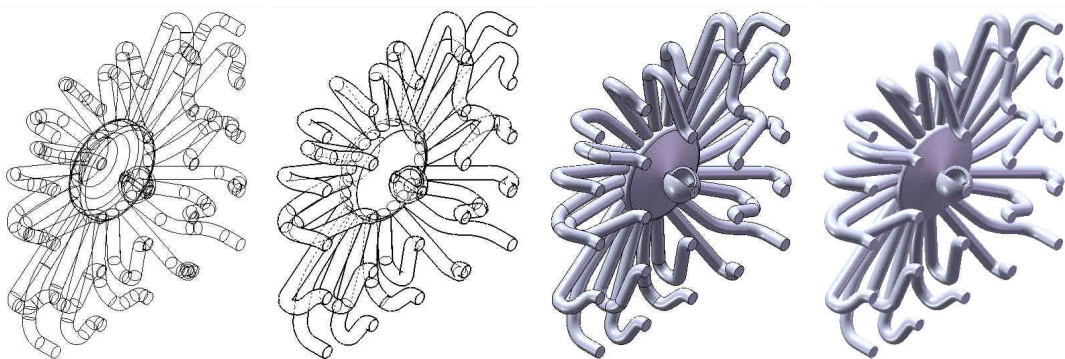


Figura 3.48: Vistas varias de canales interiores de manifold octopus.

La abertura central de salida del manifold dispone de una configuración especial, debido a que al situarse enfrentada a la entrada de flujo del manifold se produce un trayecto preferencial de paso del flujo por el que discurriría en mayor medida que el resto de canales. Para eliminar este efecto se ha desarrollado un doble canal esférico que permite

igualar la pérdida de carga en dicha zona al del resto de los canales, garantizando un paso de flujo razonablemente equivalente.

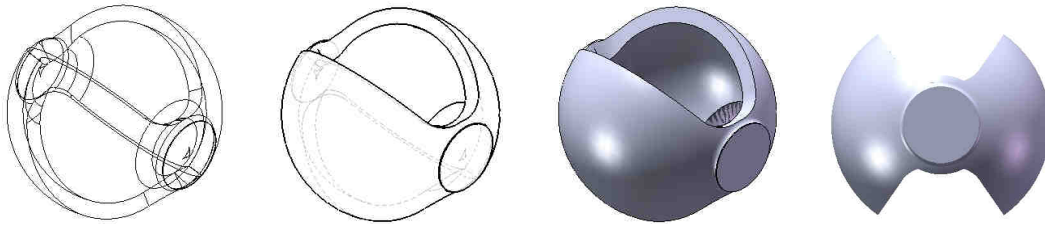


Figura 3.49: Vistas varias del canal doble esférico central del manifold octopus.

Una de las principales bondades del manifold octopus, y razón por la que varios de los manifolds estudiados fueron rechazados radica en que el manifold desarrollado permite el cierre de una o varias aberturas de salida, cuales quiera que sean, reestructurando el flujo de forma muy uniforme entre las restantes aberturas. Este importante fenómeno permite ejecutar configuraciones de entradas o salidas de flujo en el manifold según se desee sin afectar a la uniformidad en la introducción del fluido en el interior del molde.

Los flujos volumétricos circulantes en el interior de los canales del manifold octopus disponen de unos valores muy próximos entre sí, siendo el mejor de los distribuidores obtenidos. La variación de la uniformidad de flujos entre las diferentes aberturas de salidas, en cualquier caso, es inferior al 6% tanto para el conjunto de 25 salidas como para diferentes supuestos de salidas distribuidas aleatoriamente. Dicha uniformidad ha sido obtenida porcentualmente, para un caudal de aceite de  $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , mediante el cociente de la desviación típica y la media aritmética de los diferentes flujos simulados en las diferentes configuraciones de salida (15, 20 y 25 salidas).

De forma análoga al coeficiente de variación de la uniformidad térmica, bajos valores del coeficiente de variación de la uniformidad de flujo indicará una gran semejanza de los flujos volumétricos de las distintas aberturas de salidas mientras que altos valores de dicho coeficiente supondrá mayores diferencias de flujo entre aberturas.

A diferencia de los procesos de transferencia térmica, los cuales son procesos transitorios totalmente cambiantes durante el proceso de moldeo rotacional, el flujo volumétrico de aceite entrante y saliente del molde puede considerarse permanente. Dicho esto, la comprobación de la uniformidad del flujo volumétrico de aceite se realizará mediante un estudio de estado no transitorio, sino permanente, finalizándose el proceso de

simulación una vez las iteraciones del proceso de simulación alcancen un criterio de convergencia tal y como se muestra en las figuras de uniformidad.

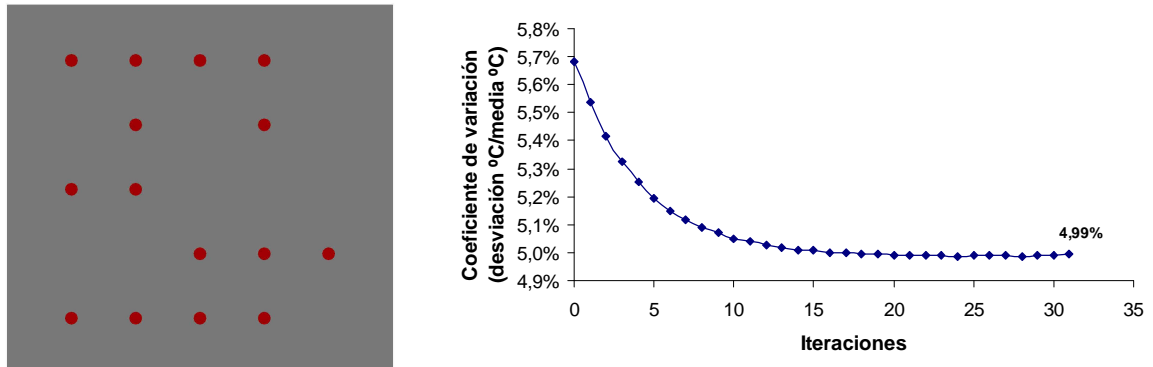


Figura 3.50: Configuración de 15 aberturas de salida de flujo en manifold (izquierda) y coeficiente de variación de la uniformidad del flujo volumétrico del conjunto de 15 aberturas de salida (derecha)

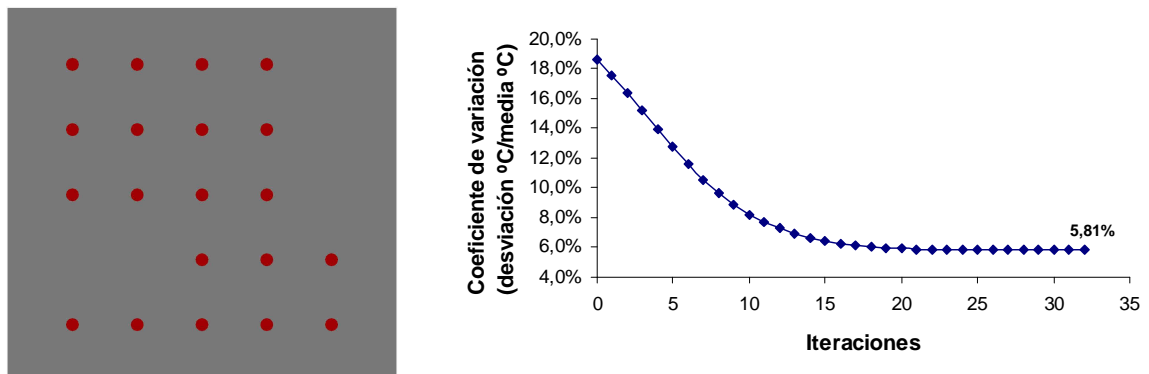


Figura 3.51: Configuración de 20 aberturas de salida de flujo en manifold (izquierda) y coeficiente de variación de la uniformidad del flujo volumétrico del conjunto de 20 aberturas de salida (derecha)

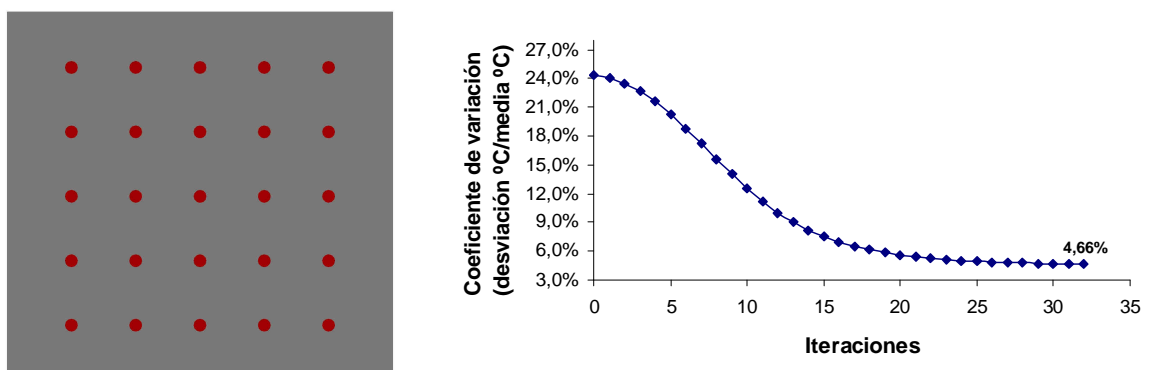


Figura 3.52: Configuración de 25 aberturas de salida de flujo en manifold (izquierda) y coeficiente de variación de la uniformidad del flujo volumétrico del conjunto de 25 aberturas de salida (derecha)

El manifold desarrollado ha sido obtenido fundamentalmente atendiendo a las necesidades de introducción de flujo en el molde, sin embargo, el mismo igualmente será utilizado para la extracción del fluido, que aun no teniendo la misma importancia, a efectos prácticos también requiere unificar los flujos de salida en único punto para simplificar la integración del molde en una máquina real de moldeo rotacional. Por tanto, el manifold octopus será integrado en el molde tanto para la introducción como para la extracción del flujo, obteniéndose un conjunto manifold completo que conformará la parte exterior del canal envolvente por el que transcurrirá el flujo de aceite.

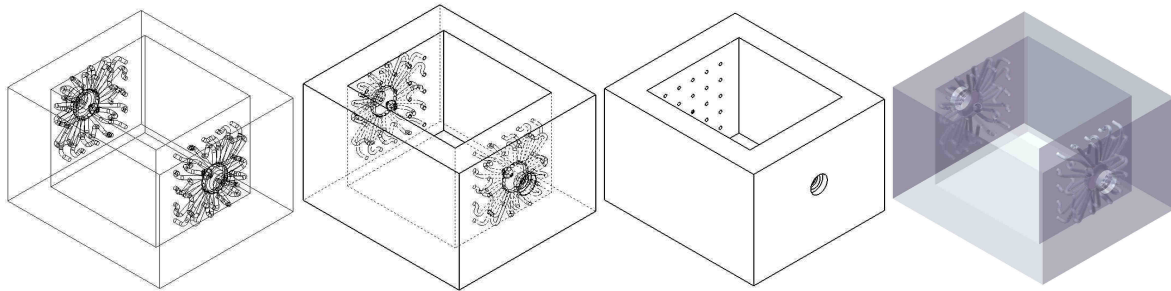


Figura 3.53: Vistas varias del manifold octopus completo, en caras opuestas.

Finalmente, el manifold, fabricado en una sola pieza, incorporará las cavidades necesarias para su correcto ensamblaje con el resto de elementos del conjunto del molde, permitiendo así obtener un molde completo perfectamente acoplado.

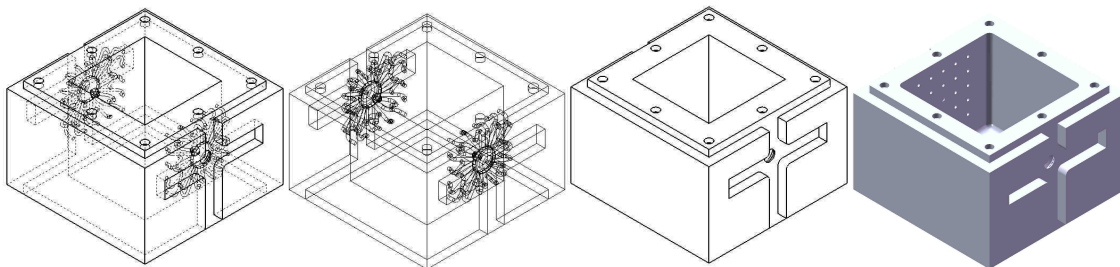


Figura 3.54: Vistas varias de diseño final del manifold octopus completo, en caras opuestas, incluyendo cavidades de acople de soportes y otros elementos.

### 3.9.5. Diseño completo de molde de rotomoldeo

Para un completo desarrollo del molde de rotomoldeo, su posterior fabricación real y el ensamblaje con una máquina de moldeo rotacional es necesario el diseño y ejecución de la cavidad interior del molde así como una serie de elementos de utillaje, compuestos principalmente por:

- Estructura soporte
- Tapa de abertura del molde
- Juntas y otros accesorios



### 3.9.5.1. Cavity interior del molde

Como se ha establecido anteriormente, el desarrollo del molde de rotomoldeo por calentamiento envolvente de aceite se ha basado en un tipo de pieza estándar a fabricar, de forma cúbica y de 100 mm de lado y en la generación de una cavidad de molde electroconformada en níquel con un espesor de 1 mm. A partir de estas consideraciones y del modelo básico de cavidad de molde generada para los análisis de los apartados anteriores, se diseña una cavidad electroconformada definitiva, cuyas principales diferencias respecto al modelo básico son las siguientes:

- Redondeo de aristas exteriores e interiores con radio medio de 5 mm
- Ejecución de inclinación mínima interior de 1° para facilitar la extracción de piezas fabricadas
- Incorporación de base soporte de anclaje al conjunto del molde
- Redondeo de bordes superiores de base soporte para facilitar el proceso de electroconformado

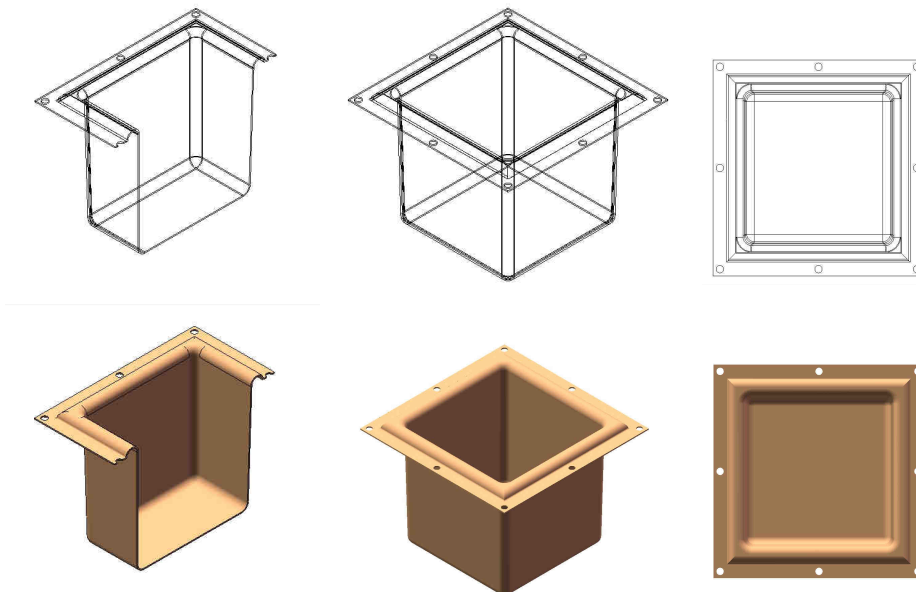


Figura 3.55: Vistas varias de diseño final de cavidad interior de molde de níquel de 1 mm de espesor.

### 3.9.5.2. Estructura soporte

El molde de rotomoldeo deberá estar sujeto a la máquina de moldeo rotacional la cual, además de suministrar el fluido para la transferencia térmica en los procesos de

calentamiento y enfriamiento, generará los movimientos giratorios necesarios para que se produzca la fabricación de las piezas. Por tanto, debe diseñarse un sistema soporte que permita la conexión de los conductos de fluidos así como el anclaje al brazo de la máquina de moldeo rotacional.

Se diseña un conjunto de soportes superior e inferior sobre los cuales se montan el manifold, cáscara de níquel, juntas, tapas y demás elementos accesorios. Por otra parte, se desarrollan dos crucetas laterales para el cierre y acople de los soportes superior e inferior, la conexión de los conductos y el anclaje a la máquina de moldeo rotacional.

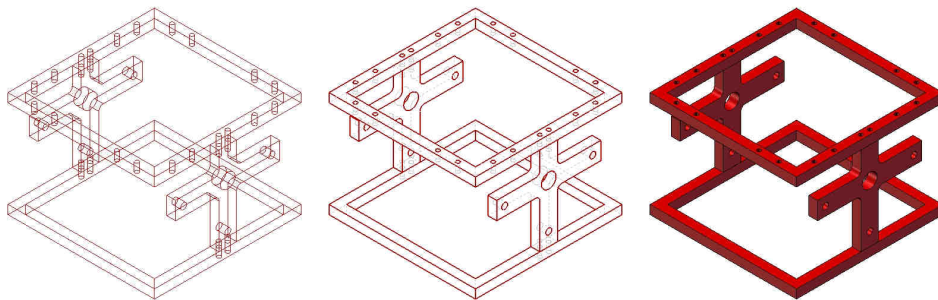


Figura 3.56: Vistas varias de soportes superior, inferior y crucetas laterales.

#### 3.9.5.3. *Tapa de abertura del molde*

Para la introducción del material en forma de polvo para la fabricación de las piezas y la extracción de éstas una vez rotomoldeadas se genera una tapa de acceso a través de la cara no activa del molde, anclada a los soportes del mismo.

#### 3.9.5.4. *Juntas y otros accesorios*

Finalmente también debe diseñarse un conjunto de elementos secundarios tales como juntas, tornillería y accesorios de montaje de sondas de temperatura para una completa definición del molde de rotomoldeo.

### 3.9.6. Versatilidad del molde de rotomoldeo diseñado

Una de las principales novedades del molde diseñado se encuentra en su amplia versatilidad para la fabricación de diferentes tipos de piezas sin modificar el utillaje utilizado, ni tan siquiera el distribuidor de aceite u otros elementos.

El molde diseñado permite el intercambio de diferentes tipos de cavidades interiores de molde, fabricadas mediante electroconformado, y dentro de los límites máximos de 102 mm de ancho, largo y alto, para la fabricación de piezas de cualquier geometría pero considerando la parte superior de la pieza inactiva, para el acceso al molde.

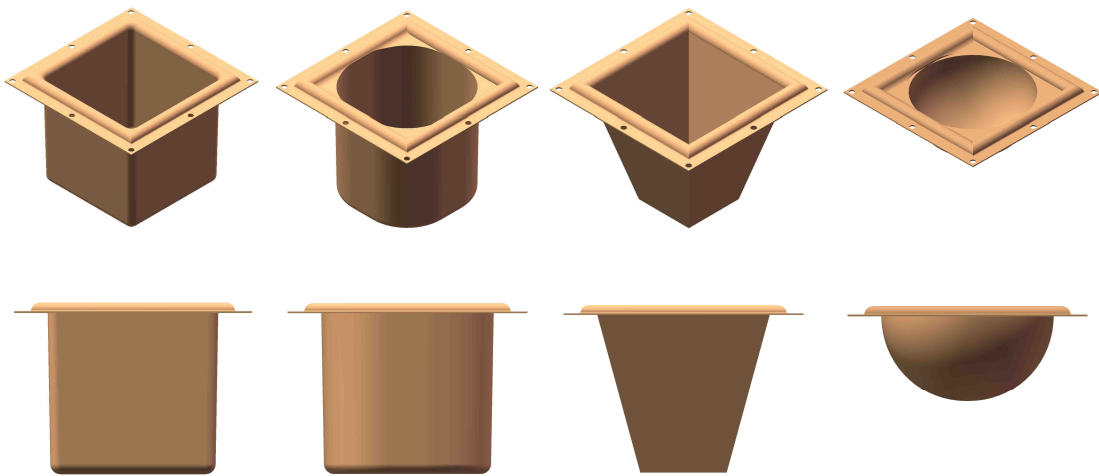


Figura 3.57: Vistas varias de diseños básicos de cavidad interior de molde de níquel de 1 mm de espesor. De izquierda a derecha, en forma cúbica, cilíndrica, tronco piramidal y semiesférica.

De esta manera, sin desacoplar el molde de la máquina de moldeo rotacional, únicamente mediante la apertura de la tapa del molde es posible extraer la cavidad interior e introducir una nueva produciendo las siguientes mejoras en el proceso:

- Ahorro considerable de costes en fabricación de moldes y utillajes.
- Reducción de tiempo de cambio de molde
- Fabricación de series cortas de piezas

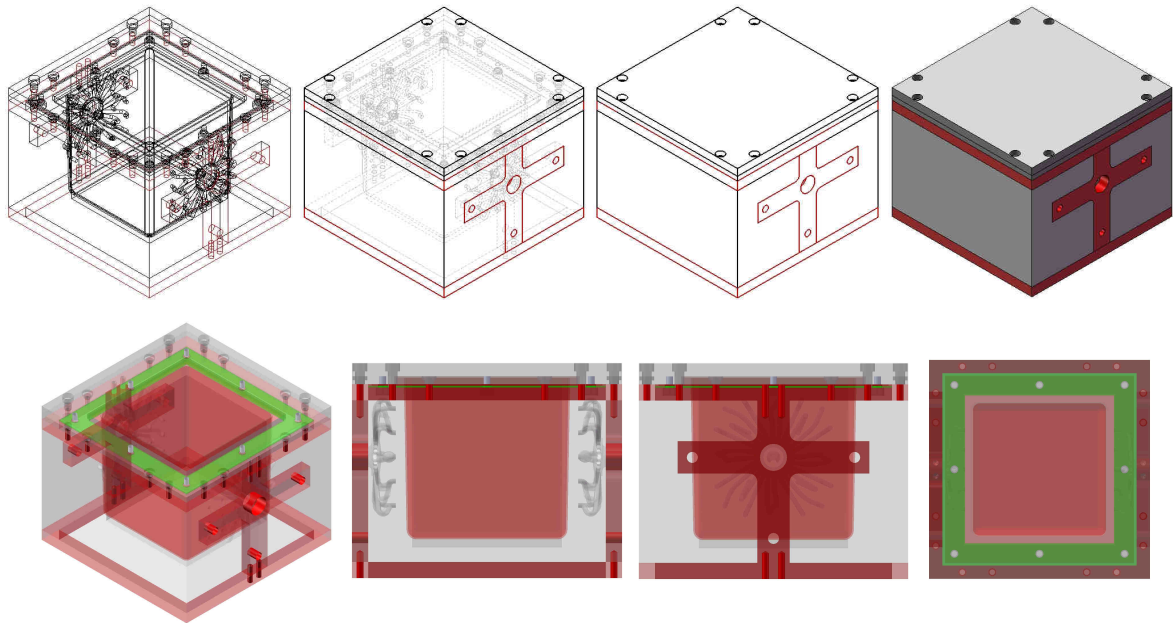


Figura 3.58: Vistas varias de diseño final de molde de rotomoldeo completo de calentamiento por aceite a través de canal envolvente, manifold octopus y cavidad interior del molde de níquel de 1 mm.

## *Capítulo IV*

### **PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO**



## **4. PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se detallan los procesos de fabricación llevados a cabo para la obtención del molde de rotomoldeo. No se pretende desarrollar dichos procesos sino presentarlos de manera básica, enunciando sus procedimientos de fabricación, principales características y ventajas, así como la importancia de su utilización en el estudio que se ha realizado para la validación del molde de rotomoldeo diseñado.

Desarrollado, simulado y evaluado por completo dicho molde de rotomoldeo por envoltente de aceite se ha procedido a su fabricación para posteriormente, y mediante una máquina de moldeo rotacional también diseñada y fabricada para el presente estudio de investigación, realizar la validación de los cálculos, diseños y simulaciones realizadas.

Múltiples son las posibilidades de fabricación de las diferentes partes del molde de rotomoldeo diseñado, tanto en procesos de fabricación como en utilización de materiales, sin embargo, la elección de ambos aspectos resulta primordial para cumplir con los condicionantes establecidos en las bases de cálculo y diseño, y consecuentemente, con los objetivos y resultados esperados del molde diseñado.

El proceso por excelencia utilizado en la producción de moldes es el mecanizado por arranque de material, además de los procesos de fundición y electrofundición. El mecanizado por arranque de material puede ser realizado en máquinas -herramienta de arranque de viruta mediante cuchillas o por arranque de partículas mediante abrasión. Sin embargo, no siempre el arranque de material en máquinas CNC resuelve todos los problemas de mecanizados complejos. Las limitaciones propias del mecanizado impiden por ejemplo conseguir geometrías angulosas, inaccesibles o cuya profundidad y posición sean inviables por fresado. Además, estas tecnologías dificultan la obtención de moldes de bajos espesores, que permitan maximizar las transferencias de calor que se producen en el proceso de moldeo rotacional. [1]

Como aspecto innovador necesario para el completo desarrollo del molde de rotomoldeo diseñado se han utilizado tecnologías de prototipado rápido (Rapid Prototyping) y tecnologías de fabricación rápida de herramientas y utillaje (Rapid Tooling) que introducen varios aspectos competitivos en el proceso de moldeo rotacional, como son la generación

rápida y económica de moldes y utillajes de rotomoldeo, totalmente funcionales y de gran calidad.

#### 4.2. MATERIALES DE FABRICACIÓN DE MOLDES

En la industria del moldeo rotacional, la gran mayoría de los moldes se hacen de metal, principalmente acero al carbono, aluminio o acero inoxidable. Sin embargo, las nuevas tecnologías de fabricación permiten obtener piezas de geometrías complejas a partir de materiales menos usuales, como el níquel, con grandes capacidades mecánicas, fácil fabricación, bajo coste y con buenas propiedades térmicas.

En las figuras 4.1 y 4.2 se comparan en términos de equivalencia mecánica y térmica el níquel y el acero inoxidable en comparación con el aluminio, tomado como material de referencia. Podemos observar los espesores necesarios de dichos materiales para proporcionar la misma rigidez a la flexión que el aluminio o la misma transferencia térmica. Por ejemplo, 7,3 mm de espesor de níquel son mecánicamente equivalentes a 10 mm de espesor de aluminio, o por el contrario 1 mm de espesor de níquel es equivalente térmicamente a 6,8 mm de espesor de aluminio. [2]

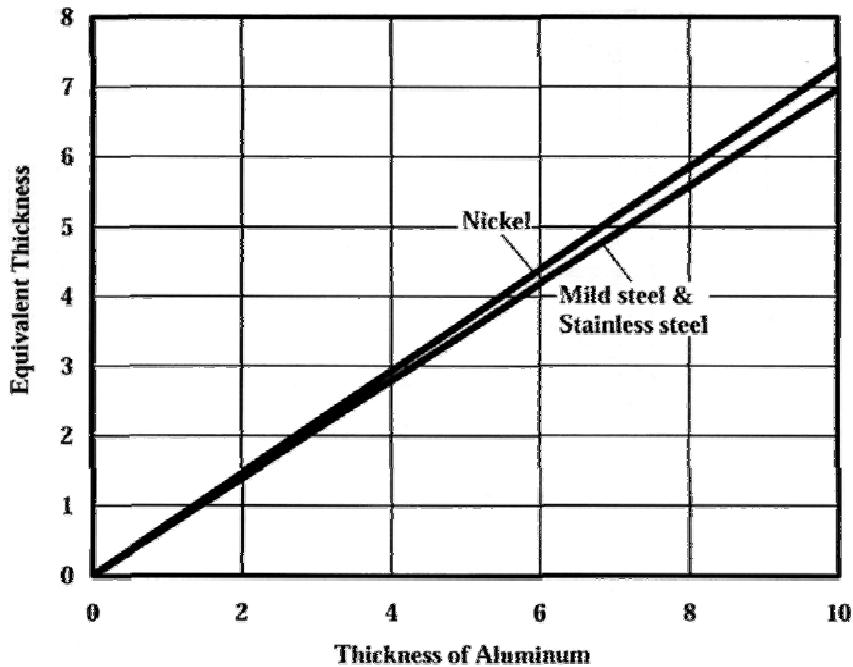


Figura 4.1: Espesor de rigidez a flexión equivalente entre diferentes materiales



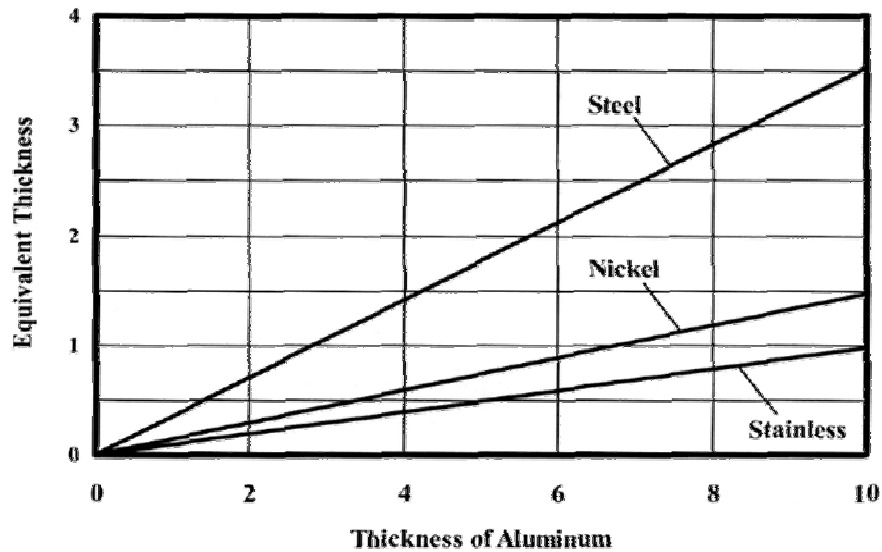


Figura 4.2: Espesor de transferencia térmica equivalente entre diferentes materiales

Por tanto, la introducción del níquel como material de fabricación de moldes de rotomoldeo es una solución atractiva, con gran potencialidad y posibilidades de desarrollo en la industria de fabricación de moldes en comparación con los materiales convencionales ampliamente utilizados en el sector, si bien desde el punto de vista térmico el níquel es competitivo mediante el uso del electroconformado con mínimo espesor.

#### 4.3. TECNOLOGÍAS DE RAPID PROTOTYPING APLICADAS A LA FABRICACIÓN DE MOLDES DE ROTOMOLDEO

Las tecnologías de fabricación de prototipos rápidos (Rapid Prototyping) y herramientas rápidas (Rapid Tooling) se han convertido en los últimos años en un avance tecnológico importante que posibilita la mejora en los procesos de diseño y fabricación de piezas. Aunque son varios los campos que abarcan estas técnicas, es precisamente en el de los plásticos donde más ha evolucionado y donde se encuentra su mayor rendimiento [1]

Los objetivos fundamentales del Prototipado Rápido son:

- Reducir el tiempo entre el diseño y la obtención de la pieza física.
- Reducir el coste. Esta rapidez y el hecho de utilizar máquinas que funcionan prácticamente sin la intervención de mano de obra reducirá el coste de los prototipos.

- Versatilidad. Estas técnicas permiten reproducir cualquier forma, por compleja que ésta sea, lo que redundará en la realización de diseños cada vez más audaces y complejos.
- Fiabilidad. Estas técnicas permiten reproducir modelos prácticamente idénticos al diseño original.
- Funcionalidad. La obtención de piezas totalmente funcionales y resistentes hacen que el prototipado rápido no sólo sea una tecnología para la obtención de prototipos, sino la obtención de piezas finales, ya sean moldes, útiles o similares. [1]

Para la fabricación de algunos componentes del molde de rotomoldeo diseñado se han utilizado varias tecnologías de Rapid Prototyping, de las cuales se exponen una breve descripción a modo de introducción básica para una mayor aclaración de las ventajas y mejoras que introducen en la fabricación de molde para el caso específico del moldeo rotacional.

#### **4.3.1. Modelado por deposición fundida (FDM)**

##### *4.3.1.1. Descripción del proceso*

El elemento de partida es un modelo CAD tridimensional del modelo deseado para su fabricación. Tras su tratamiento y conversión a un formato de interpretación de la máquina de fabricación, se envía a la misma para su tratamiento final mediante un software específico y tras la configuración del proceso, se procede a la fabricación del modelo, el cual se obtienen mediante su fabricación sucesiva en planos horizontales.

En la tecnología de FDM el material utilizado es un material termoplástico, normalmente ABS, que es extruído por una boquilla, alcanzando un estado de semifusión, y depositado capa a capa hasta completar el modelo. [3]

El cabezal de la máquina es alimentado mediante material en forma de hilo. Cuando el material es depositado por el cabezal, éste ejerce al mismo tiempo una determinada presión sobre el mismo, consiguiendo, por un lado, que quede soldado inmediatamente con la capa anterior y, por otro, el espesor de capa deseado. Las temperaturas utilizadas en este proceso oscilan entre 70°C y 140°C. Asimismo, existe una mesa móvil sobre la que se deposita el material, que desciende una altura equivalente al espesor de cada capa de construcción del modelo según se va desarrollando el proceso. [1]

La precisión de construcción es de aproximadamente 0,15mm sobre el recorrido total en los tres ejes de coordenadas (X, Y, Z). La precisión de los prototipos oscila entre 0,127 y 0,254 mm.

Esta tecnología de prototipado rápido ha sido desarrollada por Stratasys Inc. En concreto se utilizó la máquina FDM 8000 que se encuentra en el Laboratorio de Fabricación Integrada (LFI) de la U.L.P.G.C. El material inicialmente se encuentra en bobinas de filamentos de 1,8 mm (0,07") de diámetro.



Figura 4.3: Máquina FDM del LFI

La existencia del soporte en la elaboración de prototipos es imprescindible en este tipo de tecnología. La cantidad que interviene de cada uno de los materiales varía dependiendo de la forma y orientación de la pieza. El soporte ayuda a mantener la estabilidad dimensional de la pieza durante su conformación, evitando desfundamientos y deformaciones.

#### 4.3.1.2. *Software de control*

Al igual que las otras tecnologías se parte de un fichero generado en aplicaciones CAD tridimensionales donde se obtiene el modelo en sólido de la pieza a fabricar. En estos se genera el fichero de triangularización con formato STL, que como se ha indicado, en la mayoría de las diferentes tecnologías de prototipado se utiliza para la comunicación de la geometría con el software de control propio del sistema.

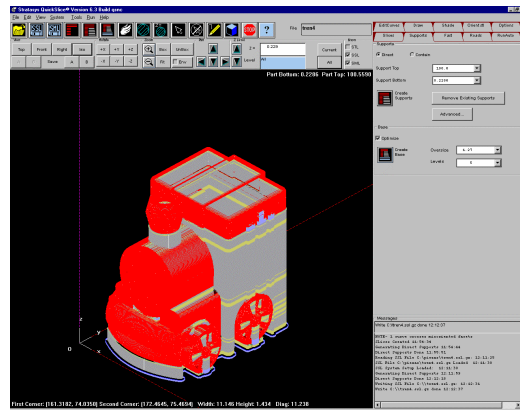


Figura 4.4: Software Quickslice de la máquina FDM del LFI.

A partir del formato STL, el proceso comienza con la elección del tipo de proceso a utilizar y la orientación en la cual va a ser creada la pieza. Este aspecto es importante porque definirá la resistencia que vaya a tener el prototipo, así como el gasto de soporte. A continuación se procede al seccionado de la pieza en capas, y la verificación y arreglo de los posibles errores que pudiera tener el archivo en formato STL. Dentro de esta aplicación se puede arreglar con sencillas operaciones, pequeños problemas en la definición de la geometría, que por otro lado se dan con cierta frecuencia.

Una vez creadas las capas (Slices), se genera el soporte y la base. Esta última consiste en unas pocas capas que son creadas con material soporte, para dar al prototipo la planitud y anclaje necesario para su desarrollo. Finalmente se han de generar las sendas (Roads), que no son más que las trayectorias que tiene que seguir el cabezal en cada una de las capas, para depositar el material y soporte necesario.

#### 4.3.1.3. Principales ventajas y desventajas

##### Ventajas:

- Variedad de materiales y gran facilidad de cambios en la máquina y en el material.
- Rapidez en la fabricación de pequeñas piezas huecas.
- Máquina sencilla, de reducido tamaño y con producción prácticamente nula de residuos.

##### Desventajas:

- Se requieren soportes.
- Poca consistencia en la dirección vertical.
- Lento en la producción de piezas voluminosas y gruesas.

#### 4.3.1.4. Esquema de funcionamiento

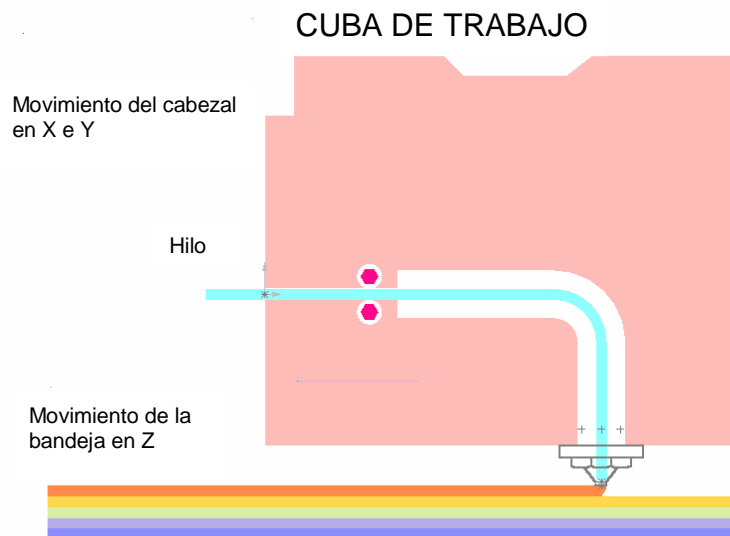


Figura 4.5: Esquema de trabajo y máquina de FDM controlada por PC.

### 4.3.2. Sinterización selectiva por láser (SLS)

#### 4.3.2.1. Descripción del proceso

El principio general de funcionamiento consiste en un haz láser, que recorre una superficie de material en forma de polvo, y solidifica sucesivamente diferentes capas de material. La solidificación se produce mediante la incidencia puntual del láser, que provoca un calentamiento superior a la temperatura de sinterización. Los granos de polvo no calentados permanecen sin adherirse, actuando como soporte de las sucesivas capas, y posteriormente son retirados al terminar el proceso de fabricación. Pueden utilizarse como materiales: cera de fundición, policarbonato, poliamidas, PVC, ABS, e incluso metales y cerámicas. Las piezas producidas no requieren post-curado para cohesionar su estructura, siendo muy resistentes aunque de superficie porosa. [4]

#### 4.3.2.2. Principales ventajas y desventajas

##### Ventajas:

- No requiere postcurado.
- No necesita soportes para el policarbonato y poliamidas.
- Las piezas pueden ser bastante resistentes.

- Los desarrollos futuros permiten utilizar incluso materiales cerámicos y metálicos.

*Inconvenientes:*

- La instalación es más aparatosa que el resto de los sistemas.
- Tiempos prolongados de calentamiento y enfriamiento de la máquina.
- Superficie porosa de las piezas.

El sinterizado por láser se ha convertido en los últimos años en uno de los sistemas más populares sobre todo por su versatilidad y ventajas en la aplicación como método de fabricación de moldes rápidos metálicos. [5]

4.3.2.3. *Esquema de funcionamiento:*

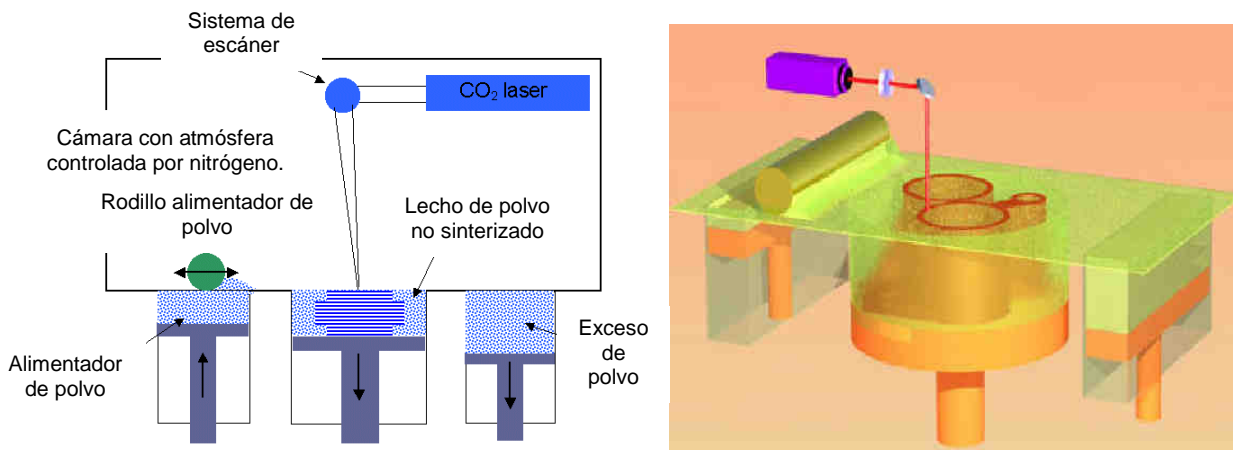


Figura 4.6: Esquemas de funcionamiento del sistema SLS



Figura 4.7: Máquina de sinterizado.

### 4.3.3. Impresión 3D

#### 4.3.3.1. Descripción del proceso

Como 3D printing se entiende el proceso o técnica de RP cuya ubicación natural está en una oficina técnica como soporte a los diseñadores y técnicos. Además, se le puede dar la denominación de Concepto Desktop o Impresora 3D. El objetivo de este sistema es el de obtener unos prototipos de manera rápida y asequible, con una realización, calidad y precio, verdaderamente excelentes. Se trata de una mezcla entre el SLS (Selective Laser Sintering) y el BPM (Ballistic Particle Manufacturing).

El material de base se halla en forma de polvo, el cual es depositado en capas sucesivas, como ocurre en el SLS. En este sistema, sin embargo, el haz láser es sustituido por un cabezal que proyecta "gotitas" de material de unión donde es necesaria la solidificación. Tras completar la construcción de la pieza, se aplica un tratamiento de calor (temperatura alrededor de 120°C) y se retira el polvo no solidificado. En el caso de piezas cerámicas, las temperaturas deben ser muy superiores (1000°C a 1500°C), a fin de proporcionar las propiedades mecánicas y refractarias necesarias. [6]

#### 4.3.3.2. Principales ventajas y desventajas

Ventajas:

- Sistema muy rápido, versátil y de fácil uso.
- Utilización de materiales de bajo coste.
- Ecológico y de utilización en ambiente de oficina.

Desventajas:

- Según el material, puede requerir post-curado o post infiltrado.
- Acabado superficial de baja calidad.

## 4.3.3.3. Esquema de funcionamiento:

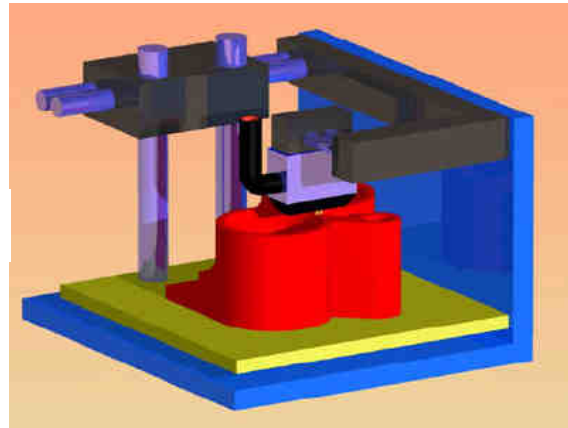
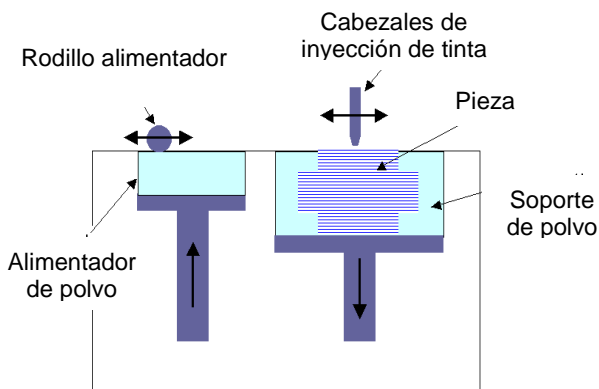


Figura 4.8: Esquema de funcionamiento y detalle 3D de proceso de impresión 3D

#### 4.4. TECNOLOGÍAS DE RAPID TOOLING APLICADAS AL MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO

El rapid tooling se define como la técnica de obtención de utillajes prototipo que utiliza algún sistema de rapid prototyping, directamente o indirectamente, en alguna de sus fases, con el objetivo de obtener una serie corta de piezas prototipo. Básicamente viene impulsado por [7]:

- Evolución lógica del rapid prototyping
- Necesidad de validación del proyecto durante la fase de diseño (adelantar prototipos a la fase de diseño)
- Necesidad de reducción del "time to market" (reducción de costos del proyecto)
- Optimización y mejora de los procesos y recursos actuales de fabricación.

Al igual que las tecnologías de Rapid Prototyping las tecnologías de Rapid Tooling son de enorme aplicación en la obtención de utillajes de cualquier tipología, no siendo el moldeo rotacional una excepción.

Fundamentalmente dos han sido las tecnologías utilizadas; electroconformado y colada en vacío de silicona. De las mismas se expone una breve descripción aunque es totalmente necesario desarrollar ligeramente el proceso de electroconformado, que da origen a la parte principal del molde de rotomoldeo, la cavidad de níquel interior, que conforma la forma de la pieza a fabricar y que interactúa directamente con los fluidos térmicos del proceso y el material polimérico de fabricación.



#### 4.4.1. Electroconformado

##### 4.4.1.1. Definición de electroconformado

Según la definición estándar adoptada por la normativa ASTM (B 832-93: Standard Guide for Electroforming with Nickel and Copper), “electroconformado o electroforming es la producción o reproducción de artículos mediante electrodeposición sobre un mandril o modelo, que posteriormente es separado del depósito de metal” [8][9].

La aplicación básica que se propone del electroconformado, en el área de la fabricación rápida de electrodos de penetración, consiste en fabricar un modelo de prototipado rápido sobre el cual se deposita una capa de metal que, tras ser separada, se rellena, constituyendo un electrodo para la fabricación de cavidades que puedan ser empleadas como elementos que puedan reproducirse, según figura 4.9.

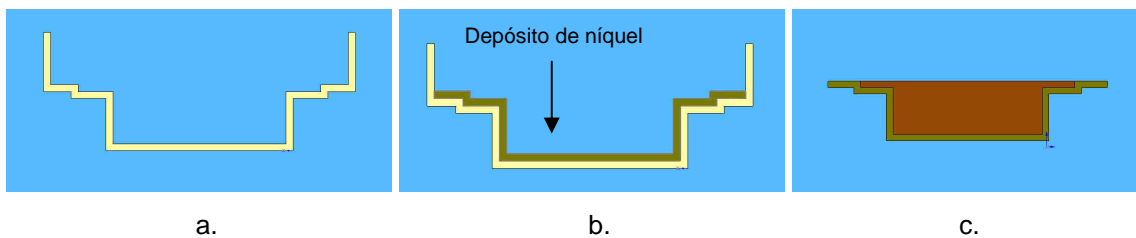


Figura 4.9: Fases básicas del electroconformado: modelo prototipo (a), deposición de níquel en el modelo (b) y pieza electroconformada obtenida (c)

La fase concreta de electroconformado implica la deposición electrolítica de una capa más o menos uniforme de cobre sobre la pieza a tratar (cátodo). El proceso se inicia al pasar, a través de dos electrodos sumergidos en una disolución de sales metálicas, una corriente eléctrica procedente de una fuente de corriente continua. Cuando dicha corriente circula por el circuito, los iones metálicos presentes en la solución y procedentes de la disolución de los ánodos, se convierten en átomos que se depositan sobre el cátodo.

##### 4.4.1.2. Características del electroconformado

Entre las principales ventajas del proceso de electroconformado se pueden enumerar las siguientes [8] [9]:

- Elevada precisión dimensional ( $< 0,5 \mu\text{m}$ ).
- Posibilidad de obtención de formas geométricas imposibles de realizar por cualquier otro método en una sola operación.
- Posibilidad de fabricación de piezas de paredes delgadas.
- Obtención de artículos con propiedades físicas y mecánicas controladas.
- Amplio intervalo en el tamaño de las piezas obtenidas (desde pocos milímetros a varios metros).
- Posibilidad de fabricación tanto de piezas individuales como grandes series.

Por otro lado, y como cualquier proceso de fabricación, el electroconformado presenta una serie de limitaciones, entre las que cabe citar las siguientes:

- Aunque dependiente de las condiciones operativas del baño electrolítico así como de su composición, se dispone de baja velocidad de deposición que se traduce en largos tiempos de proceso, aunque continuos.
- Dificultad en la separación cáscara-modelo.
- Limitaciones en los materiales a emplear. En la práctica sólo el cobre, el níquel y el hierro son los materiales que se electroconforman.
- Dificultad en la obtención de espesores uniformes, lo que lleva al uso de métodos adicionales como, por ejemplo, el uso de ánodos auxiliares.

#### 4.4.1.3. *Dureza de las piezas generadas*

El valor de la dureza es una magnitud que normalmente se usa para dar una indicación de la resistencia a tracción del material, así como de su resistencia al desgaste y penetración. Un material de grano fino es más duro y más fuerte que un material de grano grueso, dado que tiene un área límite de grano mayor para impedir dislocaciones.

La medida de la microdureza de los recubrimientos depositados se recoge en la ASTM B 578. La medición de dureza se llevó a cabo con Microdurómetro HX-1000-TM de la firma Remet, con cámara digital acoplada modelo KC-581C.

Los resultados obtenidos en distintas condiciones operativas ensayadas, esto es, con modificación de densidad de corriente, temperatura y pH, se mantuvo prácticamente constante y en el rango de 500 – 600 HV, muy apropiadas para su aplicación como insertos de moldes de inyección. [4]

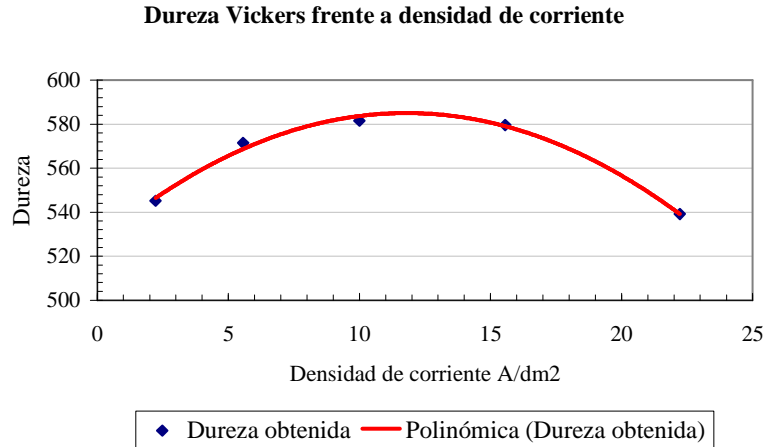


Figura 4.10: Pruebas de variación de la dureza con la densidad de corriente para pH=4 y Temperatura=45°C, realizadas por el LFI.

En la siguiente tabla se pueden observar las características de dureza de algunos de los materiales mencionados en comparación con los de las cáscaras de níquel electroconformado, tomando como base las durezas obtenidas en los ensayos para diferentes condiciones de proceso. En general se puede decir que un acero a partir de 300 Vickers de dureza se considera como apto para su aplicación como molde de inyección. El rango de aplicabilidad oscila entre 300 y 1000 Vickers, siendo este valor último tan solo obtenible en los casos de aleaciones de metal duro para condiciones de uso extremas. Observando los valores de la tabla se puede apreciar que la dureza obtenida en los ensayos se encuentra en la gama alta de materiales en lo que a este parámetro se refiere, teniendo en cuenta que se trata de los mejores materiales y con las mejores características de dureza. [4] [5]

| Material                                | Tipo de material  | Dureza Vickers |
|---|---|----------------|
| 21 MnCr15                               | Acero de cementación  | 670-760        |
| 40CrMnMoS8                              | Acero para bonificación   | 290            |
| X45NiCrMo04                             | Acero para temple integral  | 520-595        |
| X210Cr12                                | Acero para temple integral  | 710-760        |
| X42Cr13                                 | Acero resistente a la corrosión   | 590-630        |
| X36CrMo17                               | Acero resistente a la corrosión   | 525            |
| Cáscara de Níquel Electroconformada LFI | Cáscara de Níquel obtenida en los ensayos del LFI en diferentes condiciones de proceso y composiciones del baño | 534-610        |

Tabla 4.1: Dureza de algunos materiales empleados en moldes de inyección.

| <b>PROPIEDADES DE CÁSCARAS ELECTROCONFORMADAS EN NIQUEL</b> |                              |   |
|---|------------------------------|---|
| <b>Propiedad</b>  | <b>Grado de cumplimiento</b> | <b>Observaciones</b>  |
| Resistencia al desgaste                                     | Muy alto                     | Los resultados de dureza obtenidos son más que aceptables.  |
| Resistencia a la corrosión                                  | Muy alto                     | El Níquel se suele utilizar como recubrimiento protector de cierto tipo de moldes de inyección y con probada resistencia a la corrosión   |
| Estabilidad dimensional                                     | Alto                         | La única inestabilidad dimensional puede ser ocasionada por unas tensiones internas no controladas durante el baño. En el caso de tener un bajo nivel de tensiones internas esta inestabilidad y en consecuencia la deformación no existiría. |
| Propiedades resistentes                                     | Medio                        | Las propiedades resistentes de la cáscara de Níquel no son comparables con las de un molde convencional dado que el Níquel tiene un espesor pequeño (entre unas pocas décimas a unos pocos milímetros).                                       |
| Conductividad térmica                                       | Medio                        | Al igual que ocurre en el caso anterior, la cáscara de Níquel tiene una buena conductividad térmica en si misma.  |

Tabla 4.2: Aptitud de las cáscaras de níquel electroconformadas en el LFI.

#### **4.4.2. Moldeado de silicona**

##### *4.4.2.1. Descripción del proceso*

El moldeado en vacío es una técnica de fabricación de moldes generalmente de silicona a partir de un partir de un modelo master de cera obtenido mediante tecnologías de prototipado rápido. Este proceso combina los procedimientos de moldeado de silicona en vacío, el prototipado rápido en cera y tras su unión, la fundición de la cera a modo de moldeo a la cera perdida.

Los moldes fabricados de silicona, envuelven inicialmente el modelo master de cera dentro de un depósito, en condiciones de vacío, lo que permite eliminar el aire e impurezas, obteniendo un conjunto sólido y compacto. Tras el curado de la silicona, se procede a la extracción del master del interior del molde mediante el calentamiento de la cera, la cual por fusión fluidifica facilitando su extracción sin necesidad de la apertura del molde, el cual actuará posteriormente como de un elemento matriz, que permite la reproducción en su interior de modelos prototipos semejantes al master original.

La creación de moldes de silicona en vacío está fundamentalmente orientada a la fabricación de piezas mediante el proceso posterior de colada en vacío, utilizando diferentes resinas y materiales. Para ello, el molde siempre debe ser abierto para las etapas de extracción de las piezas fabricadas en resina.

El procedimiento utilizado para la fabricación del manifold es similar a la primera fase del proceso de fabricación de moldes de silicona. Sin embargo, en éstos se pretende generar cavidades a modo de molde para la posterior fabricación de piezas de igual geometría que la cavidad generada. En el proceso de fabricación del manifold únicamente se requiere la generación de las cavidades interiores del mismo. Para evitar pues la apertura del molde para la extracción del modelo sobre el que se produce la colada de la silicona se recurre al proceso de cera perdida.

El proceso realizado para la fabricación del manifold en silicona mediante cera se resume como sigue [10]:

1. Preparación del prototipo en cera



Figura 4.11: Marcado del modelo master.

2. Preparación del molde de silicona



Figura 4.12: Caja del molde.

3. Vertido de la silicona



Figura 4.13: Creación del molde.

4. Ciclos de vacío de molde



Figura 4.14: Extracción del aire interno.

## 5. Apertura del molde



Figura 4.15: Abertura del molde terminado por corte.

El resultando final es un manifold de silicona, compacto y homogéneo con unos canales interiores de gran precisión según el modelo master de cera.

### 4.4.2.2. Principales ventajas y desventajas

#### *Ventajas:*

- Se obtienen piezas de gran calidad y reproducibilidad.
- Es posible generar piezas de gran complejidad
- Las piezas pueden ser bastante resistentes.

#### *Inconvenientes:*

- El proceso no es automatizado
- Los tiempos de fabricación no son cortos
- Se requiere una importante preparación manual del proceso
- Existe una limitación de gama de materiales disponibles

## 4.5. FABRICACIÓN DE MOLDE DE ROTOMOLDEO PROTOTIPO

Expuestas brevemente las tecnologías de fabricación empleadas para las partes principales del molde de rotomoldeo, a continuación se detallan tanto los procesos de fabricación de dichas partes del molde como las principales características de las máquinas de fabricación y los materiales utilizados.

### 4.5.1. Cavidad electroconformada interior de molde

La cavidad interior del molde de rotomoldeo diseñado y la tipología de molde de calentamiento-enfriamiento por aceite envolvente desarrollada se encuentra basada

fundamentalmente en el uso del electroconformado como elemento de máxima innovación y ventaja competitiva. De esta forma, el molde desarrollado y las diferentes cavidades interiores susceptibles de desarrollarse se basan en la creación de una fina capa de níquel, de alta dureza y gran resistencia, que permita un eficiente proceso de transferencia térmica, redundado en reducción de tiempo de ciclo, mayor eficiencia energética, gran reproducibilidad de piezas y fácil intercambio de cavidades interiores de molde.

A partir del modelo definitivo de diseño de pieza que se pretenda fabricar en el proceso de moldeo rotacional se genera un modelo patrón mediante tecnologías FDM obteniéndose así un modelo base de inicio de fabricación. Posteriormente, y tras un tratamiento superficial del modelo obtenido, se procede al electroconformado de la pieza, mediante la electrodeposición de una capa de níquel del espesor deseado, conformándose una cavidad íntegra del modelo diseñado. Finalmente, tras los ajustes finales y retoques de la pieza, se obtiene una cavidad interior del molde de forma inversa que permitirá generar en el proceso de moldeo rotacional una capa definitiva de polímero con el modelo inicial de diseño.

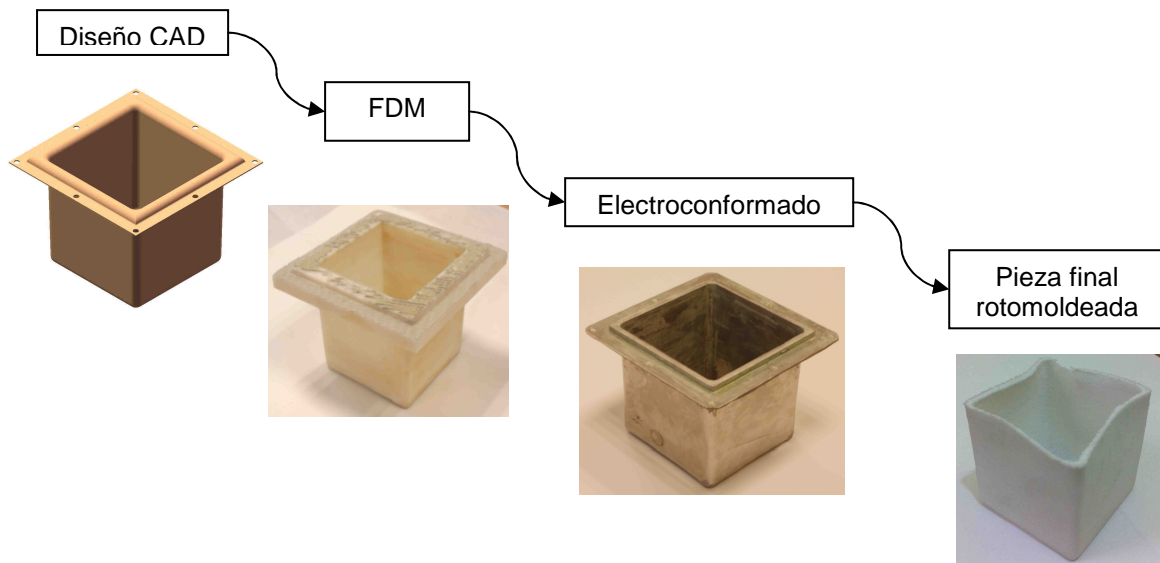


Figura 4.16: Esquema e imágenes del proceso de fabricación de cavidad electroconformada del molde.

#### 4.5.1.1. Fabricación de modelo FDM

Al igual que otras tecnologías se parte de un fichero generado en aplicaciones CAD tridimensionales donde se obtiene el modelo en sólido de la pieza a fabricar. Se genera el fichero de triangularización con formato STL y tras la parametrización del proceso, se inicia la fabricación.

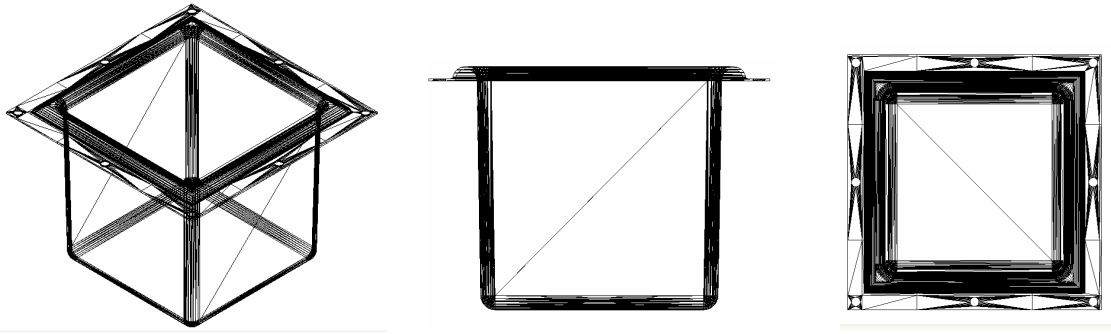


Figura 4.17: Imágenes de fichero STL generado de la cavidad interior a electroconformar.

Para la fabricación del modelo patrón de cavidad interior del molde de rotomoldeo diseñado se ha utilizado la máquina FDM 8000 del Centro de Fabricación Integrada de la U.L.P.G.C., máquina desarrollada por Stratasys Inc.

El material de fabricación empleado es Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), con las siguientes propiedades. [11]

- Densidad específica =  $1,05 \text{ gr/cm}^3$ .
- Dureza = 105 Rockwell (78 Shore D).
- Temperatura de reblandecimiento =  $105^\circ\text{C}$ ,
- Alargamiento a la rotura = 50%.
- Resistencia a la tracción = 34.5 MPa.
- Módulo de elasticidad = 2480 MPa.
- Resistencia a la flexión = 65.5 MPa.
- Módulo de flexión = 2618 MPa.
- Resistencia al impacto con entalla Izod = 107 J/m
- Resistencia al impacto sin entalla = 1282 J/m

Este material ABS es más parecido, en la mayoría de los casos, al material definitivo de las piezas, que el utilizado en otras técnicas de prototipado rápido. Es de alta resistencia y dureza, baja contracción, rápida solidificación y facilidad de trabajo posterior mediante procesos tradicionales, y no es tóxico. Es también muy apto para recibir muchos tipos de recubrimientos superficiales. [4]

Tras los procesos de limpieza, eliminación de rebabas, y tratamiento superficial se dispone del modelo patrón de cavidad interior de molde de rotomoldeo.



Debido a que el proceso de electroconformado reproduce con gran nivel de precisión y detalle el modelo sobre el que se produce la electrodeposición es de vital importancia generar un modelo patrón con la mayor calidad posible, evitando las imperfecciones y realizando un tratamiento superficial adecuado para la eliminación de impurezas.

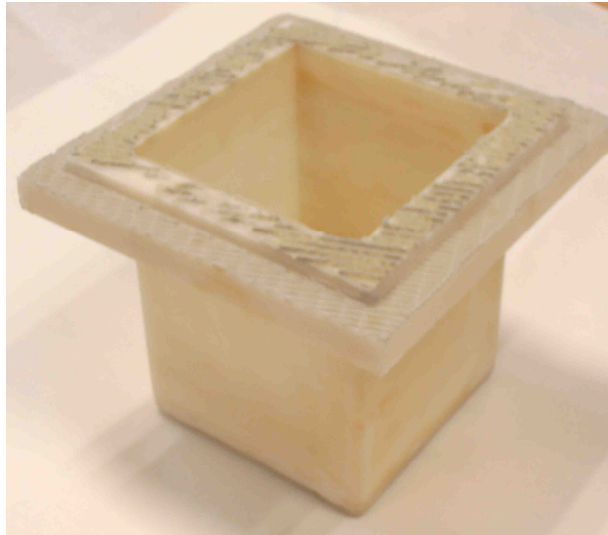


Figura 4.18: Imagen del modelo fabricado mediante FDM.

#### 4.5.1.2. *Proceso de electroconformado de la cavidad interior del molde*

Como primer paso en el proceso de electroconformado se ha de garantizar la impermeabilización frente al agua y a otras soluciones, ya que no deben alterar su geometría cuando se introduzcan en el baño. Cuando el material no posea esta propiedad, se han de aplicar recubrimientos superficiales como: ceras, barnices, pinturas, esmaltes o lacas para hacerlos impermeables al agua. En el estudio que aquí se presenta se ha trabajado con intervalos de temperaturas que oscilan entre los 35°C y 55°C, lo que hace que la pieza deba estar perfectamente sellada antes de ser introducida en el baño. [5]

Una vez conseguido esta cualidad, deben hacerse conductoras aquellas superficies donde se quiera realizar la deposición. Se ha realizado un metalizado a base de plata para lograr dicha conductividad, de forma que toda superficie objeto de electrodeposición fue metalizada mediante una homogénea y fina capa. [4]

4.5.1.2.1. Metalización del modelo base

En nuestro caso particular, la metalización del modelo ABS se realiza mediante el empleo de plata química LS de la compañía Hans Wolbring GMBH. Sus características son las siguientes [11]:

- Contenido metálico:  $45 \pm 0.2\%$  Ag
- Consumo: 0.5 – 1.5 gr por 100 cm<sup>3</sup>
- Diluyente: DH 14 G
- Tiempo de secado: 20°C/30 min 80°C/10 min 150°C/5 min
- Resistencia de la superficie plateada: 0.04 a 0.02 Ohm
- La conductividad térmica y eléctrica depende del grado de secado y de la clase de calor empleado.
- Forma de aplicación: pincel o pistola de spray.

El proceso de electroconformado requiere para su desarrollo un baño electrolítico de sales metálicas con dos electrodos sumergidos, un ánodo y un cátodo, por los que se hace pasar una intensidad procedente de una fuente de corriente continua. Cuando la corriente circula por el circuito los iones metálicos presentes en la solución se convierten en átomos que se depositan sobre el cátodo creando una capa más o menos uniforme de depósito, según las siguientes reacciones: [5]

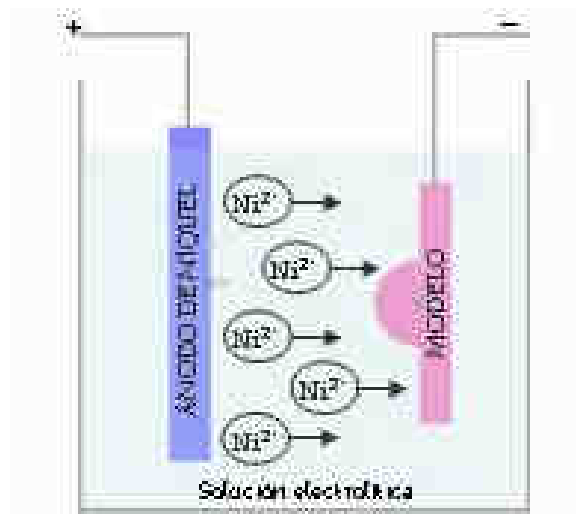
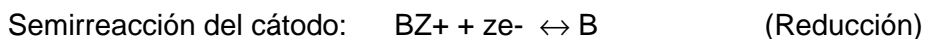
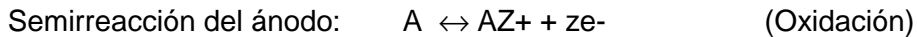


Figura 4.19: Proceso de electrodeposición de níquel.

Los principales parámetros que han de controlarse durante el proceso de electroconformado son los siguientes:

- Composición del baño
- Densidad de corriente
- Agitación de la solución electrolítica.
- Temperatura aplicada durante el depósito.
- Concentración de los iones metálicos presentes en el baño.
- Concentración de iones hidrógeno (pH).
- Agentes de adición presentes.

#### 4.5.1.2.2. Características del proceso electrolítico

El baño electrolítico en el cual tiene lugar el proceso de obtención de la cavidad interior del molde de rotomoldeo de níquel posee la siguiente composición:

|                     |          |
|---------------------|----------|
| Sulfamato de níquel | 400 ml/l |
| Cloruro de níquel   | 10g/l    |
| Ácido bórico        | 50 g/l   |
| Allbrite SLA        | 30 cc/l  |
| Allbrite 703        | 2 cc/l   |

Tabla 4.3: Composición del baño electrolítico del LFI.

Se ha empleado sulfamato de níquel frente a otras soluciones portadoras de níquel, debido a su idoneidad en el proceso de electroconformación.

En lo que respecta a la concentración de sulfamato, hay que decir que se puede trabajar con dos variantes de la misma: la convencional (315 – 450 g/l) y la concentrada (500 – 650 g/l). La diferencia entre ellas radica en distintas velocidades a la cual se deposita el metal, es decir, entre mayor es la concentración más rápido se obtiene el espesor de capa deseado a los mismos valores de densidad de corriente, temperatura y pH.

Además, hay que tener en cuenta que en las soluciones de sulfamato de níquel la resistencia del depósito disminuye con el aumento de la temperatura para valores superiores a 50°C, aumenta con el aumento de pH, disminuye cuando aumenta la

densidad de corriente en el cátodo, y por último, disminuye ligeramente con el aumento de níquel y cloruro en la solución.

Al baño de níquel se le ha añadido cloruro de níquel por dos motivos fundamentales: mejora la conductividad de la solución y tiene un efecto beneficioso sobre la uniformidad de la distribución metálica en el cátodo. Además, la presencia de cloruro es esencial para la disolución de los ánodos de níquel.

La incorporación de ácido bórico se realiza para que actúe en el sistema como solución tampón o reguladora, manteniendo el pH entre los valores límites de 3.5 y 4.5. La ausencia de este producto provocaría que, en las zonas de densidades de corriente más altas, el pH exceda el valor de 6.0, con la consiguiente precipitación de hidróxido de níquel. Además de las sustancias anteriores, al baño se le han añadido dos tipos de aditivos orgánicos: un ductilizante (o reductor de tensiones) y un tensoactivo que actúa en el baño disminuyendo su tensión superficial y previniendo o eliminando la producción de picado, fenómeno que afecta tanto a la calidad superficial del depósito como a su resistencia a la corrosión. [1]

Los nombres comerciales de los aditivos concretos empleados en la solución objeto de estudio son Allbrite SLA y Allbrite 703. Éste último es una solución acuosa de agentes tensoactivos biodegradables.

La temperatura y la densidad de corriente empleadas se corresponde a la siguiente tabla:

|  |             |
|--|-------------|
| Temperatura, °C                          | 35 – 55 g/l |
| Densidad de corriente, A/dm <sup>2</sup> | 2 – 5 g/l   |

Tabla 4.4: Temperatura y densidad de corriente del baño electrolítico realizado.

Además de lo anterior, se ha mantenido el baño con una cierta agitación mecánica horizontal del cátodo. Esto favorece la homogeneidad de la solución al mismo tiempo que rompe las anteriormente mencionadas posibles burbujas de hidrógeno generadas en el proceso redox y proporciona las turbulencias necesarias para prevenir una excesiva disminución de iones.

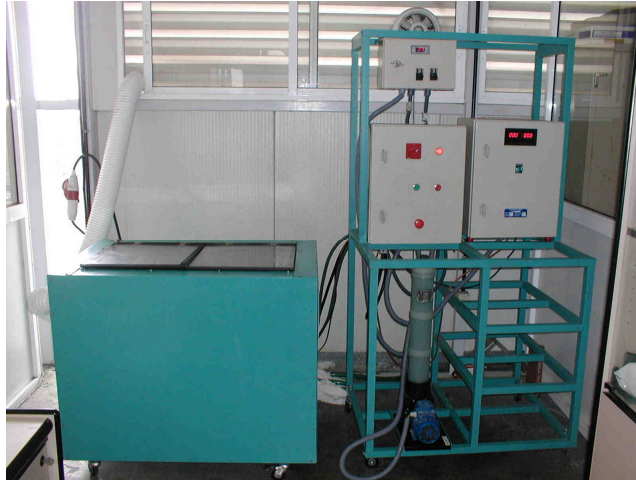


Figura 4.20: Máquina de electrodeposición del LFI.

#### 4.5.1.2.3. Espesor del electroconformado

Las condiciones del baño electrolítico determinan las propiedades mecánicas de la cáscara electrodepositada, al mismo tiempo que influyen en gran medida en el espesor obtenido. El espesor del material electrodepositado sobre el modelo varía debido a la distribución de corriente. Es decir, existen zonas donde la densidad de corriente es mayor que en otras, y por lo tanto en éstas habrá una mayor electrodeposición. Éste es un aspecto importante que debe tenerse en cuenta en la fabricación del modelo y en la ubicación de los electrodos correspondientes.

La determinación de forma teórica del espesor del depósito se realiza mediante la ecuación:

$$V = E \cdot C \cdot I \cdot t$$

siendo  $V$ : volumen teórico de níquel depositado.

$E$ : eficiencia del cátodo, cuyo valor oscila entre 92 y 96%.

$C$ : constante de deposición. Para el níquel  $3.42 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{A}\cdot\text{sg}$ .

$I$ : intensidad, en Amperios, a la que se ha realizado la deposición.

$t$ : tiempo de depósito en segundos.

Una vez conocido el volumen teórico se calcula el espesor en función de la superficie expuesta mediante:

$$e = \frac{V}{A}$$

siendo  $e$ : espesor depositado y  $A$  el área de depósito.

La determinación práctica del valor del espesor medio se lleva a cabo por pesada, es decir, calculando la masa depositada como diferencia entre la masa total después del depósito y la masa inicial antes del mismo.

Una vez conocida la masa se determina el volumen con la expresión:

$$V = \frac{m}{d}$$

siendo  $d$  la densidad del níquel, cuyo valor aproximado es 8.9 g/cc.

Finalmente, una recomendación adicional a tener en cuenta en el proceso de electrodeposición para electroconformado hace referencia al área del ánodo, que debe ser de 2 a 4 veces el área del cátodo, para garantizar una deposición más uniforme.

En concreto, y tras la realización de numerosos ensayos para la adecuación de los parámetros del baño a las características mecánicas buscadas, se obtuvo una cavidad de molde adecuada. El espesor medio de la cáscara fue de 1.0 mm, variando éste entre unos límites de 0.9 a 1.2 mm a lo largo de toda la superficie del mismo. Esto se debió a la falta de homogeneidad de la deposición originada por la existencia de zonas preferenciales frente a otras por proximidad del cátodo al ánodo y por las condiciones de proceso de la deposición.

#### 4.5.1.2.4. Propiedades mecánicas del electroconformado del LFI.

Las propiedades mecánicas del níquel electroconformado están influenciadas primordialmente por las siguientes variables de trabajo: pH, temperatura y densidad de corriente del cátodo.

De forma genérica se puede decir que en el baño de sulfamato de níquel las tensiones a tracción de la cáscara disminuyen cuando se opera a temperaturas por encima de 50°C, aumentan cuando se aumenta el pH, y disminuyen cuando se aumenta la densidad de corriente en el cátodo. Asimismo se ha comprobado que disminuyen ligeramente cuando se aumentan las concentraciones de níquel y cloruro en el baño. [5]

Algunas de las propiedades mecánicas se ven afectadas por el espesor de níquel en el cual se realiza el ensayo mecánico, siendo las principales las siguientes:

- Resistencia a tracción: La resistencia a tracción de las cáscaras obtenidas presentan valores entre 415MPa y 620 MPa.
- Dureza: Por término medio las durezas obtenidas en baño de sulfamato con aditivos son superiores a 600 HV.
- Ductilidad: Por término medio las cáscaras obtenidas con el baño de sulfamato de níquel convencional tienen un valor de un 20% de elongación.



Figura 4.21: Imágenes de la cavidad interior electroconformada.

#### 4.5.1.3. Ajustes finales

La finalización completa de la cavidad de níquel requiere de unas actuaciones simples tales como su separación del modelo base de FDM, limpieza, eliminación de rebabas en las zonas de acople con el molde, así como la abertura de los huecos de atornillado.

En el desarrollo de los primeros moldes es conveniente hacer un estudio dimensional para la comprobación de los parámetros geométricos, además del acabado superficial, fundamentalmente del modelo FDM que origina la cavidad electroconformada.

Cabe destacar que únicamente las superficies interiores de la cavidad del molde electroconformada deben disponer de la máxima calidad superficial puesto que sobre dichas superficies se generarán la piezas plásticas rotomoldeadas. Por el contrario, las superficies externas de la cavidad solo estarán en contacto con el fluido térmico del proceso siendo suficiente un acabado no tan fino.

#### 4.5.2. Soportes y estructura del molde

Para aportar rigidez al conjunto del molde así como permitir su acople a la máquina de moldeo rotacional y a las conexiones oleohidráulicas necesarias se han fabricado los soportes y estructuras portante del molde, a modo de armazón exterior y según el diseño definitivo.

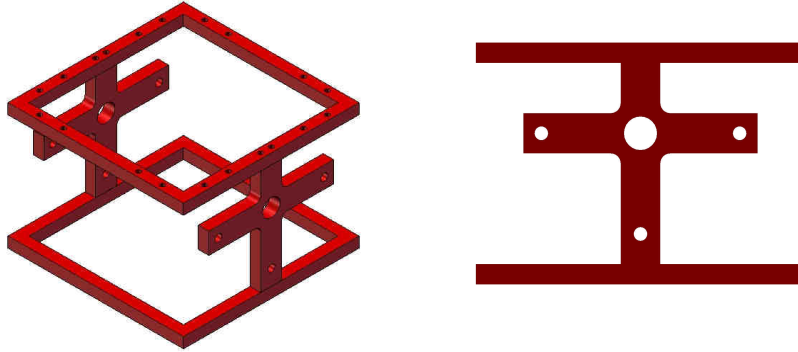


Figura 4.22: Imágenes del diseño de soportes y estructura del molde.

Para aligerar el peso del conjunto del molde se ha fabricado dichos soportes en aluminio a partir de perfil de 10 mm de espesor, mediante tecnologías convencionales de mecanizado y a partir de las geometrías y configuraciones del diseño CAD.

Como se mostrarán en los posteriores apartados estos elementos requerían ser fabricados con anterioridad al manifold, ya que se integrarán en una sola unidad para obtener un conjunto de manifold y estructura portante perfectamente integrados y ensamblados.

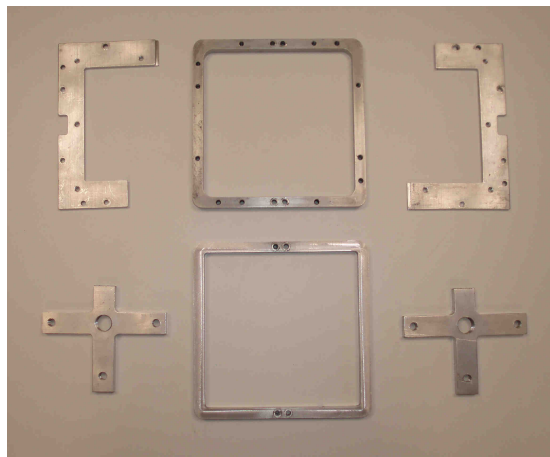


Figura 4.23: Imágenes del despiece de los soportes y estructura del molde fabricados.



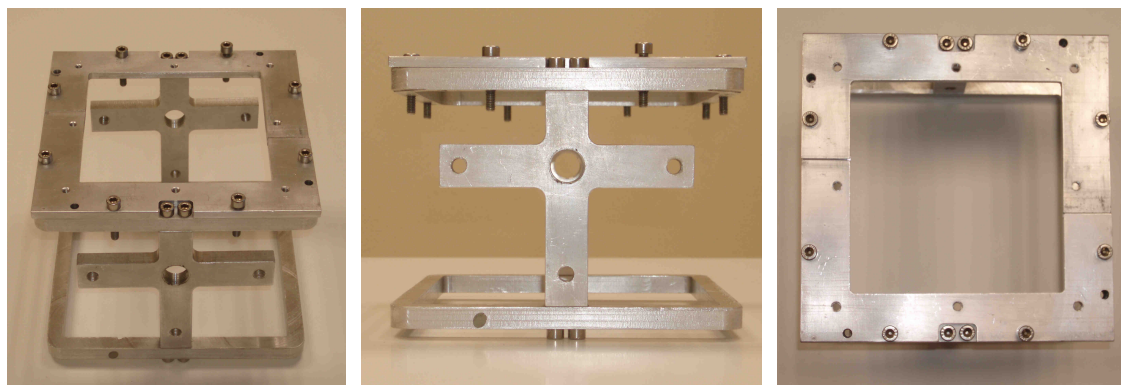


Figura 4.24: Montaje final de los soportes y estructura del molde fabricados.

### 4.5.3. Manifold

El manifold del molde de rotomoldeo, junto a la cavidad interior del molde electroconformada en níquel, es con diferencia una de las partes más importantes del diseño de molde aquí desarrollado.

El diseño definitivo del manifold, cuyo elemento fundamental es el distribuidor ramificado octopus, dispone de unas magníficas cualidades de homogeneidad del flujo en su interior, sin embargo su geometría resulta de gran complejidad para los procesos convencionales de fabricación. Sus estrechos canales interiores de 3 mm de diámetro y la curvatura de los trazados hacen imposible su fabricación mediante las herramientas usuales de fabricación. Por todo ello, las tecnologías de prototipado rápido (Rapid Prototyping) y las tecnologías de fabricación rápida de herramientas y utillaje (Rapid Toolings) adquieren una enorme importancia, permitiendo obtener dichas geometrías, a costes reducidos, en tiempos razonables y con características totalmente funcionales para un inmediata puesta en funcionamiento.

#### 4.5.3.1. *Procesos de fabricación*

##### 4.5.3.1.1. Impresión 3D en cera

Se ha utilizado en primera instancia las tecnologías de Rapid Prototyping para la generación de un modelo base del manifold, de forma análoga a la fabricación de la cavidad interior del molde, para posteriormente y mediante las tecnologías de Rapid Tooling generar el manifold definitivo.

Concretamente, mediante impresión 3D, se han generado los canales interiores de manifold octopus diseñado, a modo de patrón macho, obteniéndose un conjunto sólido de los canales. Se fabricaron varios modelos de tipo “macho” de las cavidades con dimensiones totales de 74x74x23 mm, mediante la máquina SolidScape T66, con tecnología de impresión 3D LTM (Layer Manufacturing Technologies).

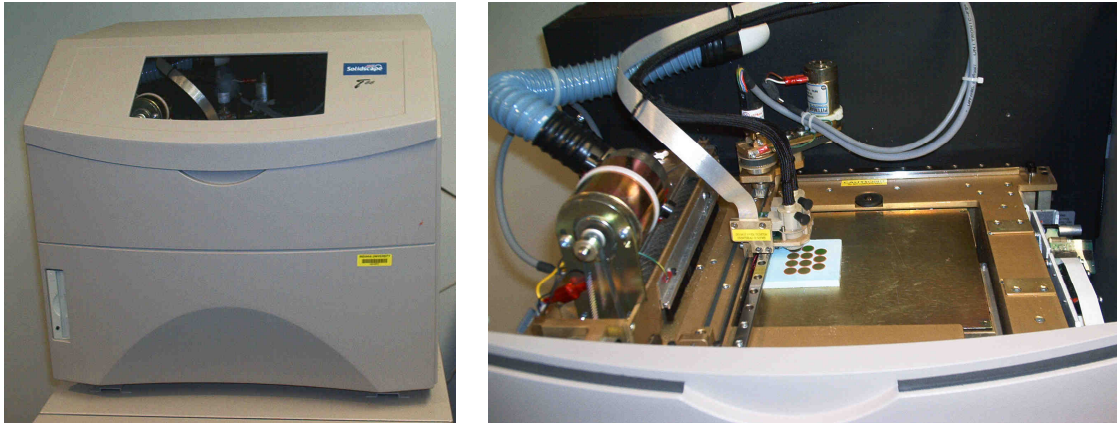


Figura 4.25: Imágenes de máquina SolidScape T66.

Se utilizó como material de fabricación cera, concretamente **InduraCast™**, con punto de fusión entre 105 y 115°C y una resolución de capa de 0.050 mm. La duración de la impresión y limpieza de cada modelo fue de aproximadamente 30 horas. El uso de cera como material de fabricación de los canales resulta de vital importancia en el proceso de fabricación del manifold, pues dichos canales de cera como se mostrará posteriormente serán fundidos generando las cavidades interiores de los canales en el interior de un molde sólido. [13]



Figura 4.26: Imágenes de los canales interiores del manifold. Diseño (izquierda) y modelo fabricado en cera (derecha)

#### 4.5.3.1.2. Molde de silicona en vacío

Fabricados el modelo patrón de los canales interiores del manifold en cera, así como los soportes y estructura portante del molde, se procede al proceso de colada en vacío. En este proceso se generará el manifold completo, en silicona, mediante el proceso de moldeo de silicona en atmósfera de vacío.

El inicio de proceso se inicia con el montaje de la estructura soporte del molde, modelos patrón de las cavidades interiores de los canales de cera y carcasa exteriores e interiores como se muestra en la figura 4.27. La carcasa exterior, ejecutada con chapa de madera que no debe afectar al curado de la silicona, delimita el contorno exterior del manifold, que coincide con el contorno exterior del molde. Asimismo debe generarse un contorno interior en el molde que delimite el canal envolvente por el que transcurrirá el aceite. Para ello se ha generado un contorno cúbico en ABS mediante tecnología FDM.

El acople de los elementos descritos con anterioridad deben realizarse con precisión para que el anclaje de las cavidad interior del molde electroconformada así como la tapa superior del molde y el resto de elementos encajen a la perfección.

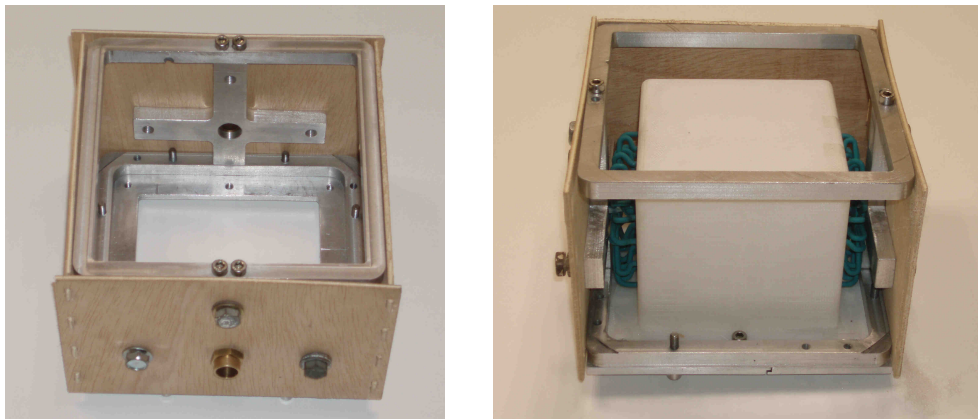


Figura 4.27: Imágenes del montaje previo a la fabricación del molde de silicona.

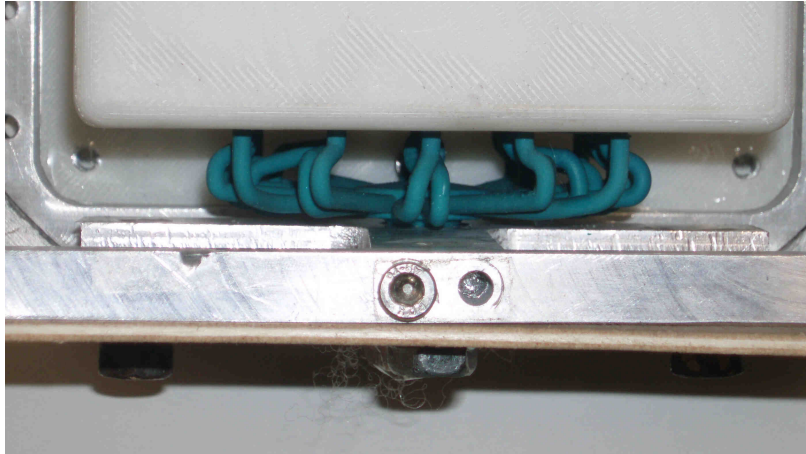


Figura 4.28: Imagen detalle del acoplamiento de los canales de cera y el resto de elementos previo al moldeo de silicona.

Terminado el montaje previo del conjunto, se procede a la ejecución de la colada en vacío. Los materiales utilizados en la fabricación del molde de silicona son los siguientes:

- Silicona vtx-950 de MCP.
- Catalizador cat-950 de MCP.

El proceso de fabricación realizado puede resumirse como a continuación:

- *Estimación del volumen de silicona requerido para el molde.* Teniendo en cuenta las dimensiones del manifold y sus elementos interiores se estima el volumen necesario de silicona para la creación del molde, determinándose una masa total de 1,8 kg de silicona. Se utilizará como cantidad de catalizador un 10% de la masa de la silicona para producir la curación de la silicona, cuyo estado natural es altamente viscoso. Tras la homogeneización de la mezcla se dispone de la silicona acondicionada para su utilización.
- *Oscilaciones de vacío.* Para producir un molde totalmente homogéneo y macizo deben eliminarse el aire interior, incorporado en los procesos de mezclado de silicona y catalizador, mediante ciclos de vacío de la misma. Para ello se ha utilizado máquina de colada en vacío V.C.M. C001 ST de MCP del Centro de Fabricación Integrada de la ULPGC.
- *Vertido de la silicona en el cajón del molde.* Una vez extraída la mayor cantidad de aire del interior de la silicona, se introduce la misma en el montaje previamente preparado del molde, produciendo un vertido equilibrado y homogéneo en todas las cavidades del conjunto del molde hasta alcanzar los límites geométricos del mismo.

- *Oscilaciones de vacío.* Aunque se ha extraído el aire interior de la silicona, el vertido se realiza a presión atmosférica, por lo que se produce cierta aireación del molde. Finalmente, se vuelve a generar, mediante la máquina V.C.M. C001 ST ciclos de vacío, eliminando el resto de aire existente.
- *Curado de la silicona.* El molde de silicona debe reposar y curar al menos 24 horas a temperatura ambiente antes de su extracción, aunque para mejorar y acelerar el proceso de curado se ha utilizado una estufa VGO 700S de MCP a 70 ° C, reduciendo el curado a 4 horas.

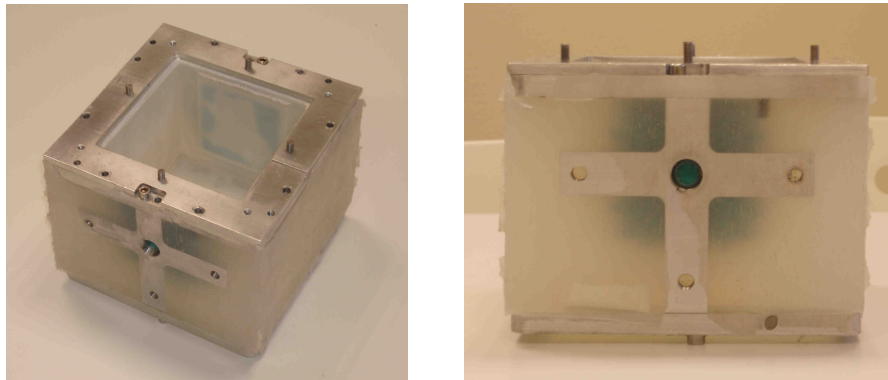


Figura 4.29: Imágenes del manifold de silicona obtenido y soportes fabricados y ensamblados antes de la fundición de la cera.

- *Fundición de la cera.* Generado el molde de silicona, en el mismo horno y tras el proceso de curado se aumenta la temperatura a valores en torno a 150°C para producir la fusión de la cera que componen los canales interiores del manifold. Mediante este proceso, la cera es fundida y extraída del interior del molde de silicona, generando una cavidad en el molde con la misma geometría que ocupaba la cera y produciendo así el manifold.

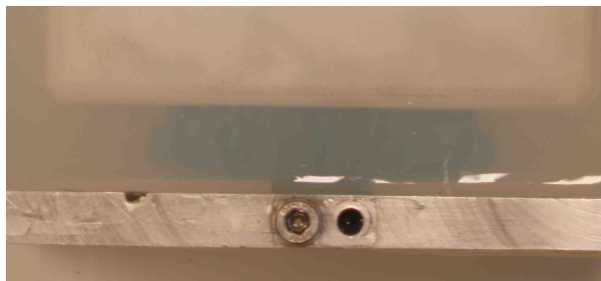


Figura 4.30: Imagen detalle del acoplamiento de los canales de cera y el resto de elementos tras el moldeo de silicona.

- *Ajustes finales.* Para finalizar el manifold, fabricado en silicona, deben limpiarse las superficies interiores de los canales que puedan contener resto de cera, así

como la eliminación de los posibles sobrantes de silicona. Se obtiene así un manifold de silicona con los soportes y estructura portante integrados en un mismo conjunto.

#### 4.5.3.1.3. Fabricación de manifold mediante sinterizado láser SLS

Anteriormente se ha expuesto el proceso de fabricación del manifold del molde de rotomoldeo mediante el uso de la impresión 3D en cera como proceso prototipado rápido obteniendo así los canales interiores del molde, y posteriormente colada de silicona en vacío.

Debido a que el manifold, además de la cavidad interior del molde, constituye uno de los elementos principales del proceso de moldeo rotacional, y dada la complejidad de la configuración diseñada, se ha optado por la fabricación de un segundo distribuidor que nos permita comparar técnicas de Prototipado Rápido y su adecuación al proceso de moldeo rotacional.

Un segundo distribuidor se realizó mediante tecnología de sinterizado láser a través de la máquina EOS Formiga P100. Para ello se utilizó como material de fabricación poliamida PA2200 y un espesor de capa de 0.1 mm. El distribuidor completo dispone de unas dimensiones exteriores de 166x166x118 mm y un espesor medio de 25 mm. El distribuidor completo, fabricado en una sola pieza, supuso un total de 14 horas. [14]



Figura 4.31: Manifold fabricado mediante sinterizado y detalle de aberturas de salida de aceite del manifold.

La fabricación de los componentes del molde de rotomoldeo se ha realizado conforme los diseños y cálculos realizados. El distribuidor de aceite dispone de dos modelos según el proceso de fabricación: moldeo de silicona en vacío-fusión por cera perdida y sinterizado láser, mientras que la cavidad interior del molde en cualquier caso se ha generado mediante electroconformado.

Aunque la impresión 3D en cera dispone de inconvenientes como la fragilidad de la cera que requiere de una manipulación delicada, las horas tanto de máquina como de personal cualificado necesarias y la posibilidad de errores humanos, también dispone de una alta potencialidad para creación de cavidades en moldes. Además de la gran reproducibilidad obtenida, el proceso de fusión puede realizarse de manera práctica y sencilla en hornos a 105 °C. Su fluidez a dicha temperatura es excelente y permite una limpieza fácil y rápida. Por otra parte, el moldeado mediante silicona al vacío permite obtener moldes a medida, casi transparentes, flexibles y de gran reproducibilidad siendo una tecnología ampliamente experimentada y de bajo coste.

Por otra parte, la tecnología de sinterizado de polvo polimérico se plantea como una solución de gran rapidez, de excelente acabado, automatizada, gran robustez y con capacidad para el desarrollo de piezas de gran complejidad, unificando en un solo proceso y máquina un distribuidor completo. Resalta el coste económico como principal inconveniente de la tecnología, además de su rigidez y la dificultad de inserción de piezas o accesorios en su interior.

Para la fabricación de distribuidores en moldes de rotomoldeo de baja temperatura (inferiores a 150 °C) ambas tecnologías producen componentes totalmente funcionales, con características mecánicas adecuadas y en tiempos de fabricación menores a los procesos convencionales. Asimismo, mediante el uso de polímeros termoestables como la silicona pueden generarse distribuidores aptos para mayores temperaturas en procesos de moldeo rotacional.

#### **4.5.4. Ensamblaje final**

Obtenidas las diferentes partes que conforman el molde de rotomoldeo se ha procedido al ensamblaje del conjunto. Para el ensamblaje final se ha seleccionado el manifold de silicona fundamentalmente por disponer de una mayor flexibilidad que el molde de poliamida sinterizado, además de disponer de forma integrada el conjunto de soportes. Este hecho influye significativamente en la estanqueidad del molde debido a que la unión entre las diferentes partes del molde dispone de cierta elasticidad, elemento conveniente para la unión y apriete de las diferentes partes del molde. Dada la rigidez del manifold sinterizado, la unión y apriete de otros elementos con el mismo podrían producir grietas y fisuras, fenómenos que se pretenden evitar al trabajar con fluidos.



Figura 4.32: Vistas varias de diseño final de molde de rotomoldeo completo de calentamiento por aceite a través de canal envolvente, manifold octopus y cavidad interior del molde de níquel de 1 mm.

Mediante elementos de tornillería y juntas de cierre se procede al montaje final de la cavidad interior electroconformada el molde en el interior del manifold, así como el anclaje de la tapa superior de acceso al interior del molde y otros accesorios, terminado la fabricación completa del molde de rotomoldeo diseñado.



## *Capítulo V*

### **EXPERIMENTACIÓN DEL MOLDE PROTOTIPO DE ROTOMOLDEO**



## **5. EXPERIMENTACIÓN DEL MOLDE PROTOTIPO DE ROTOMOLDEO**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

En los capítulos anteriores se han desarrollado diferentes apartados de este trabajo de investigación, desde los fundamentos teóricos hasta los procesos de fabricación utilizados para la obtención de un molde de rotomoldeo.

La siguiente fase natural y cronológica de este trabajo consiste en la validación real de los cálculos y diseños realizados con anterioridad mediante un modelo experimental completo. Para ello se ha fabricado, a nivel de laboratorio, una máquina de rotomoldeo real que ha permitido la realización de ensayos con el molde fabricado y la obtención de los resultados correspondientes al proceso real.

En el presente capítulo se exponen las características básicas del diseño, composición y fabricación de la máquina de rotomoldeo de ensayo, así como la metodología de los procesos experimentales realizados y la toma de datos realizada.

### **5.2. NECESIDAD DE MÁQUINA DE ENSAYOS DE ROTOMOLDEO**

La experimentación es una de las claves principales de la ciencia moderna en cualquier campo de aplicación. En el área de la ingeniería el diseño de experimentos es totalmente necesario para concebir y verificar los conceptos teóricos, desarrollos de nuevos métodos y productos, nuevos procesos o sistemas, etc. [1]

La validación de los procesos de diseño y cálculos realizados en cualquier proyecto de investigación requieren de una correcta planificación y diseño de experimentos que permitan obtener, con un mínimo de error, conclusiones rotundas sobre las hipótesis de origen. En gran cantidad de ocasiones, dichos experimentos requieren de un conjunto de herramientas y elementos físicos reales que permitan la demostración de las teorías y cálculos establecidos, basándose en bancos de pruebas o ensayos específicos. [2]

El trabajo de investigación aquí desarrollado dispone de un alto contenido de diseño, cálculo, simulación y análisis, basado en hipótesis, modelos matemáticos y parámetros empíricos que conforman un aglomerado de resultados finalmente teóricos. Por ello y con el

fin de completar tanto el desarrollo del molde de rotomoldeo por calentamiento por aceite envolvente, como el propio proceso de rotomoldeo mediante el uso de fluido térmico, se hace imprescindible el desarrollo de experimentos como método científico de investigación.

El uso de fluidos térmicos en el moldeo rotacional se encuentra en la vanguardia de dicho campo de fabricación, por lo que dicha tecnología, aún muy moderna, se encuentra en constante desarrollo y expansión tanto entre las grandes industrias del sector como en los pequeños centros de investigación y desarrollo de las universidades [3]. Por tanto resulta muy complicado, o prácticamente inviable, la validación de los diseños y cálculos realizados en máquinas reales ya existentes, tanto en el ámbito de los centros de investigación colaboradores con el LFI de la ULPGC como de las posibles industrias interesadas en el desarrollo de este tipo de tecnologías.

Finalmente, y tras las dificultades planteadas, surge la necesidad del desarrollo y fabricación propios de una máquina de rotomoldeo por calentamiento-enfriamiento mediante fluido térmico, concretamente aceite sintético. Dicha máquina debe cumplir las necesidades de ensayo así como disponer de la configuración y características que permitan su completa adaptación al molde de rotomoldeo fabricado.

### **5.3. REQUISITOS DE LA MÁQUINA DE ROTOMOLDEO PARA ENSAYOS**

En cualquier proceso de diseño es fundamental el completo conocimiento de las prestaciones, características y funcionalidad que debe tener el producto objeto de estudio. Por tanto, deben conocerse la finalidad última del elemento a diseñar y fabricar así como las condiciones de funcionamiento e interacción con otros elementos tanto para la selección óptima de los materiales, configuración, procesos de fabricación o componentes accesorios. [4]

La necesidad de desarrollo y fabricación de una máquina de rotomoldeo ha sido la del ensayo del molde fabricado, y por lo tanto, la validación de los procesos de diseño y análisis efectuados y ya explicados. Por ello es que el diseño y fabricación de la máquina de moldeo rotacional aquí presentado no responde a criterios estéticos, ni de larga durabilidad o máximas prestaciones, como sí podría entenderse en un diseño y fabricación a nivel industrial o comercial de este tipo de elementos.

La máquina desarrollada debe responder a una serie de necesidades específicas fundamentalmente establecidas por el molde de rotomoldeo obtenido. Además, deben establecerse una serie de limitaciones, acotando por tanto su utilidad y prestaciones, adecuándolo a las reales necesidades del trabajo de investigación sin obviar las posibles líneas futuras de investigación. Las características fundamentales y las principales limitaciones de la máquina diseñada y fabricada pueden resumirse como sigue [5]:

- Debe permitir desarrollar el proceso completo de moldeo rotacional.
- Utilización de aceite como fluido térmico del proceso.
- Diseño compacto y simple
- Bajo coste económico
- Temperatura de funcionamiento reducida, hasta 180 °C.
- Tamaño de molde máximo de 200x200x200 mm.
- Fácil acceso y manipulación de sus componentes.
- Posibilidad de adaptación de mejoras o rediseños según el desarrollo de la experimentación del molde.
- Disposición de sistemas de adquisición de datos o medición de parámetros.

Estos criterios esenciales han servido de base para el diseño de una máquina de rotomoldeo adaptada a los recursos disponibles y las necesidades requeridas, permitiendo una adecuada caracterización del molde desarrollado mediante la realización de pruebas de moldeo rotacional similares a los procesos de fabricación industriales.

#### **5.4. DISEÑO BÁSICO Y COMPONENTES DE BANCO DE ENSAYOS**

A partir de las necesidades de ensayo, se inició el diseño de la máquina de rotomoldeo rotacional la cual debe cumplir los requerimientos establecidos dentro de una serie de limitaciones para lo cual se exponen los principales procesos de diseño.

##### **5.4.1. Selección de tipología de máquina**

Múltiples son los tipos de máquinas de rotomoldeo, en función de su configuración o su tipo de movimiento, requiriéndose en todas los procesos de calentamiento, enfriamiento y la generación de movimientos giratorios. Para nuestra aplicación se ha seleccionado como máquina óptima las denominadas de tipo *“Rock and Roll”*, ya que disponen de una configuración simple, fáciles accesos al molde y permiten obtener buenas distribuciones de espesor de piezas, entre otros aspectos. [6]

Estas máquinas disponen de dos movimientos esenciales para el proceso de moldeo rotacional: la rotación continua del molde de 360° y el movimiento en basculación del conjunto, abarcando un ángulo de 35° aproximadamente hacia cada lado [7]. Por tanto se requiere de un conjunto de elementos de generación de dichos movimientos.

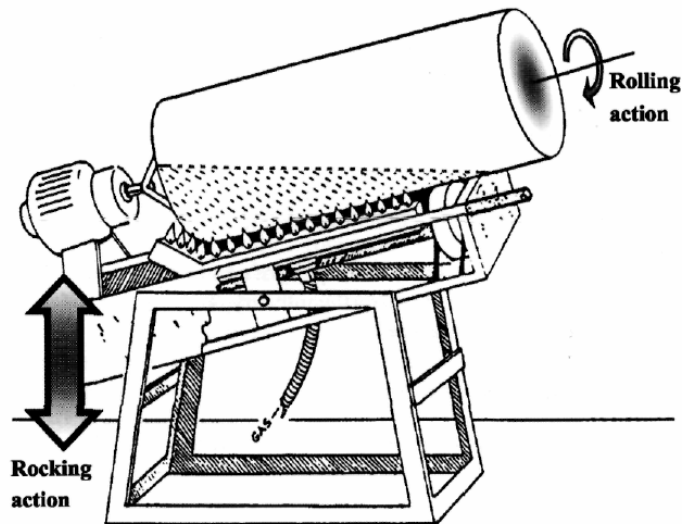


Figura 5.1: Imagen de máquina de moldeo rotacional tipo "Rock and Roll" [6]

#### 5.4.2. Diseño general de máquina de moldeo rotacional

La máquina de fabricación se ha diseñado a partir de una estructura general fabricada mediante perfiles metálicos estructurales y conformando un volumen rectangular donde se introducirán y conectarán todos los elementos, equipos y accesorios necesarios, generando una máquina compacta de dimensiones reducidas.

Las dimensiones totales de la estructura base de la máquina son:

- 500 mm de ancho
- 800 mm de altura
- 1.200 mm de longitud

En el interior de la estructura base y a través de las puertas inferiores se instalarán los sistemas de calentamiento y enfriamiento mediante aceite térmico, así como algunos elementos del sistema de movimiento de la máquina. En la parte superior se instalarán el resto de los elementos del sistema de movimiento además de los de montaje del molde.

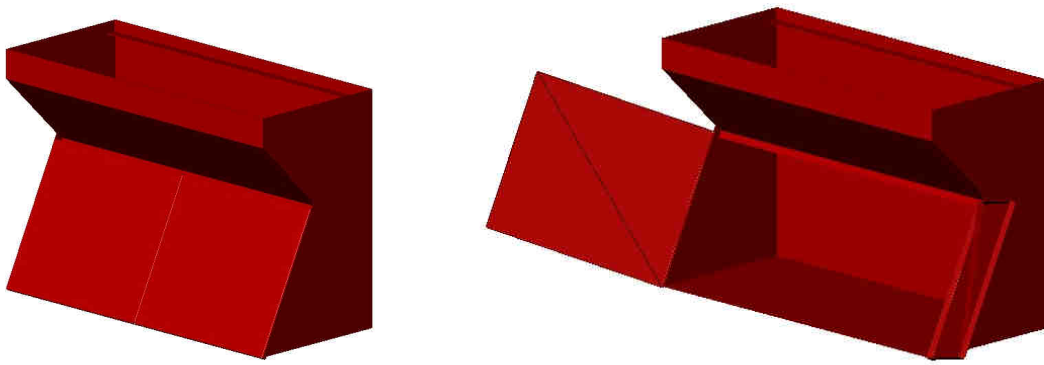


Figura 5.2: Diseño de la estructura base de la máquina de rotomoldeo.

### 5.4.3. Diseño y composición de los sistemas de movimiento

El conjunto de generación del movimiento en la máquina conforma una de las partes principales de la misma, y se encuentra formado por los siguientes elementos:

- Soportes principales: Anclados a la estructura base de la máquina serán el soporte del peso del conjunto del sistema de movimiento y del conjunto del molde. Permitirán el acople de los sistemas de flujo de aceite y de los ejes de apoyo de la base general del sistema de movimiento.

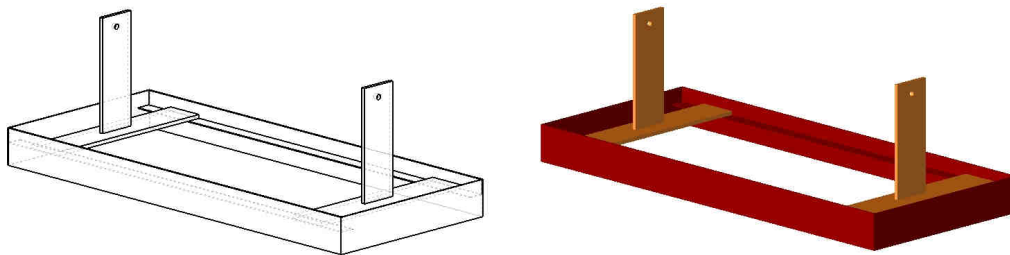


Figura 5.3: Diseño de soportes sobre base general de la máquina de rotomoldeo.

- Base de basculación: Esta base, fabricada mediante perfiles metálicos de acero, se encuentra anclada en sus extremos a los soportes principales mediante ejes de apoyo que permiten bascular al conjunto. Sobre dicha base se instalan el motor de giro del molde, el plato de conexión del molde, el propio conjunto del molde y los sistemas de adquisición de datos correspondientes. En la unión entre esta base y los soportes principales se instalan las juntas rotativas que permiten el paso del aceite desde el sistema oleohidráulico.

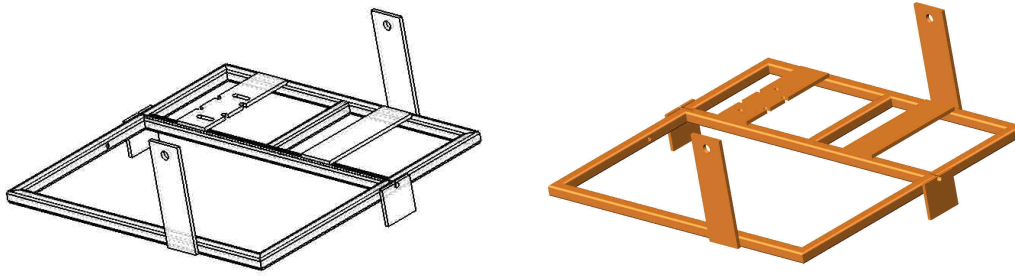


Figura 5.4: Diseño de base de basculación de la máquina de rotomoldeo.

- Accionamiento del movimiento basculante: Las basculación del sistema se genera mediante un sistema compuesto por un motor eléctrico trifásico de 0,5 kW, un sistema de transmisión mediante poleas y correa y un conjunto de ejes y bielas para la basculación final. Este conjunto permite alcanzar una velocidad controlada de basculación de 5 rpm.

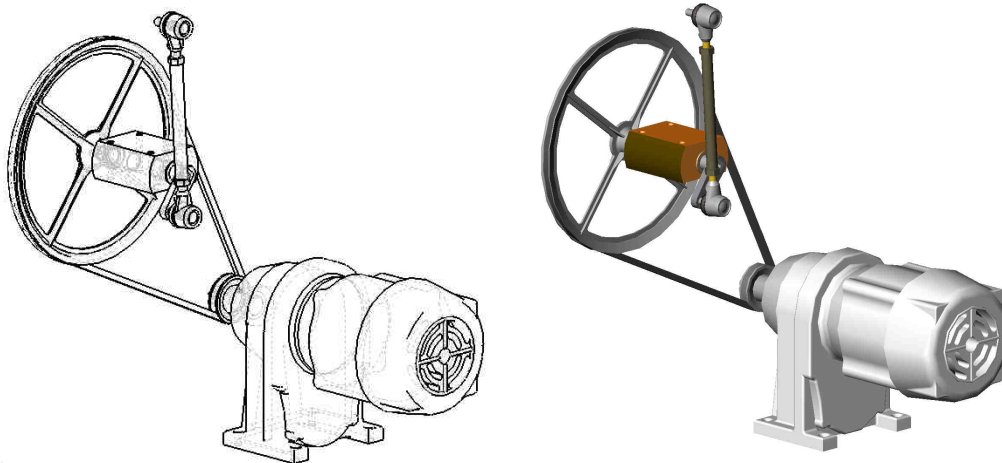


Figura 5.5: Diseño de sistema de movimiento de basculación de la máquina de rotomoldeo.

- Accionamiento del movimiento giratorio del molde: Completamente instalado en la base de basculación se dispone del conjunto de elementos que producen el movimiento giratorio continuo del molde. Se compone principalmente de un motor eléctrico monofásico de 0,55 kW, un conjunto de poleas y correa y otros elementos accesorios. La velocidad de giro se controla a través de un variador electrónico de velocidad permitiendo obtener valores de giro del molde a partir de 30 rpm.





Figura 5.6: Diseño de sistema de movimiento de giro del molde de la máquina de rotomoldeo.

#### 5.4.4. Diseño y composición de los elementos de montaje de molde

Para el montaje del molde y sus accesorios se ha ejecutado un plato soporte perforado con múltiples taladros para el anclaje de moldes de diferentes tamaños. El plato soporte se encuentra unido solidariamente al eje del sistema de accionamiento del giro del molde, mediante un soporte con cojinetes interiores. En el interior del eje del plato soporte y del soporte con cojinetes se de un pasante libre para la instalación de los conductos del sistema oleohidráulico.

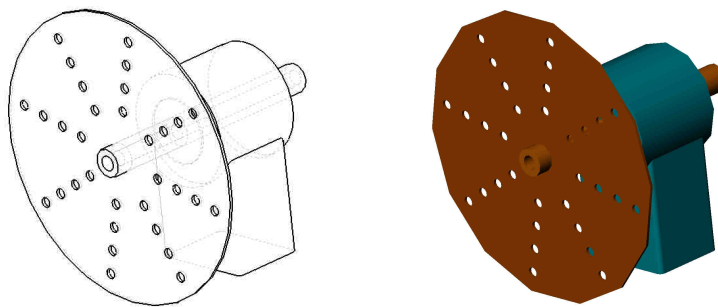


Figura 5.7: Diseño del plato perforado soporte del molde y del soporte de cojinetes de la máquina de rotomoldeo.

#### 5.4.5. Diseño y composición del sistema oleohidráulico

Otro de los sistemas fundamentales de diseño de la máquina es el sistema oleohidráulico, que permite el suministro del fluido al interior del molde, y por tanto los procesos térmicos necesarios.

El sistema oleohidráulico se encuentra formado por un baño termostático, una bomba volumétrica de aceite, una red de tuberías, dos juntas rotativas y un sistema de válvulas:

- Baño termostático: Para el calentamiento del aceite térmico se ha dispuesto de un calentador de aceite de hasta 200 °C. Con una capacidad de 20 l, suficiente para

garantizar una temperatura constante de calentamiento, teniendo en cuenta que el circuito completo oleohidráulico, incluyendo el interior del molde, requiere de un volumen de aceite de tan sólo 1 l y que el caudal del proceso es de  $6 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s (0,06 l/s).

El baño, cuyo calentamiento se realiza mediante una resistencia eléctrica, dispone de un termostato de regulación de la temperatura deseada así como un selector analógico de la temperatura.

La potencia máxima del equipo asciende a 2 kW con una tensión de alimentación monofásica a 230 V.



Figura 5.8: Baño termostático utilizado en la máquina de rotomoldeo.

- Bomba volumétrica de aceite: Para la introducción del aceite en el molde debe disponerse de un sistema de presión. La ubicación del baño termostático, inferior al molde, y las pequeñas pérdidas de presión del sistema oleohidráulico y del molde hacen necesario la instalación de una bomba volumétrica. Se ha seleccionado una bomba estándar de engranajes y para la impulsión de aceite para la obtención de una presión media de funcionamiento entre 1,2 y 1,5 bar y un caudal de hasta 0,1 l/s.



Figura 5.9: Bomba de aceite volumétrica estándar.

La bomba volumétrica es accionada a través de un motor eléctrico monofásico de 0,25 kW y un sistema de poleas y correa que permite la reducción de la velocidad de giro de la bomba para la adecuación del flujo volumétrico a los valores requeridos.

- Red de tuberías: Debido a las temperaturas a alcanzar, hasta 180°C, y la sinuosidad de la red a implementar en el interior de la máquina, se ha diseñado una red de tuberías de cobre, de 12 mm de diámetro exterior, tanto para la impulsión como para la evacuación del aceite, hacia y desde el molde. Dicho sistema de tuberías se ha aislado mediante neopreno esponjado de 2 cm de espesor minimizando las pérdidas térmicas en dichas conducciones.
- Depósito de aceite a temperatura ambiente: Para el proceso de enfriamiento del molde se dispone de un depósito metálico de 60 l para el almacenamiento del aceite a temperatura ambiente.
- Juntas rotativas: Uno de los principales inconvenientes del uso de aceite en el proceso de moldeo rotacional es la introducción y extracción del mismo en el molde. Debido a que el molde se encuentra en proceso de giro continuo, debe disponerse de algún elemento que en los ejes de giro de la máquina permitan el paso del fluido sin interferir con el resto de elementos de la máquina. Para ello se ha recurrido a unas juntas rotativas, concretamente sellos mecánicos rotativos de rozamiento, de forma que a través de su interior transcurre una tubería de cobre con el fluido térmico, mientras que en el exterior forman parte de los ejes y soportes giratorios de la máquina.



Figura 5.10: Junta rotativa utilizada en la máquina de rotomoldeo fabricada.

- Válvulas de control: Para la selección del fluido térmico según su temperatura y la fase del proceso se disponen de un conjunto de válvulas. Mediante éstas es posible seleccionar el aceite caliente o a temperatura ambiente para su posterior introducción en el molde, válvulas de control de aspiración. Asimismo, el retorno de dicho fluido se derivará a sus respectivos depósitos de origen: baño termostático para aceite a alta

temperatura o depósito de aceite a temperatura ambiente. Este conjunto de válvulas corresponden a las de control de retorno.

#### 5.4.6. Sistema de protección y control eléctrico

La alimentación, protección y regulación eléctrica de los diferentes elementos eléctricos que componen la máquina de moldeo rotacional estarán realizadas por un cuadro eléctrico general. A partir del mismo se alimentarán los siguientes equipos:

- Motor eléctrico de movimiento de basculación
- Motor eléctrico de movimiento giratorio del molde
- Motor eléctrico de accionamiento de la bomba volumétrica de aceite
- Baño termostático de fluido térmico

Los motores de accionamiento del movimiento de basculación y de la bomba volumétrica de aceite no disponen de regulación eléctrica posible. En caso de requerirse la modificación de las velocidades de funcionamiento se actuará mediante el sistema de poleas y correas de cada sistema. En cualquier caso la velocidad de basculación y el flujo volumétrico de aceite son parámetros fijos que no requieren su modificación durante los procesos de ensayo. El movimiento giratorio del molde se encuentra regulado mediante un variador electrónico de velocidad que actúa sobre el motor eléctrico correspondiente, permitiendo variar fácilmente la velocidad de giro del molde.

Finalmente, el baño termostático dispone de un sistema de regulación de temperatura propio, incorporado en el mismo, pudiéndose establecer las temperaturas de calentamiento necesarias.

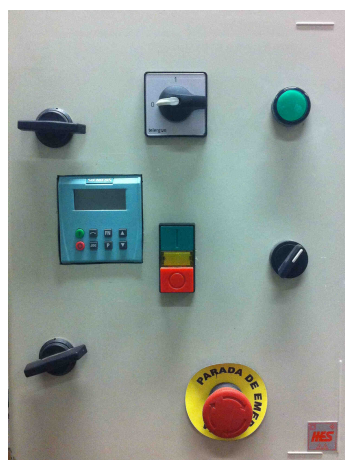


Figura 5.11: Cuadro de control de la máquina de rotomoldeo fabricada.

#### 5.4.7. Sistema de adquisición de datos

Diversos son los parámetros objeto de medición en el proceso de moldeo rotacional aunque resultaría complejo y costoso una parametrización completa del proceso.

Los parámetros mínimos necesarios para una correcta validación de los procesos de análisis, diseño y fabricación realizados con anterioridad en el molde prototipo fabricado son los siguientes:

- Medida de la temperatura del aire interior del molde
- Medida de la temperatura del fluido térmico
- Medida de la temperatura del molde
- Medida de la duración del proceso

Estos parámetros deben ser medidos de forma continua durante todo el proceso de moldeo rotacional sin embargo otros parámetros deben ser medidos con cierta regularidad para garantizar el correcto funcionamiento del proceso o para su comprobación y calibración al ser valores fijos preestablecidos. Estos son:

- Velocidad de giro del molde
- Velocidad de basculación
- Flujo volumétrico de aceite
- Niveles de aceite en depósito y baño termostático
- Medida de la potencia de los equipos electromecánicos

Para estos parámetros se ha utilizado sistemas convencionales de medida no siendo de interés la especificación de dichos métodos o aparatos sino los valores preestablecidos en las fases de ensayos.

##### 5.4.7.1. Termopares tipo K con data logger incorporado

La medición de las temperaturas del molde no resulta sencilla al encontrarse éste en continuo movimiento, fundamentalmente de giro. Por ello, no es posible la colocación de un sistema convencional de medición de temperatura al enrollarse el cableado necesario para la medición. Para la resolución de este inconveniente y obtener las mediciones correspondientes se ha recurrido a termopares con electrónica incorporada para el tratamiento y almacenamiento de los datos medidos.

Estos accesorios, con baterías incorporadas permiten almacenar la información captada por los termopares sin necesidad de alimentación externa convencional, cableado para la señal de salida ni sistemas electrónicos anexos. Esta solución, totalmente compacta y de tamaño reducido ha permitido la caracterización de la temperatura del aire interior del molde así como la temperatura de la cara del molde enfrentada a la entrada del fluido térmico.

La descarga de los datos obtenidos se realiza mediante la interface USB incorporada directamente en un ordenador, permitiéndose visualizar o exportar los datos obtenidos mediante un software incorporado con el equipo. A través de dicho software se programan los inicios o paradas de medición y almacenamiento de datos.



Figura 5.12: Termopar con data logger incorporado e interface USB.

Las características de estos termopares y su sistema integrado de almacenamiento son las siguientes [8]:

|   |                  |
|---|------------------|
| Fabricante:   | LASCAR           |
| Modelo:   | EL-USB-TC        |
| Tipo de termopar:   | K                |
| Rango de temperaturas del termopar:                         | -200 a 1.350 °C  |
| Rango de temperaturas de exposición del módulo electrónico: | -10 a 40 °C      |
| Resolución de medida:                                       | 0,5 °C           |
| Precisión de medida:  | ±1 °C            |
| Intervalos de almacenamiento de datos                       | 1s a 12 horas    |
| Terminal:   | cilíndrico 3 mm  |
| Longitud total:   | 1000 mm          |
| Batería:  | ½ AA 3,6 V Litio |
| Cubierta de sonda:  | acero inoxidable |

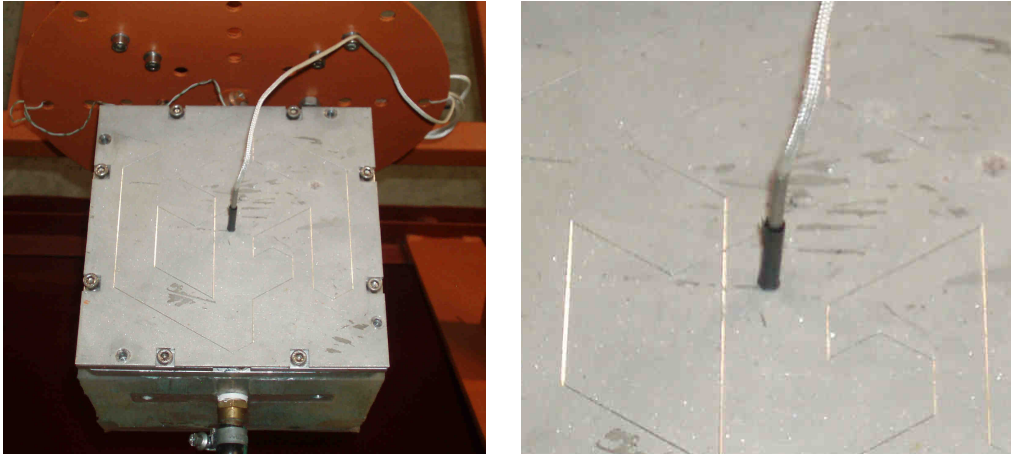


Figura 5.13: Ubicación de termopar para la medida de la temperatura del aire interior del molde.

El termopar para la medida del aire se encuentra directamente introducido en el interior del molde a través de la tapa de acceso al molde al cual se le ha realizado la perforación y soportes correspondientes.

Para la medida de la pared del molde, concretamente de la cavidad interior electroconformada en níquel, se ha utilizado otro termopar análogo pero con extremo final circular y plano, el cual ha sido adherido en el centro de la pared de entrada de dicha cavidad mediante resina epóxica. Las características del mismo son las siguientes [8]:

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Fabricante:   | LASCAR                      |
| Modelo:   | EL-USB-TC                   |
| Tipo de termopar:   | K                           |
| Rango de temperaturas del termopar:                         | -200 a 1.350 °C             |
| Rango de temperaturas de exposición del módulo electrónico: | -10 a 40 °C                 |
| Resolución de medida:                                       | 0,5 °C                      |
| Precisión de medida:  | ±1 °C                       |
| Intervalos de almacenamiento de datos                       | 1s a 12 horas               |
| Terminal adhesivo:  | Plano circular<br>Ø 6,35 mm |
| Longitud total:   | 1000 mm                     |
| Batería:  | ½ AA 3,6 V Litio            |
| Cubierta de sonda:  | Cobre                       |

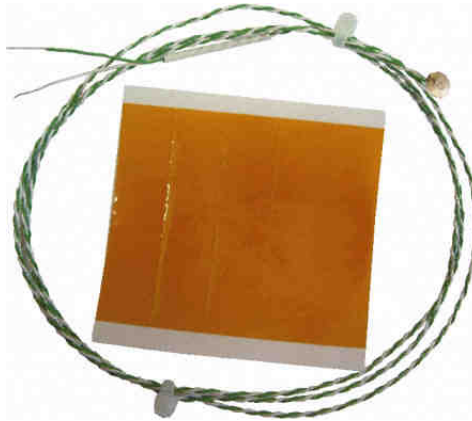


Figura 5.14: Termopar con terminar circular y film adhesivo.

#### 5.4.7.2. Sistema de medición de temperatura del fluido térmico

Para la medición de la temperatura del fluido térmico, y dada la inexistencia de elementos rotativos como en el caso de la medida de temperatura en el molde, se ha utilizado un equipo de medición de temperatura compuesto por termopares tipo K y equipo portátil de acondicionamiento de señal, visualización y almacenamiento de la medición con las siguientes características [9]:

|   |                  |
|---|------------------|
| Fabricante:   | RS               |
| Modelo:   | RS 1314          |
| Tipo de termopar:   | K                |
| Rango de temperaturas del termopar:                         | -200 a 1.372 °C  |
| Rango de temperaturas de exposición del módulo electrónico: | -10 a 60 °C      |
| Resolución de medida:                                       | 0,1 °C           |
| Precisión de medida:  | ± 0,35 °C        |
| Intervalos de almacenamiento de datos                       | 1s               |
| Terminal:   | cilíndrico 3 mm  |
| Longitud total:   | 500 mm           |
| Batería:  | 6 pilas AAA      |
| Cubierta de sonda:  | Acero inoxidable |

Mediante este equipo se han obtenido las temperaturas tanto del fluido en el proceso de calentamiento como en el enfriamiento, insertando las sondas en las zonas más próximas a las aspiraciones del fluido en los correspondientes depósitos de aceite caliente (baño electrostático) y de aceite frío (depósito de almacenamiento de aceite a temperatura



ambiente). El equipo, además de una pantalla para la visualización en tiempo de real de la medición, dispone de un puerto de comunicaciones RS-232 para la descarga a un ordenador de los datos obtenidos lo cual resulta de vital importancia para el posterior tratamiento de datos.



Figura 5.16: Medidor de temperatura digital RS y termopar incorporado.

#### 5.4.8. Control del proceso de calentamiento y enfriamiento

Durante el proceso de moldeo rotacional se producen dos etapas fundamentales en cuanto a la temperatura del proceso: la etapa de calentamiento del molde y la de enfriamiento.

Durante el proceso de calentamiento el sistema de válvulas instaladas para el control de la aspiración permite la succión desde el baño termostático del aceite mediante la bomba volumétrica. Tras su introducción en el molde, el fluido vuelve a recircularse al depósito del baño termostático, esta vez por efecto de la gravedad, para lo cual y mediante un segundo sistema de válvulas, esta vez de control del retorno.

De forma análoga a la etapa de calentamiento, el sistema de válvulas de control de aspiración permite seleccionar los conductos de aspiración del depósito de aceite a temperatura ambiente para su introducción en el molde. Por otra parte, el sistema de válvulas de control de retorno también permite recircular hasta el mismo depósito el aceite a la salida del molde.

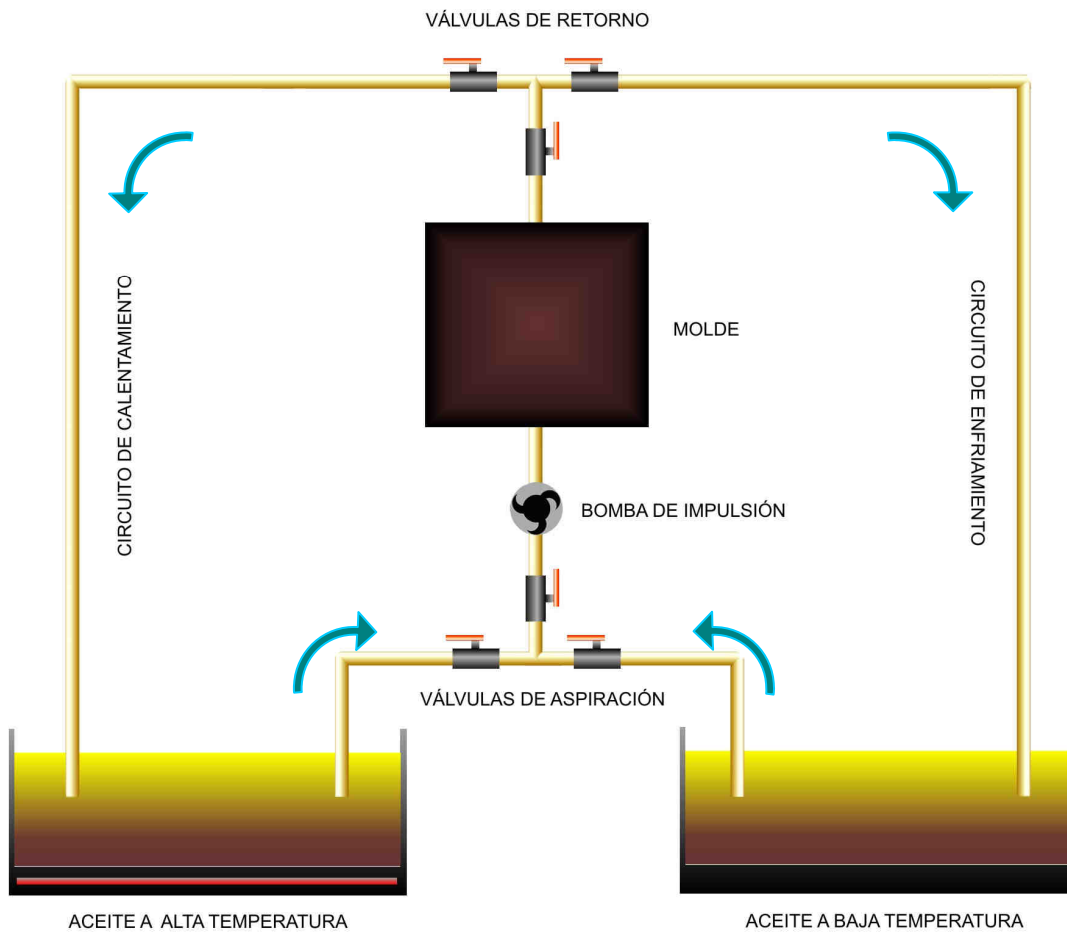


Figura 5.17: Esquema de procesos de calentamiento y enfriamiento de la máquina de rotomoldeo fabricada.

Estos procesos se controlan industrialmente de forma automática, mediante autómatas programables, sondas y actuadores diversos. Sin embargo y dada la finalidad investigadora de la máquina fabricada carece de importancia la automatización de los procesos de calentamiento y enfriamiento por lo que la actuación sobre este sistema se realizará de forma manual a través de un operario.

#### 5.4.9. Máquina de ensayos de moldeo rotacional fabricada

Tras la descripción de los diseños, fabricación de componentes e instalación de equipos y accesorios se dispone de una máquina completa de ensayos de los procesos de moldeo rotacional. Dicha máquina ha sido realizada en el Laboratorio de Fabricación Integrada de la ULPGC como se muestra en las siguientes imágenes:

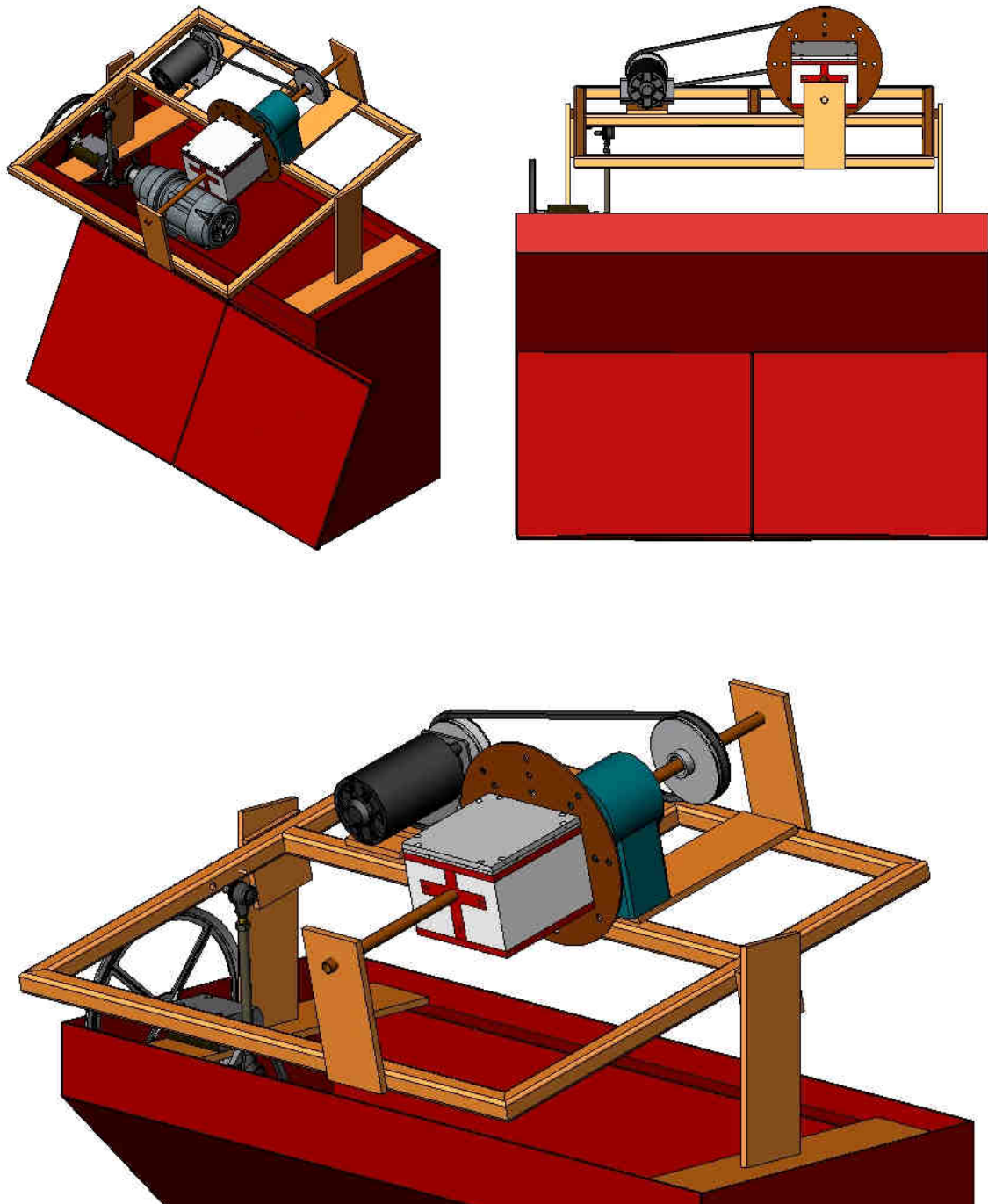


Figura 5.18: Imágenes varias del diseño general de la máquina de moldeo rotacional.



Figura 5.19: Imágenes varias reales de la máquina de moldeo rotacional fabricada incluyendo carcasa exterior de protección.

## 5.5. FLUIDO TÉRMICO DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

El proceso de moldeo rotacional desarrollado requiere de un fluido térmico para los procesos de transferencia térmica cuya principal finalidad radica en aumentar o disminuir la temperatura del molde, ya sea en la fase de calentamiento o en la de enfriamiento, y consecuentemente la del material polimérico depositado en su interior.

El uso de aceites para procesos de transferencia térmica está inequívocamente comprobado y extendido internacionalmente, tanto en procesos calefactores como de refrigeración.

Se ha seleccionado el aceite sintético SM-OIL TEMPLE del fabricante SMYTH-MORRIS que dispone de las siguientes características principales [10]:

- Densidad: Según figura 5.20
- Punto de inflamación: 185 °C
- Punto de ebullición: 330 °C
- Calor específico: Según figura 5.21
- Conductividad térmica: Según figura 5.22
- Viscosidad: Según figura 5.23

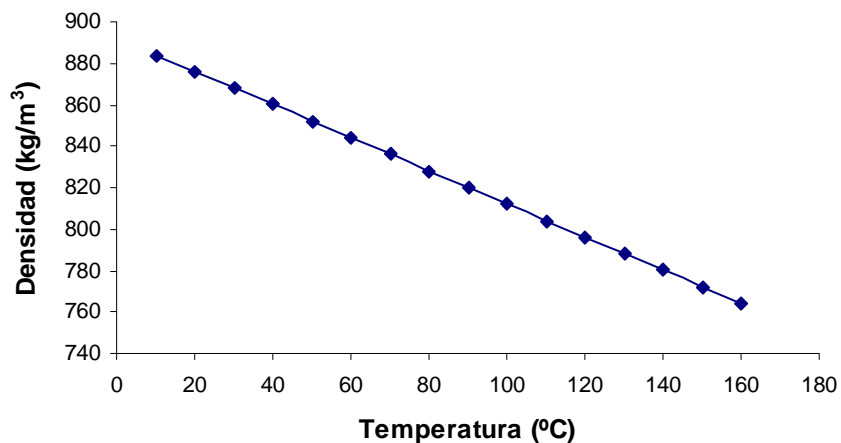


Figura 5.20: Gráfica de densidad del SM-OIL TEMPLE.

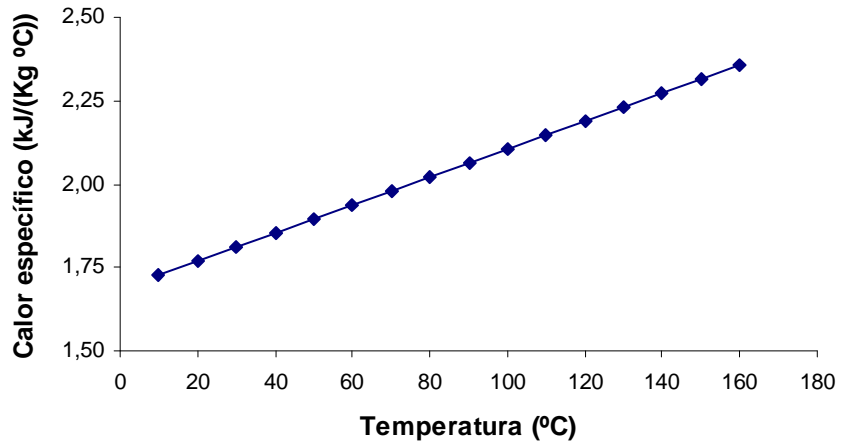


Figura 5.21: Gráfica de calor específico del SM-OIL TEMPLE.

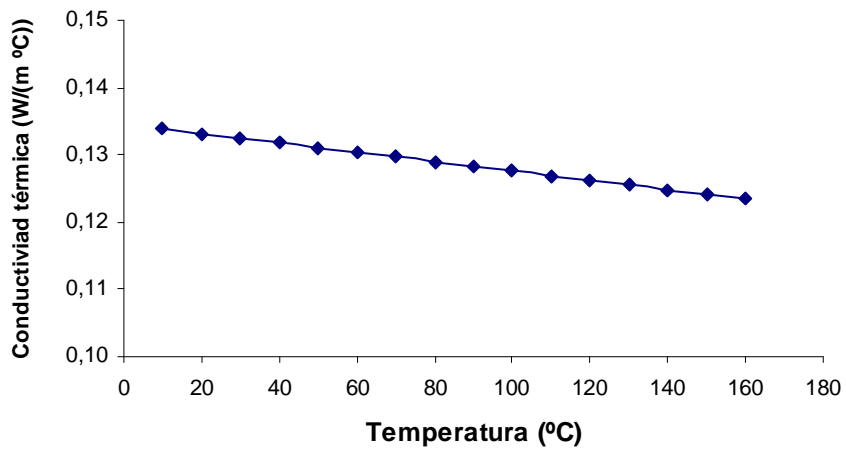


Figura 5.22: Gráfica de conductividad térmica del SM-OIL TEMPLE.

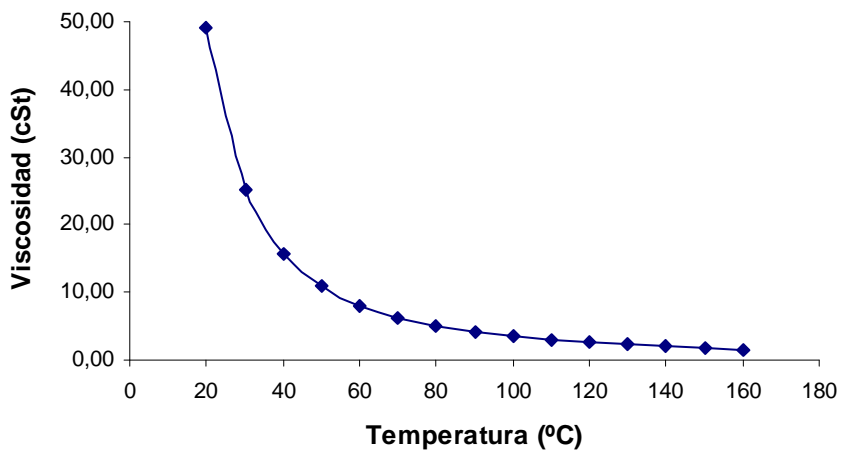


Figura 5.23: Gráfica de viscosidad del SM-OIL TEMPLE.

Dicho fluido ha sido utilizado tanto para los procesos de calentamiento como de enfriamiento del molde.

## 5.6. MATERIAL POLIMÉRICO UTILIZADO PARA ENSAYOS

Múltiples son los polímeros disponibles a nivel industrial, tanto para los procesos más convencionales de conformación de piezas plásticas como para los procesos de moldeo rotacional. Sin embargo, existen algunos criterios generales que los plásticos tienen que cumplir antes de que puedan ser clasificados como aptos para este proceso, como pueden ser:

- Disponibilidad del material principalmente en forma de polvo
- Transformación del estado sólido al estado líquido con relativa rapidez.
- Capacidad para cubrir la superficie del molde en forma homogénea
- Viscosidad adecuada durante el procesado. Fundamentalmente no debe ser de demasiado baja.
- Estabilidad térmica tras su procesado.

A pesar de ello, la elección del material dependerá de múltiples factores, además de los propios del proceso de fabricación, como pueden ser los requerimientos del producto final, las condiciones de su utilización o funcionalidad, etc.

Según Crawford y Kearns [7], actualmente el polietileno representa aproximadamente el 90% de los polímeros utilizados en el moldeo rotacional, aunque existen otros materiales ampliamente utilizados como plastisoles de PVC, nylon, policarbonato, polipropileno, poliéster insaturado, ABS, poliuretanos, polibutilenos, ...

Para la realización de ensayos en la máquina de moldeo rotacional desarrollada y mediante el molde fabricado se ha utilizado como material el denominado EVA.

El EVA es obtenido mediante la copolimerización del acetato de vinilo con el etileno, con una proporción de acetato de vinilo entre un 5% y un 50%. El aumento de la concentración de acetato de vinilo produce la disminución de la cristalinidad, el aumento de la ductilidad, y la disminución de resistencia a la tracción de este material aunque generalmente se caracteriza por disponer de un acabado de gran suavidad, flexibilidad, gran moldeabilidad y buenas propiedades a bajas temperaturas.

Su principal ventaja respecto a otros materiales radica en su bajo rango de temperaturas de fusión para su procesado, desde 85 °C hasta 120 °C, razón por la cual ha sido elegido para nuestros ensayos. Su baja temperatura de fusión permite la realización de

ensayos de rotomoldeo a temperaturas moderadas en comparación con los procesos estándar que superan los 300°C. Dicho material se adapta perfectamente a las limitaciones y requerimientos de la máquina de ensayo desarrollada, aunque es posible la experimentación con otros materiales en líneas futuras de investigación.

Las características principales del EVA utilizado, concretamente del producto comercial ALCUDIA® PA-538 del fabricante Repsol YPF, son las siguientes [10]:

| PROPIEDADES  | MÉTODO      | UNIDADES              |
|--|-------------|-----------------------|
| <b>Generales</b>                                   |             |                       |
| Índice de Fluidez (190°C, 2.16kg)                  | ISO 1133    | 2 g/10 min            |
| Contenido en Acetato vinilo                        | Interno     | 18 %                  |
| Densidad a 23°C                                    | ISO 1183    | 937 kg/m <sup>3</sup> |
| Temperatura de reblandecimiento Vicat (carga 10 N) | ISO 306     | 64 °C                 |
| Temperatura de fusión                              | Interno     | 87 °C                 |
| Environmental Stress-Cracking Resistance (ESCR)    | ASTM D-1693 | > 300 h(F50)          |
| <b>Mecánicas</b>                                   |             |                       |
| Resistencia a Tracción en el Punto de Rotura       | ISO 527-2   | 17 MPa                |
| Alargamiento en el Punto de Rotura                 | ISO 527-2   | 750 %                 |
| Dureza Shore A                                     | ISO 868     | 90                    |
| Dureza Shore D                                     | ISO 868     | 38                    |

## 5.7. CONDICIONES PREESTABLECIDAS, VARIABLES DE ENSAYO Y RESULTADOS A OBTENER

Múltiples son los parámetros involucrados en el proceso de rotomoldeo así como las variables que influyen en los resultados que en ellos se obtienen. Es por ello que deben establecerse aquellos parámetros preestablecidos en cada ensayo o de forma global que son invariables así como las variables que serán objeto de manipulación para la modificación de los resultados a obtener.

Los principales parámetros preestablecidos y sus valores de consigna seleccionados, que se mantendrán invariables durante todos los procesos de ensayos son los siguientes:



- Velocidad de giro del molde: 50 rpm
- Velocidad de basculación: 5 rpm
- Flujo volumétrico de aceite:  $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
- Niveles de aceite en depósito y baño termostático: 90% de capacidad

Las variables objeto de modificación durante el proceso de experimentación son las siguientes:

- Temperatura del fluido térmico
- Cantidad de material polimérico
- Granulometría del material polimérico
- Tiempo de ciclo. Calentamiento y/o enfriamiento

El propio proceso de moldeo rotacional requiere de la modificación de las temperaturas del fluido térmico según las fases del mismo, sin embargo, la temperatura del proceso de calentamiento influyen muy significativamente en el proceso, por lo que durante los procesos de ensayo una de las principales variables utilizadas es la temperatura máxima de calentamiento utilizada en cada ensayo. Las temperaturas de calentamiento ensayadas corresponden a 100 °C, 120 °C, 140 °C y 160 °C.

La temperatura de enfriamiento influye fundamentalmente en las propiedades mecánicas de la pieza fabricada, sin embargo es la etapa de calentamiento donde destaca la ineficiencia de los procesos de rotomoldeo convencionales, así como la fase de mayor interés para el desarrollo de nuevos procesos y moldes, por lo que no se ha estudiado con detalle los efectos del proceso de enfriamiento en el presente trabajo de investigación. En cualquier caso la temperatura de enfriamiento será la del aceite térmico en el depósito de enfriamiento según las condiciones ambientales y los efectos de la recirculación de aceite en el proceso de enfriamiento en los diferentes ciclos que se realicen.

La cantidad de polímero utilizado constituye el segundo factor de interés e importancia tanto para el proceso de rotomoldeo, los tiempos de ciclo y las velocidades de las fases de calentamiento y enfriamiento. Se han utilizado cantidades desde 0 g (ensayos en vacío), 35 g, 70 g y 100 g en los diferentes ensayos.

La granulometría del polímero utilizado resulta por otra parte de interés en el proceso, utilizándose diferentes proporciones de los siguientes tamaños de partícula, que

se especificarán en los resultados de cada ensayo. Los diferentes tamaños de partículas de polvo de EVA utilizados son los siguientes:

- 125 micrómetros
- 212 micrómetros
- 250 micrómetros
- 400 micrómetros

La granulometría utilizada de forma general en la mayoría de ensayos corresponde a la siguiente:

- 30% 125 micrómetros
- 25% 212 micrómetros
- 15% 250 micrómetros
- 30% 400 micrómetros

A pesar de ello se han realizado ensayos con tamaños de partícula únicamente de 125 y 400 micrómetros para realizar un análisis comparativo de la influencia de dicha variable en los resultados de los ensayos.

Para la obtención de las características granulométricas y de peso del material, según se ha especificado anteriormente, se han utilizado sistemas electrónicos y automatizados de trituración, molienda, tamizado y pesaje, a partir del material en formato de granza hasta obtenerlo en dichas condiciones en forma pulverizada.

Finalmente y en cuanto a los tiempos de ciclo ensayado se han realizado ensayos con diferentes tiempos de calentamiento:

- 5 minutos
- 15 minutos
- 25 minutos
- 40 minutos

Todos los procesos de enfriamiento se han realizado en un intervalo de 5 minutos, fundamentalmente porque dicha duración de enfriamiento resulta suficiente para el enfriamiento del molde y de la pieza rotomoldeada hasta una temperatura adecuada para

su extracción. Generalmente tras dicho periodo se obtienen temperaturas de aceite y de molde inferiores a 60°C.

En todos los procesos de ensayos realizados los principales resultados a obtener, y por tanto, dependiente de los variables establecidos, son los siguientes:

- Temperatura del fluido térmico
- Temperatura del aire interior del molde
- Temperatura del molde
- Tiempo de ciclo. Calentamiento y/o enfriamiento

Existen otros factores de interés, que si bien son secundarios en el presente trabajo de investigación, también resultan de importancia para una mayor validación de los diseños y procesos desarrollados así como de una completa caracterización del proceso de moldeo rotacional. Estos son las características físicas de las piezas generadas, concretamente su acabado superficial, nivel de fluidificación y posterior solidificación y fundamentalmente distribución de espesores.

## **5.8. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN**

En los procesos de experimentación o ensayo, en cualquier campo de aplicación o área de estudio, debe establecerse un procedimiento concreto que organice y estructure las actuaciones a realizar durante dicho proceso. De esta manera es posible obtener una mayor fiabilidad en el desarrollo de los ensayos, eliminando la improvisación, reduciendo las posibles variaciones incontroladas y por tanto, minimizando los posibles errores de ejecución de los ensayos.

La metodología desarrollada para la realización de los ensayos de moldeo rotacional llevados a cabo en el presente trabajo de investigación puede resumirse de la siguiente manera:

### ***Fase previa:***

1. Revisión inicial de la máquina y comprobaciones generales.
2. Encendido del baño termostático.

3. Regulación y establecimiento de la temperatura de calentamiento del baño termostático.
4. Preparación del material polimérico. Selección de granulometría y pesaje.
5. Apertura del molde y limpieza de cavidad interior.
6. Preparación de sondas de medida.
7. Aplicación de desmoldeante en interior de la cavidad del molde.
8. Introducción de material polimérico en el interior del molde.
9. Cierre y comprobación del molde.
10. Comprobación de la temperatura del aceite del baño termostático.
11. Colocación de las sondas de medida.
12. Selección del sistema de válvulas en modo de fase de calentamiento.

***Fase de calentamiento:***

13. Inicio del tiempo de ciclo del ensayo.
14. Activación de las sondas de medida.
15. Encendido de la bomba de impulsión de aceite.
16. Encendido del sistema de basculación del molde.
17. Encendido del sistema de giro del molde.
18. Comprobación de los sistemas accionados.
19. Comprobación de la máquina y sus elementos durante la fase de calentamiento.
20. Comprobación y vigilancia de la duración del ciclo hasta la finalización del proceso de calentamiento.

***Fase de enfriamiento:***

21. Cambio de posición del sistema de válvulas a modo de fase de enfriamiento.
22. Parada del baño termostático. Solo en caso de no continuar con ensayos posteriores.
23. Comprobación de la máquina y sus elementos durante la fase de enfriamiento.
24. Comprobación y vigilancia de la duración del ciclo hasta la finalización del proceso de enfriamiento.
25. Determinación de la finalización del ciclo.
26. Parada de la bomba de impulsión de aceite.
27. Parada del sistema de basculación del molde.
28. Parada del sistema de giro del molde.
29. Parada de las sondas de medida.

30. Apertura de la tapa superior del molde.
31. Descarga y almacenamiento de los datos de ensayo medidos.
32. Comprobación de la máquina y sus elementos.
33. Comprobación de la temperatura interior del molde y de pieza rotomoldeada.
34. Extracción de la pieza rotomoldeada.
35. Finalización de ensayo.

Tras la finalización de los ensayos se han realizado una serie de actuaciones, fundamentalmente de tratamiento de datos, así como del estudio de las piezas rotomoldeadas, cuyos resultados se exponen en apartados posteriores.

### **5.9. ENSAYOS MEDIANTE AGUA COMO FLUIDO TÉRMICO**

Como fase previa a los ensayos definitivos se han llevado a cabo diferentes pruebas de funcionamiento de la máquina de moldeo rotacional desarrollada utilizando agua como fluido del proceso.

Las condiciones de funcionamiento de la máquina así como del propio proceso de rotomoldeo en las pruebas y ensayos con agua son similares a las descritas con anterioridad para el uso de aceite térmico. Las únicas modificaciones realizadas en el proceso radican en la disminución de la temperatura máxima en el proceso de calentamiento, no superando los 90 °C por las limitaciones del estado líquido del agua, así como la utilización de un atemperador específico para agua, en sustitución del baño termostático de aceite.

Mediante estas pruebas ha sido posible ajustar los elementos hidráulicos de la máquina, ajustar y revisar la estanqueidad del molde y sus elementos interiores así como ensayar en fase previa la máquina de rotomoldeo. El uso de agua, fundamentalmente en las pruebas y comprobaciones iniciales de la máquina y molde, permiten trabajar en mayores condiciones de seguridad, limpieza e higiene en el proceso de puesta en marcha dado la facilidad de limpieza, manipulación y temperaturas de trabajo del agua.

Tras las pruebas iniciales, comprobaciones y ajustes generales se ha procedido a la realización de ensayos reales de rotomoldeo, tanto en condiciones de vacío, sin material polimérico, como en condiciones con material como proceso real de fabricación.

Los resultados de dichos ensayos han sido satisfactorios en la medida que han permitido desarrollar el proceso completo de rotomoldeo, testear la máquina y moldes fabricados, así como incluso generar piezas rotomoldeadas reales, con la peculiaridad de ser estas de mínima consistencia y cohesión entre las diferentes partes de la pieza fundamentalmente por las bajas temperaturas de proceso establecidas.

Finalmente se han modificado las conexiones oleohidráulicas para el uso definitivo de aceite térmico. También se ha realizado la purga de agua de los circuitos hidráulicos, disponiéndose la máquina para los ensayos con aceite térmico.

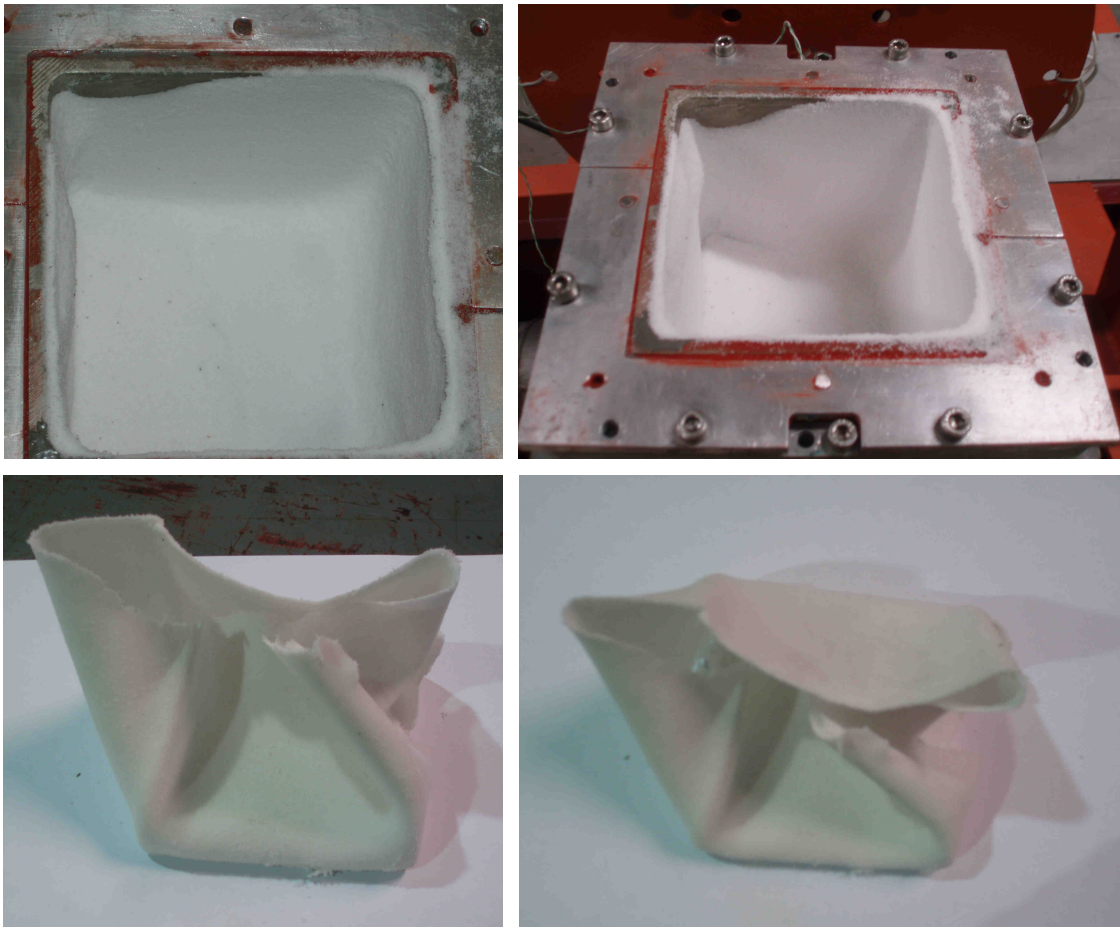


Figura 5.24: Imágenes de piezas obtenidas con agua como fluido térmico en máquina de moldeo rotacional fabricada.

### 5.10. ENSAYOS MEDIANTE ACEITE COMO FLUIDO TÉRMICO

Los ensayos definitivos realizados se han ejecutado con aceite térmico SM-OIL TEMPLE como fluido térmico en todo el proceso cuyas características se han expuesto anteriormente.

Cabe destacar la existencia de diferencias en las características físicas del aceite inicialmente modelado en las fases iniciales de diseño, cálculo y simulación mediante CFD y del aceite térmico real finalmente utilizado. Este hecho sin embargo solo afecta a las simulaciones iniciales de comparación de los moldes de calentamiento por aceite térmico mediante canales exteriores y canal envolvente y a la optimización del manifold. En cualquier caso, todos los procesos de simulación se han realizado mediante las mismas bases de cálculo y características del aceite como fluido térmico por lo que los resultados obtenidos son totalmente válidos y comparables entre los diferentes modelos estudiados.

Tras la realización de los ensayos finales de moldeo rotacional mediante la máquina y molde desarrollados se han realizado nuevas simulaciones mediante CFD con las características del aceite real utilizado, pudiendo establecer un estudio comparativo entre simulaciones y ensayos reales totalmente válidos.

Dicho lo anterior, se han realizado una cantidad superior a 50 ensayos reales mediante la combinación de las diferentes variables que interfieren en el proceso. De esta forma, se han ensayado diferentes temperaturas de calentamiento, tiempos de ciclo, granulometrías y cantidades de material polimérico.

Se han seleccionado 29 ensayos reales con aceite térmico para los estudios comparativos entre los resultados de dichos ensayos, los resultados obtenidos en los procesos de simulación y los resultados disponibles de ensayos de similares características obtenidos mediante entidades que han colaborado en el presente trabajo de investigación.

Todos los resultados, simulaciones y comparativas referidas en el párrafo anterior serán ampliamente expuestos y analizados en el posterior capítulo, desarrollando las principales conclusiones de los mismos, y por tanto, de este trabajo.

## **5.11. TRATAMIENTO DE DATOS**

La correcta y ordenada manipulación de los datos obtenidos tanto en los procesos de simulación como en los ensayos resulta de vital importancia para la validación de este y cualquier trabajo de investigación. Por tanto, el tratamiento de datos debe ser

cuidadosamente realizado evitando cualquier tipo de interferencia, modificación o manipulación incontrolada.

Toda la información disponible tanto de los procesos de cálculo y simulación mediante CFD así como los obtenidos mediante las diferentes sondas y equipos de medición han sido obtenidos, manipulados y almacenados mediante las propias herramientas informáticas dispuestas por los mismos. Asimismo han sido ampliamente utilizados software de tratamiento de datos, fundamentalmente hojas de cálculo, para su modificación, estructuración y visualización.

Estas herramientas han permitido además la realización de estudios comparativos entre resultados, obtención de parámetros estadísticos y la generación de gráficas e imágenes fundamentales para el entendimiento de los mismos, los cuales, tal y como se ha detallado anteriormente, se encuentran desarrollados en el capítulo VI.



## *Capítulo VI*

### **EXPOSICIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS**



## **6. EXPOSICIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS**

### **6.1. INTRODUCCIÓN**

En los capítulos anteriores se han desarrollado diferentes apartados de este trabajo de investigación desde los fundamentos teóricos hasta los procesos de fabricación utilizados para la obtención de un molde prototipo de rotomoldeo.

En el presente capítulo se centra la atención en la recopilación, exposición y fundamentalmente en el análisis de los resultados obtenidos mediante los ensayos experimentales ejecutados en el banco de ensayo de laboratorio experimental desarrollado. Para ello se ha realizado el almacenamiento, clasificación, codificación, reestructuración y ajustes de los resultados obtenidos dentro del denominado proceso de tratamiento de datos.

### **6.2. RELACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS**

Múltiples son las configuraciones que han sido ensayadas, así como los parámetros y variables modificadas en el conjunto de ensayos de rotomoldeo. Sin embargo ni todos los ensayos realizados han sido válidos ni todos son rigurosamente analizables, por lo que debe establecerse un conjunto de ensayos óptimos que permitan un correcto y válido análisis de resultados.

Para el análisis final de los resultados se han seleccionado un conjunto de ensayos, descartando aquellos realizados inicialmente para la comprobación y puesta a punto del banco de ensayo experimental, también los realizados inicialmente con agua como fluido térmico, así como los realizados con o sin material y mediante el uso de aceite térmico que hayan visto alterado su normal desarrollo por motivos externos o fallos de funcionamiento.

Finalmente se han seleccionado 29 ensayos, entre un conjunto superior a 50, para su completo análisis, tanto de las diferencias entre ensayos como en comparación con los procesos de cálculo y simulación iniciales realizados para el desarrollo del molde prototipo de rotomoldeo.

En la tabla 6.1 se relacionan los ensayos seleccionados, detallando sus principales características. Nótese que los restantes parámetros no especificados no han sufrido

modificación en ningún ensayo, siendo sus valores los establecidos en el apartado 5.7 del capítulo 5.

| Código | Temp. (°C) | Duración de calentamiento (s) | Duración de enfriamiento (s) | Cantidad material (g) | Granulometría | Grupo de ensayo                               |
|--------|------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------|---|
| 1      | 100        | 900                           | 300                          | 0                     | -             | Ensayos en vacío                              |
| 2      | 100        | 900                           | 300                          | 0                     | -             |   |
| 3      | 100        | 900                           | 300                          | 0                     | -             |   |
| 4      | 120        | 900                           | 300                          | 0                     | -             |   |
| 5      | 120        | 900                           | 300                          | 0                     | -             |   |
| 6      | 120        | 900                           | 300                          | 0                     | -             |   |
| 7      | 140        | 900                           | 300                          | 0                     | -             |   |
| 8      | 140        | 900                           | 300                          | 0                     | -             |   |
| 9      | 140        | 900                           | 300                          | 0                     | -             |   |
| 10     | 100        | 900                           | 300                          | 70                    | General       | Variación de temperaturas                     |
| 11     | 100        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 12     | 100        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 13     | 120        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 14     | 120        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 15     | 120        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 16     | 140        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 17     | 140        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 18     | 140        | 900                           | 300                          | 70                    | General       | Variación del tiempo de calentamiento a 140°C |
| 19     | 140        | 300                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 18     | 140        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 20     | 140        | 1500                          | 300                          | 70                    | General       | Variación de tiempo de calentamiento a 160°C  |
| 21     | 140        | 2400                          | 300                          | 70                    | General       |   |
| 22     | 160        | 300                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 23     | 160        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 24     | 160        | 1500                          | 300                          | 70                    | General       | Variación de granulometría                    |
| 25     | 160        | 2400                          | 300                          | 70                    | General       |   |
| 26     | 140        | 900                           | 300                          | 70                    | 400 micras    |   |
| 27     | 140        | 900                           | 300                          | 70                    | 125 micras    | Variación de carga de material                |
| 18     | 140        | 900                           | 300                          | 70                    | General       |   |
| 28     | 140        | 1500                          | 300                          | 35                    | General       |   |
| 29     | 140        | 1500                          | 300                          | 100                   | General       |   |
| 20     | 140        | 1500                          | 300                          | 70                    | General       |   |

Tabla 6.1: Relación y caracterización básica de los ensayos experimentales seleccionados para su análisis.

Las diferentes variables principales de ensayos de la tabla 6.1 se encuentran sujetas a los siguientes rangos:

- Temperatura: se han realizado ensayos desde 100 hasta 160 °C.
- Duración de calentamiento: De forma estándar se ensayaron tiempos de calentamiento de 15 minutos (900 segundos) aunque se realizaron ensayos específicos de 300, 1500 y 2400 segundos.

- Duración de enfriamiento: De forma generalizada, la duración del proceso de enfriamiento se estableció en 5 minutos (300 segundos)
- Cantidad de material: Los ensayos en vacío se realizaron sin material. En cuanto al resto de ensayos, se estableció de forma general una cantidad de material de 70 gramos. También se realizaron ensayos a 35 y 100 g.
- Granulometría: La granulometría general establecida corresponde a la siguiente configuración obtenida de diferentes centros de investigación y estudios anteriores [1] [2]:
  - 30% 125 micrómetros
  - 25% 212 micrómetros
  - 15% 250 micrómetros
  - 30% 400 micrómetros

De forma concreta se realizaron ensayos con el menor y mayor tamaño de partícula para analizar el efecto que producen en el proceso.

- Grupo de ensayos: los diferentes ensayos han sido agrupados en función de la variable modificada, para analizar el efecto producido, manteniendo el resto de parámetros invariables.

Se ha establecido un código numérico simple a cada ensayo, para su correcta identificación, desde el número 1 hasta el 29. Nótese que determinados ensayos, concretamente el número 18 y el 20, han sido utilizados en varios grupos de ensayos diferentes ya que permiten su uso comparativo en varios grupos.

### **6.3. GRUPOS DE ENSAYOS**

El agrupamiento de ensayos, entendiéndose este como la asociación de ensayos que comparten las mismas variables durante el ensayo, manteniendo el resto sin modificación, permite analizar el comportamiento del proceso de rotomoldeo, tanto desde el punto de vista de sus parámetros principales como de las características de las piezas generadas.

Los parámetros establecidos en los diferentes ensayos no han surgido de manera espontánea o aleatoria sino que se enmarcan dentro de los rangos adecuados de funcionamiento según ensayos previos que se desarrollaron inicialmente a modo de ajustes iniciales y de calibración.

Según lo anterior, y además de las limitaciones establecidas por el propio banco de ensayos, se han valorado los diferentes rangos de los parámetros objetos de estudio en el proceso de rotomoldeo.

La temperatura mínima de calentamiento del ensayo se estableció en 100 °C, pues la fusión del material en polvo EVA se produce a 87 °C aproximadamente. Como medida de seguridad, por problemas de inflamabilidad del aceite como fluido térmico, se limitó la temperatura máxima de calentamiento a 160 °C.

En los diferentes ensayos previos se ha puesto de manifiesto la necesidad de producir tiempos de calentamiento superiores a los 600 s con el fin de alcanzar temperaturas representativas en el interior del molde, aunque no sea necesario para la solidificación completa de la pieza en muchos casos. Asimismo se alcanzan temperaturas de enfriamiento aceptables en estos ensayos experimentales, entre 40 y 60 °C, con tiempos de enfriamiento de 300 s.

La cantidad estándar de 70 g corresponde a la cantidad necesaria para obtener un espesor de pieza entre 2 y 3 mm según la geometría del molde. Cantidades de material inferiores pueden producir espesores demasiados pequeños para una correcta y completa formación de las piezas, mientras que cantidades muy superiores requieren de mayores cotas de temperatura y tiempos de ciclo para un completo aprovechamiento del material.

Finalmente se ha utilizado de forma general una granulometría estándar del material en polvo según se ha especificado con anterioridad.

A continuación se establecen en detalle los grupos de ensayos establecidos así como su finalidad y datos de interés.

### **6.3.1. Ensayos en vacío**

Debido a que las herramientas informáticas disponibles no permiten realizar simulaciones del proceso de moldeo rotacional con material, resulta de enorme interés disponer de los resultados reales del proceso de rotomoldeo realizados con el molde y máquina experimental, desarrollados ambos en este proyecto de investigación. De esta forma, la comparación entre los procesos de simulación y los ensayos experimentales no tan solo es posible, sino totalmente validable, teniendo en cuenta el establecimiento de los mismo parámetros, variables y condicionantes en ambos casos.

Los ensayos en vacío se han realizado sin material en el interior del molde como principal elemento característico y diferenciador del resto de ensayos.

Se han realizado 9 ensayos principales, con un ciclo completo de 1200 s, perteneciendo los primeros 900 segundos a la fase de calentamiento, y los restantes a la de enfriamiento.

Las temperaturas del proceso de calentamiento para estos ensayos corresponden a 100 °C, 120 °C y 140 °C, las cuales son consideradas como temperaturas de referencia. Para cada temperatura se han seleccionado tres ensayos, permitiendo obtener un mínimo de datos para la validación de los ensayos.

Los objetivos principales de los ensayos de vacío, y como se ha explicado anteriormente, radican en establecer un marco comparativo para la validación de los procesos de simulación, a la vez de caracterizar el comportamiento real del proceso de moldeo rotacional en cuanto a las temperaturas de los diferentes fluidos y elementos sólidos que participan en el proceso.

### **6.3.2. Variación de temperaturas**

De forma análoga a los ensayos en vacío, se desarrollan 3 ensayos para cada una de las tres temperaturas de calentamiento establecidas y con la temporización anteriormente expuesta, pero en esta ocasión incorporando una carga polimérica de EVA, concretamente 70 g, con la granulometría general elegida.

Si bien estos ensayos no pueden ser evaluados comparativamente con los procesos de simulación, al disponerse de material polimérico en los ensayos reales lo cual no ha sido posible modelar de forma computacional, sí han permitido desarrollar definitivamente y de forma completa el proceso de fabricación mediante moldeo rotacional.

A partir de dichos ensayos no solo se han obtenido los datos reales del proceso, esta vez con material, sino se ha producido la fabricación real de piezas totalmente desarrolladas, perfectamente analizables y con las limitaciones de acabado y prestaciones que el propio proceso experimental impone.

Uno de los objetivos principales de dicho grupo de ensayos consiste en permitir, a partir de los resultados obtenidos, realizar un estudio detallado del comportamiento del

proceso, los efectos de solidificación y generación de la pieza, así como el análisis del efecto producido por la modificación de una de las variables principales del proceso; la temperatura de calentamiento.

### **6.3.3. Variación del tiempo de calentamiento a 140°C**

Tras la manipulación de la variable de temperatura de calentamiento cabe plantarse el efecto que sobre el proceso produce la variación del tiempo establecido para la fase de calentamiento.

Se han realizado 3 ensayos a 140 °C como temperatura de calentamiento, manteniendo igualmente las condiciones de carga de material, su granulometría, y el resto de parámetros secundario, realizando una modificación sustancial, en cada caso, del tiempo de calentamiento: 300 s, 1500 s y 2400 s.

La selección de la temperatura de 140 °C se encuentra motivada por el mejor acabado y densificación de las piezas fabricadas respecto a las temperaturas inferiores ensayadas, lo cual hace a aquella temperatura la mejor entre las ensayadas hasta ahora para la evaluación de los efectos del cambio de tiempo de calentamiento.

Se ha dispuesto de los datos del ensayo número 18 en este grupo de ensayos pues permite su aprovechamiento en el análisis de este grupo, al disponer de las mismas condiciones de ensayo. De esta forma se evita reiterar ensayos que se han considerados como válidos, permitiendo completar el rango de tiempos de ciclo de calentamiento.

Con estos ensayos particulares se ha permitido conocer la relevancia de dicha variable, fundamentalmente en el acabado y prestaciones de la pieza fabricada. Además se obtiene información relevante del comportamiento de las temperaturas del proceso orientadas fundamentalmente a la reducción del tiempo de ciclo.

### **6.3.4. Variación del tiempo de calentamiento a 160°C**

Los resultados del grupo de ensayos anterior propician la realización del mismo grupo de ensayos pero seleccionando una nueva temperatura, a 160 °C, muy próxima a la temperatura establecida como máxima dentro de las limitaciones de la máquina de ensayo experimental.



Esta nueva temperatura, considerada como máxima, aportará importantes datos, desde las posibles variaciones en la rapidez del calentamiento, las diferencias y mejoras que se puedan producir en la densificación y acabado final de las piezas fabricadas, o la reducción del ciclo al producirse este de manera más acelerada que con temperaturas inferiores.

En esta ocasión se mantiene la misma configuración de parámetros que en el grupo de ensayos anterior, con la excepción de la temperatura de calentamiento.

#### **6.3.5. Variación de granulometría**

La granulometría es una variable que puede influir en el desarrollo del ciclo, entre otros aspectos, por lo que también resulta de interés analizar los efectos que la variación de dicho parámetro pueda producir.

Uno de los últimos grupos, compuesto por 3 ensayos, se han realizado a 140 °C, 900 segundos de calentamiento, 300 s de enfriamiento y 70 g de carga de material EVA.

Las granulometrías ensayadas corresponden a la mínima y a la máxima disponibles, las cuales se consideran que afectan más significativamente al proceso, mientras que el ensayo 18 es tomado como ensayo base de comparación con una granulometría general, como en casos anteriores.

#### **6.3.6. Variación de carga de material polimérico**

Finalmente se realizan los últimos ensayos, correspondientes a la variación de la cantidad de material polimérico, manteniendo el resto de parámetros invariables. Estos son la temperatura de calentamiento a 140 °C, la granulometría general, o los tiempos de enfriamiento. En estos ensayos la duración del calentamiento se ha elevado hasta los 1500 s debido a que una mayor cantidad de material polimérico ralentiza el proceso global, por lo que se requieren mayores tiempos para disponer de una completa caracterización del ciclo.

Se han realizado ensayos con cargas de 35 g y 100 g, mientras que una carga intermedia a éstos valores, de 70g, no ha sido ensayada nuevamente utilizándose los datos del ensayo 20 que corresponde exactamente a dicha configuración.

La realización de ensayos con cargas inferiores a 35 g no ha sido viable pues los espesores finales de pieza obtenidos producen problemas de extracción de las mismas o incluso malformaciones. En cuanto a espesores superiores a 100 g, estos causan desperdicios de material que no se solidifican e integran en la pieza fabricada, quedando como excedentes en forma de polvo, para la geometría del molde, temperaturas y tiempos de ciclo ensayados.

## **6.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS DE MOLDE PROTOTIPO**

### **6.4.1. Ensayos en vacío**

Según se ha detallado con anterioridad, los primeros ensayos definitivos seleccionados corresponden a los de vacío, permitiendo la comparación y validación de los procesos teóricos de cálculo y simulación numérica.

Los 3 ensayos realizados por cada temperatura (100, 120 y 140 °C) han permitido obtener un conjunto de datos para su tratamiento estadístico y verificar el correcto desarrollo de los mismos.

Para el análisis comparativo con los procesos de simulación se han seleccionado para cada temperatura los ensayos más estables; ensayo 3 (100 °C), ensayo 6 (120 °C) y ensayo 9 (140 °C). Se han desarrollado nuevamente los procesos de simulación numérica mediante el software de CFD con los parámetros reales de cada ensayo, considerando todos los condicionantes reales a excepción de los detallados en el apartado 3.6.2.1. del capítulo III.

#### *6.4.1.1. Resultados experimentales y de simulación numérica*

Mediante el desarrollo de los procesos de simulación numérica y los ensayos experimentales según los capítulos III y V respectivamente, se obtienen los resultados mostrados en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 para las temperaturas tanto de ensayo en vacío como de simulación numérica a 100 °C, 120 °C y 140 °C respectivamente.

Debido a que en los procesos de ensayo solo se dispone de la medición de las temperaturas de aceite, temperatura del aire en el punto central del interior del molde y del

punto central de la cara frontal de la cavidad electroconformada de níquel, se establecen dichos parámetros, tanto en los procesos de ensayo como en los de simulación numérica, como los únicos disponibles para el análisis comparativo.

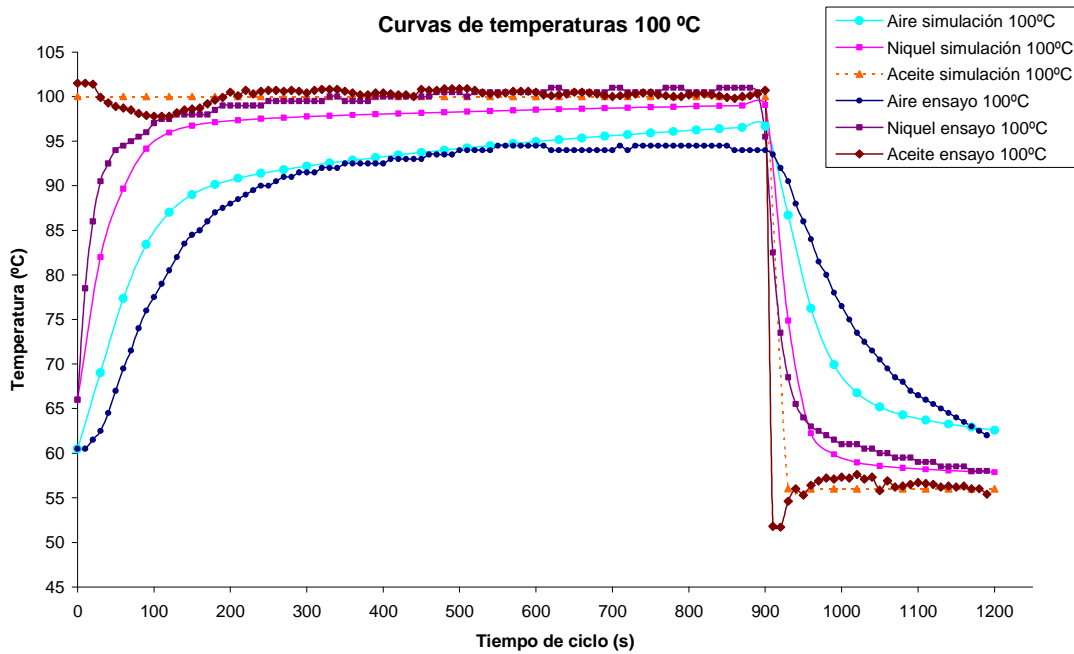


Figura 6.1: Diagrama de temperaturas a 100 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica.

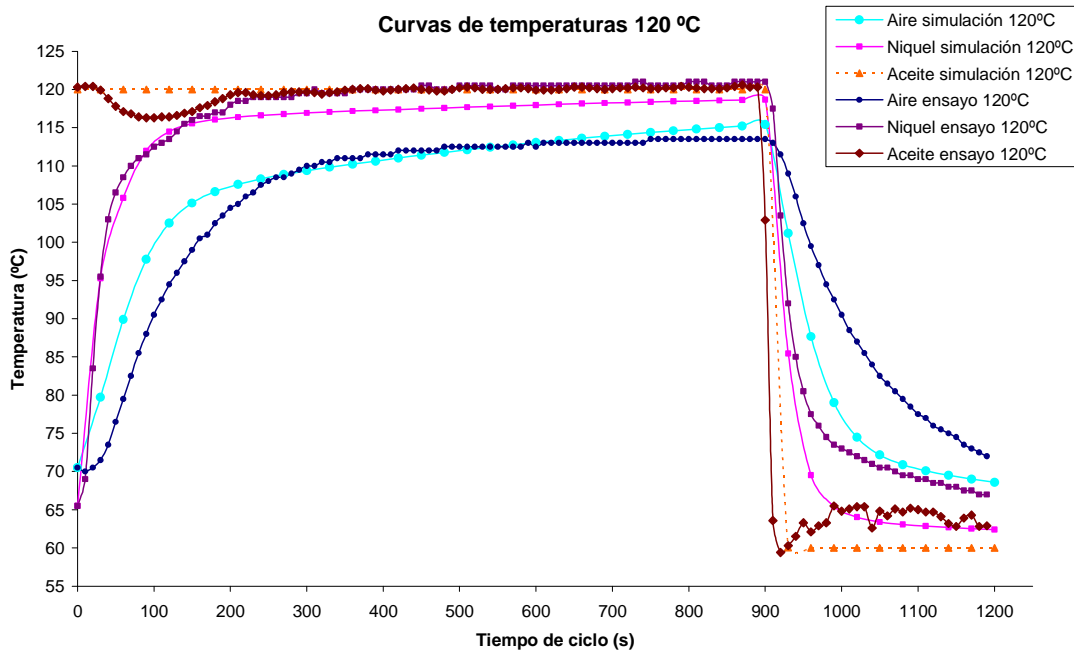


Figura 6.2: Diagrama de temperaturas a 120 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica.

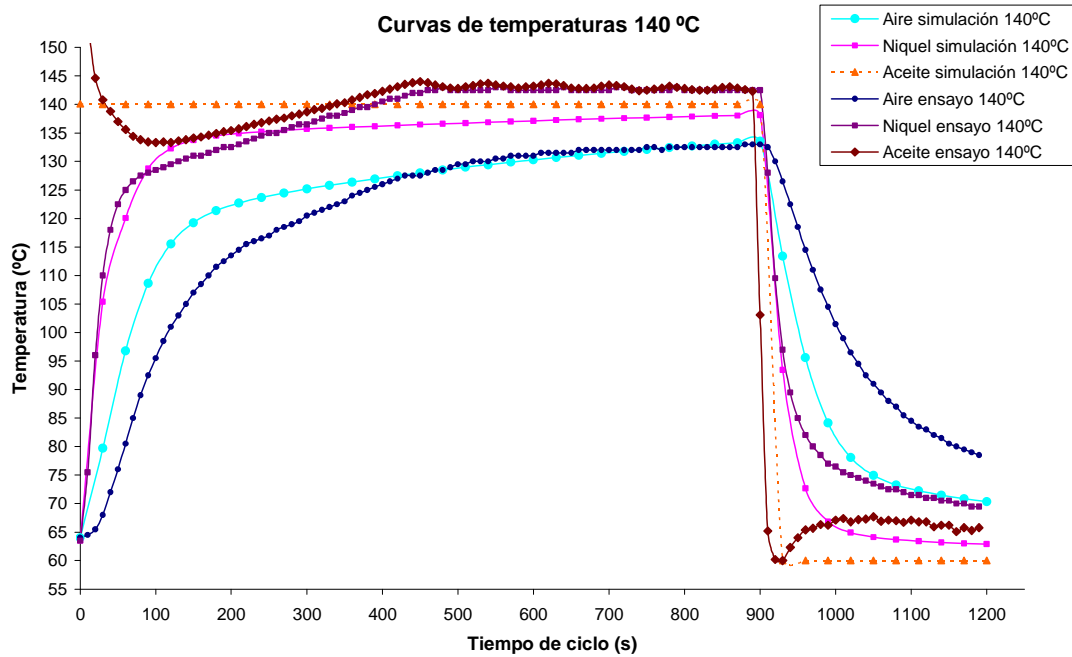


Figura 6.3: Diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica.

#### 6.4.1.2. Análisis de las temperaturas de aceite

Tras la obtención de los resultados de los ensayos experimentales, se ha tomado la temperatura media del aceite en la fase de calentamiento como valor de consigna de la temperatura de aceite en la fase de calentamiento de los procesos de simulación numérica, que se han aproximado a los valores de 100 °C, 120 °C y 140°C. Destáquese esto ya que aún siendo posible en las fases de simulación establecer con exactitud las diferentes temperaturas de aceite que se producen en los ensayos reales, resulta de interés idealizar dichos parámetros como hubiera sido posible en gran medida en procesos industriales.

Dicho lo anterior, la idealización de la temperatura del aceite realizada en los procesos de simulación, tanto en los procesos de calentamiento como en los de enfriamiento, queda ligeramente alejada de lo realmente sucedido en los procesos experimentales como se muestran en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3.

El baño termostático, para el calentamiento del aceite, se encuentra comandado por un regulador de temperatura simple que no incorpora ningún control electrónico, por lo que el mantenimiento de la temperatura en un valor constante no se realiza de forma óptima en cuanto a velocidad de ajuste. Es hecho incide fundamentalmente en la fase inicial del ciclo, donde la temperatura máxima disponible comienza a descender tras la recirculación del

aceite, ligeramente enfriado tras pasar por el molde en los primeros minutos del proceso. Este efecto puede observarse en el detalle de la figura 6.4 del ensayo a 140°C, ensayo donde existe una mayor diferencia entre la temperatura del aceite caliente y la del molde en su estado de reposo inicial. Esto produce un descenso de la temperatura de entrada del aceite más acusada que en los ensayos a 100 °C y 120 °C.

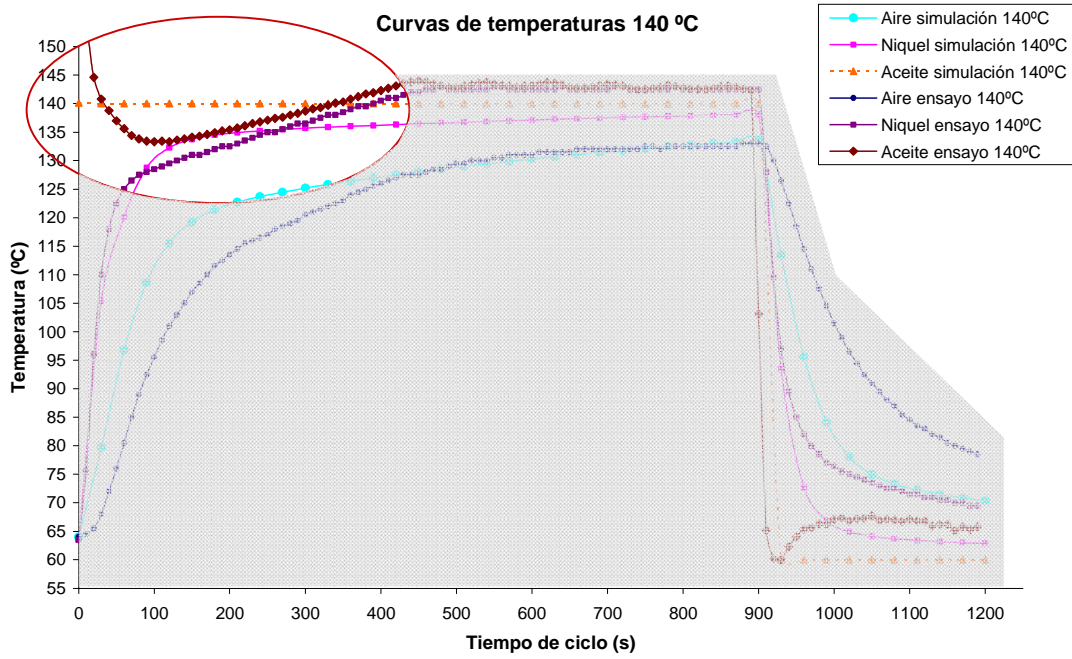


Figura 6.4: Detalle de diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica.

A pesar de los efectos iniciales que se pueden observar en todos los ensayos realizados, la temperatura de aceite se establece próxima a la temperatura de consigna establecida en cada caso, permaneciendo prácticamente estable durante el resto de dicha etapa de calentamiento.

Para desarrollos industriales resulta de interés la incorporación de sistemas de control de la temperatura del aceite, así como la incorporación de depósitos de aceite caliente de mayores dimensiones, lo que reduciría los efectos anteriormente descritos.

En la fase de enfriamiento se produce un efecto similar aunque con condicionantes diferentes. Debido a que se ha dispuesto en la máquina de ensayo experimental de un depósito de 60 l para el almacenamiento del aceite a baja temperatura, y no se ha dispuesto en él de ningún sistema de refrigeración o regulación de la temperatura durante la etapa de enfriamiento, el aceite recirculado hasta dicho depósito procedente del molde dispondrá de una temperatura superior a la inicialmente disponible antes de su introducción en el molde. Este efecto produce el incremento de la temperatura del aceite de enfriamiento

paulatinamente, hasta alcanzar un equilibrio de temperaturas. Por ello puede observarse como la temperatura del aceite de enfriamiento real asciende desde un mínimo, situado aproximadamente, y en todos los casos, entre los 900 s y los 925 s del proceso, hasta alcanzar un valor estable, aproximadamente un 10% superior a la temperatura inicial del aceite de enfriamiento.

En la simulación del proceso de enfriamiento del primer ensayo, Fig. 6.1., se ha establecido como temperatura de enfriamiento la temperatura media finalmente alcanzada en el ensayo, aproximadamente 56 °C. Esta simulación, ajustada a los valores experimentales, permite obtener resultados teóricos similares a los experimentales donde las curvas reales y simuladas son más próximas.

Observando las figuras 6.2 y 6.3, donde premeditadamente no se han ajustado las temperaturas de enfriamiento a las realmente obtenidas, puede observarse la disparidad entre la curvas experimentales y las obtenidas en simulación numérica. Se destaca así la importancia de los efectos que se producen en la etapa de enfriamiento por no disponer de sistemas de refrigeración que mantengan dicha temperatura en valores constantes e inferiores a los que se han producido en los ensayos experimentales. Véase figuras 6.5 y 6.6. donde sí se han ajustado las temperaturas de enfriamiento en el proceso de simulación al valor medio obtenido en los ensayos experimentales.

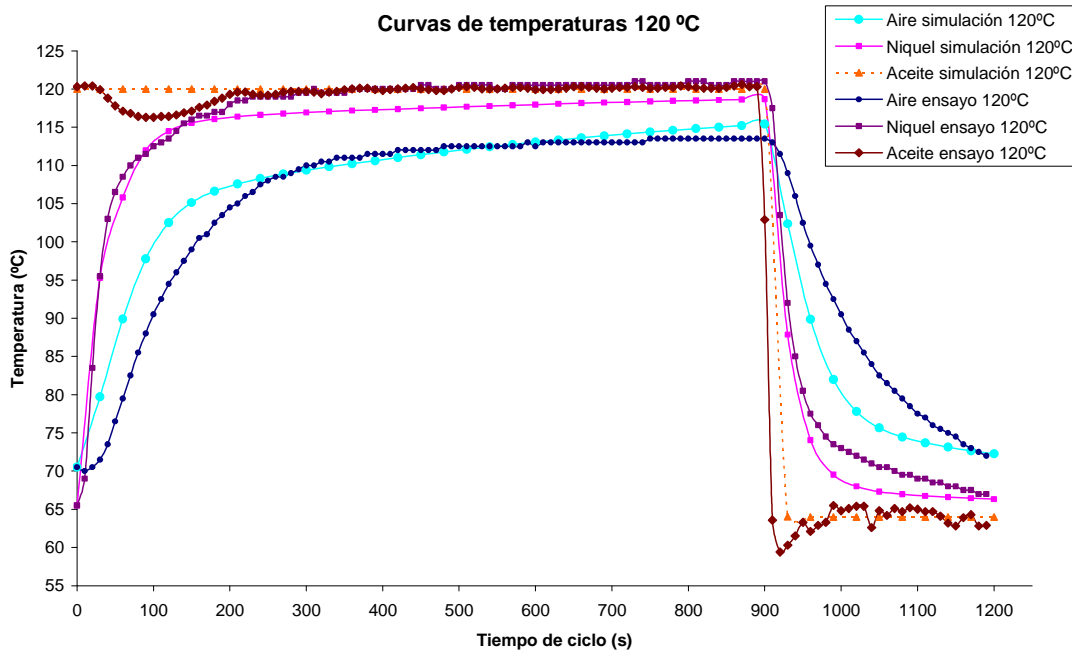


Figura 6.5: Diagrama de temperaturas a 120 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica con ajuste de temperatura media de enfriamiento.

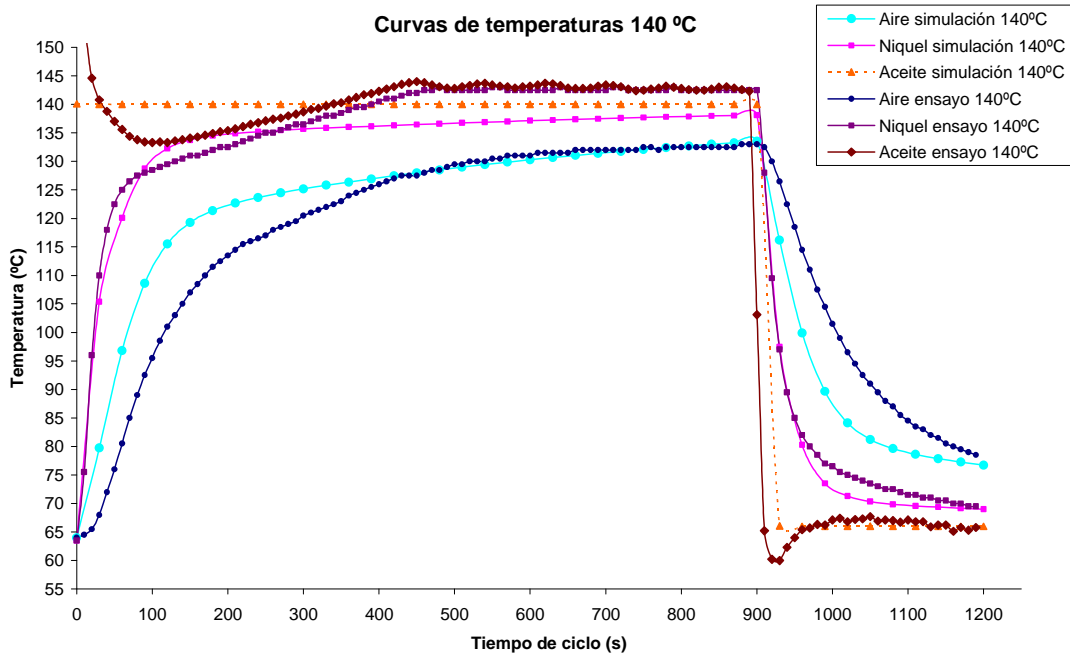


Figura 6.6: Diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica con ajuste de temperatura media de enfriamiento.

#### 6.4.1.3. Análisis de las temperaturas de la cavidad electroconformada de níquel

Tal y como se ha expuesto en capítulos anteriores, se ha dispuesto de una sonda de temperatura adherida al punto central de la cara enfrentada a la entrada de aceite, de la cavidad electroconformada de níquel. Dicha sonda ha quedado totalmente aislada del contacto con el aceite.

De forma análoga, en los procesos de simulación se ha dispuesto de un punto geométrico exactamente idéntico, para la obtención de resultados en los análisis numéricos. En ambos casos se representan dichos valores como los correspondientes a la temperatura del níquel.

##### 6.4.1.3.1. Velocidad de calentamiento

El comportamiento del níquel es peculiar en varios aspectos. En primer lugar se puede observar una gran velocidad de calentamiento del mismo, alcanzando temperaturas próximas a las máximas de aceite en tiempos muy reducidos, tal y como se muestra en la tabla 6.2 y figura 6.7.

Tras el primer minuto de la fase de calentamiento, en todos los ensayos se ha alcanzado una temperatura del níquel superior al 90% respecto de la máxima posible, la del aceite de entrada.

Asimismo, se supera en todos los casos el 97% a los 120 s del proceso de calentamiento, es decir, tan sólo un 10% del tiempo de ciclo total dispuesto en los ensayos.

Finalmente, para valores superiores a 180 s, la temperatura del níquel en el punto central de la cara de entrada de aceite corresponde, en todos los casos, a cuantías superiores al 98%.

| Tiempo de ciclo (s) | Ensayo 3. 100 °C | Ensayo 6. 120 °C | Ensayo 9. 140 °C |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0                   | 65,02%           | 54,45%           | 41,23%           |
| 30                  | 90,59%           | 79,65%           | 78,13%           |
| <b>60</b>           | <b>95,74%</b>    | <b>92,66%</b>    | <b>92,18%</b>    |
| 90                  | 98,06%           | 95,87%           | 95,95%           |
| <b>120</b>          | <b>99,69%</b>    | <b>97,51%</b>    | <b>97,15%</b>    |
| 150                 | 99,39%           | 99,06%           | 97,69%           |
| <b>180</b>          | <b>98,90%</b>    | <b>98,82%</b>    | <b>97,85%</b>    |

Tabla 6.2: Porcentajes de temperatura de níquel alcanzada respecto a la temperatura de aceite, en los primeros 180 s del proceso de calentamiento en ensayos experimentales.

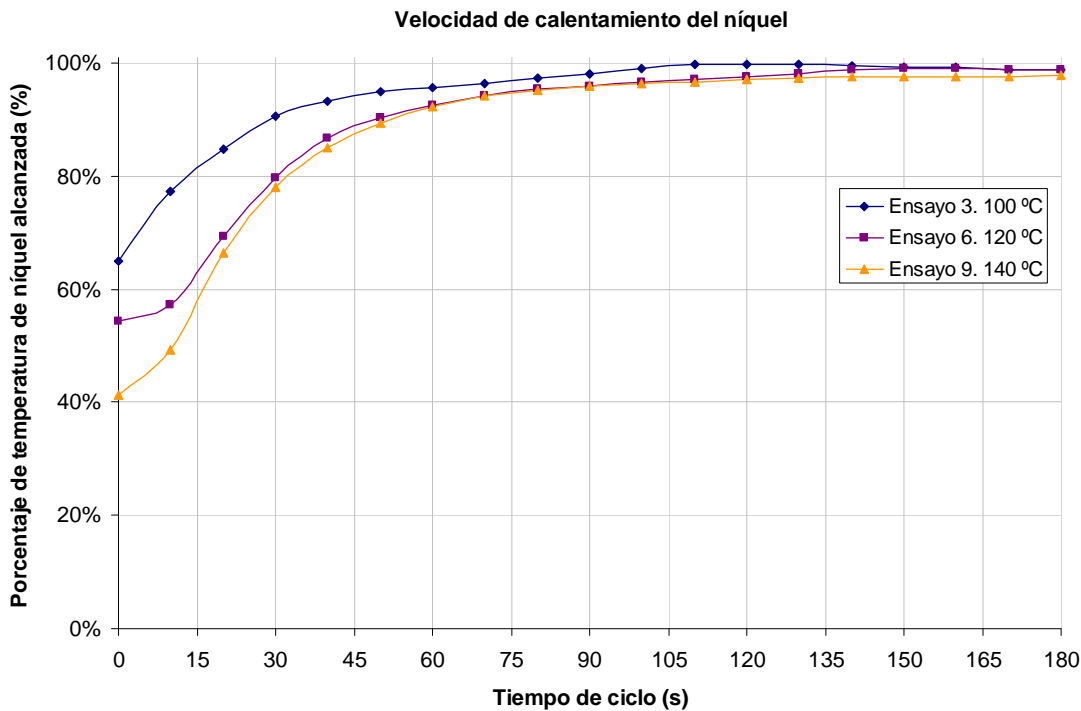


Figura 6.7: Diagrama de porcentaje de temperatura de níquel alcanzada en relación a la temperatura de aceite, en ensayos experimentales.



En los procesos de simulación se producen circunstancias similares, obteniéndose velocidades de calentamiento afines, solapándose incluso en determinadas zonas las curvas de ensayos con las simuladas, por lo que existe una gran concordancia entre los datos reales y los simulados numéricamente. La validación de las simulaciones queda patente tras su análisis y comparación con los resultados de los ensayos fundamentalmente en la fase transitoria inicial de calentamiento.

Las velocidades de enfriamiento también son relevantes, obteniéndose igualmente gran rapidez en alcanzar las temperaturas mínimas.

#### 6.4.1.3.2. Temperaturas máximas alcanzadas

Otro aspecto distinguido se encuentra en la fase permanente del proceso de transferencia térmica de calentamiento. Esto es, la estabilización de la temperatura máxima alcanzada por la cavidad electroconformada, en dicha fase, y su desfase respecto a la temperatura máxima posible, la correspondiente al aceite térmico.

En los resultados de los ensayos experimentales queda de manifiesto que la temperatura de la cavidad de níquel tiende a alcanzar la temperatura máxima de calentamiento, situándose en valores superiores al 99,5 % a partir de tiempos de ciclo de 110 s, 230 s y 490 s en los ensayos a 100 °C, 120 °C y 140 °C respectivamente. Esto supone diferencias entre la temperatura máxima posible y las temperaturas alcanzadas en la fase permanente inferiores a 1°C en valores medios, e inferior a 0,5 °C en la mayoría de los intervalos.

Aunque dichos valores anteriormente expuestos quedan afectados por múltiples variables y aspectos del proceso, puede destacarse que en periodos muy cortos del proceso, concretamente tras tan solo 2 minutos, la temperatura del níquel en la zona medida alcanza prácticamente su temperatura máxima, existiendo una mínima o despreciable diferencia respecto al valor máximo posible.

En los procesos de simulación numérica dicho efecto se produce de forma similar aunque ligeramente en menor medida, obteniéndose diferencias de temperatura superiores a los 2 °C en términos medios, que en cualquier caso continúan siendo diferencias despreciables. La obtención de mayores diferencias en la fase permanente puede ser producido por disponer realmente la cavidad electroconformada de mayores valores de

conductividad térmica que los establecidos teóricamente en los procesos de simulación, entre otros posibles aspectos dimensionales o de ajustes de simulación.

Todos los efectos de velocidad de calentamiento y temperatura máxima alcanzada se deben fundamentalmente al mínimo espesor de la cavidad electroconformada de níquel, constituyendo una de las principales ventajas del molde de rotomoldeo desarrollado. Esta configuración permite reducir la barrera térmica que se produce entre el aceite y el material polimérico a unos valores mínimos, minimizando así el menor gradiente posible de temperaturas por dicho efecto, sin recurrir a metales de grandes capacidades térmicas.

#### 6.4.1.3.3. Comparativa de curvas experimentales y de simulación numérica

Los diferentes datos obtenidos en los procesos de simulación numérica y en los ensayos experimentales muestran su gran similitud, e incluso en ocasiones su solapamiento, obteniéndose curvas representativas similares.

Las curvas de temperatura del níquel disponen de una velocidad de calentamiento similares, así como porcentajes de temperaturas alcanzadas semejantes, salvando las diferencias absolutas de temperaturas de aceite en cada caso, principal responsable de las diferencias existentes.

El margen de error existente entre las curvas experimentales y las simuladas numéricamente, en cuanto al punto de referencia del níquel, se encuentra representado porcentualmente en las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 para las diferentes temperaturas estudiadas. El error medio producido entre curvas, y en la fase de calentamiento, se reduce a un valor medio de 2,09%, 1,75% y 2,36% para los casos de 100 °C, 120 °C y 140 °C respectivamente.

Por tanto, vuelve a quedar patente la validez de los procesos de simulación numérica realizados en las fases iniciales de diseño y cálculo del molde de rotomoldeo.

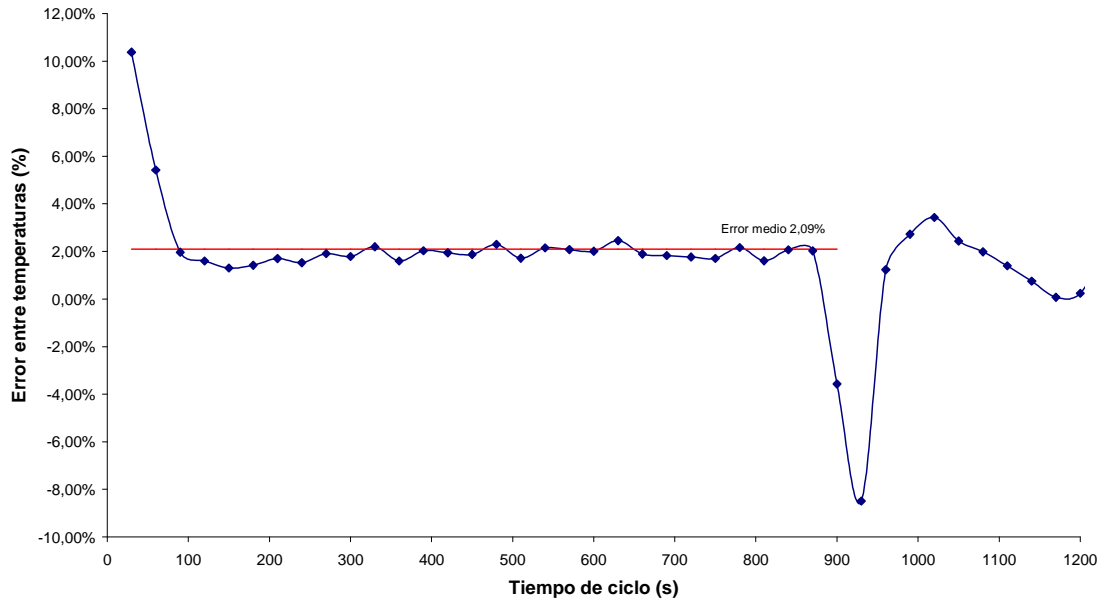
**Error porcentual obtenido entre curvas experimental y simulada de níquel a 100°C**

Figura 6.8: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de níquel de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 100 °C.

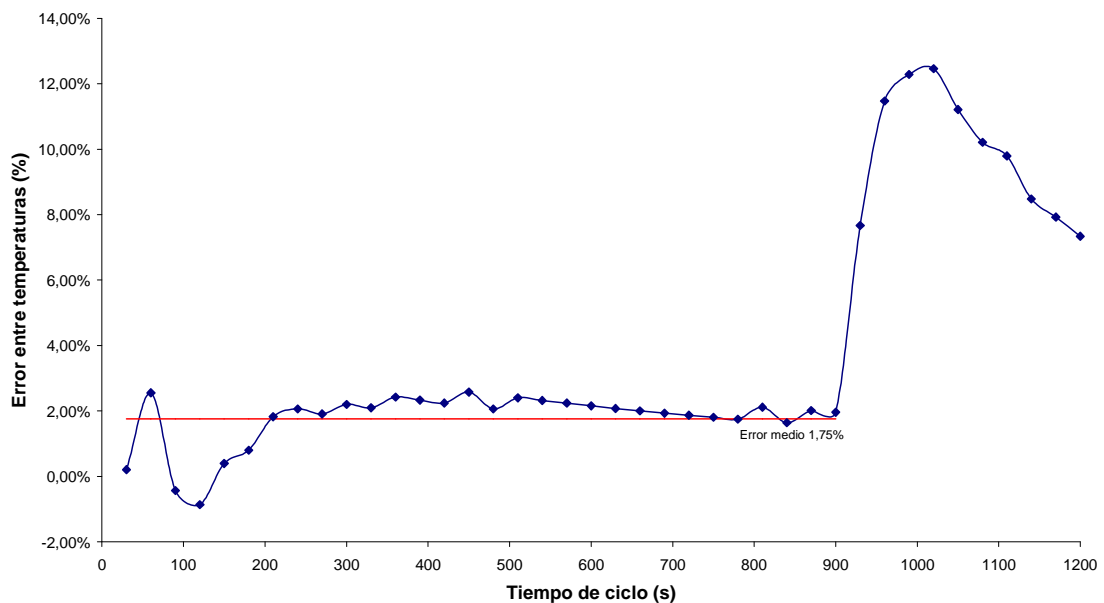
**Error porcentual obtenido entre curvas experimental y simulada de níquel a 120°C**

Figura 6.9: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de níquel de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 120 °C.

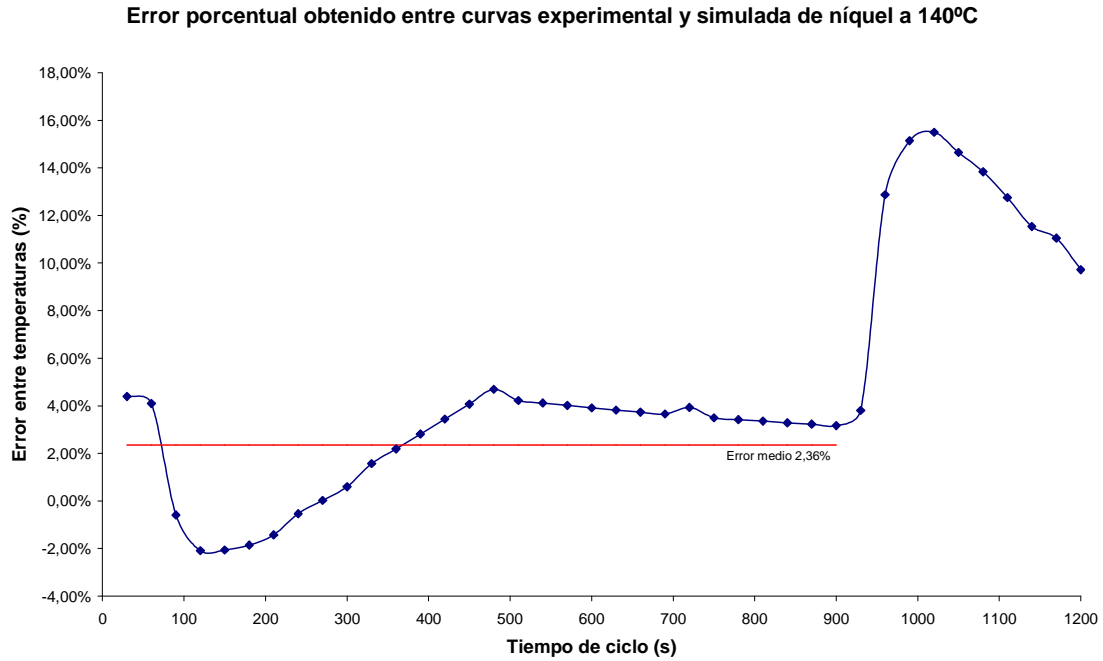


Figura 6.10: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de níquel de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 140 °C.

#### 6.4.1.4. Análisis de las temperaturas del aire interior del molde

El parámetro de referencia para la caracterización de los procesos de rotomoldeo es sin duda la temperatura del aire interior del molde, referenciada en el presente trabajo de investigación en el punto central interior de la cavidad del molde. [3]

Las temperaturas de aceite circundante al molde y la propia temperatura del molde electroconformado no dejan de ser temperaturas prácticamente en estado permanente, que durante las fases de solidificación del material polimérico se ven afectadas de forma mínima por los procesos de transformación que sufre el material plástico durante el rotomoldeo. Sin embargo, la temperatura interior del aire refleja los cambios de estado del material polimérico durante la fase de fabricación de la pieza, permitiendo así conocer en mayor medida los cambios que se están produciendo realmente en el material. De ahí la verdadera importancia de la temperatura del aire interior del molde.

##### 6.4.1.4.1. Velocidad de calentamiento

En los ensayos en vacío que se están analizando en esta parte del documento, no se producen los efectos distintivos del rotomoldeo en la temperatura interior del aire al no disponerse realmente de carga de polímero en el interior del molde. No por ello debe obviarse el interés de dicho parámetro en estos ensayos pues sienta las bases

comparativas sobre los efectos que produce el material polimérico, al permitir el análisis del comportamiento de la temperatura interior del molde con y sin material.

A diferencia del comportamiento del níquel y como cabía esperar, la velocidad de calentamiento de la temperatura del aire es inferior, tal y como se muestra en la tabla 6.3 y figura 6.11. Sin embargo, la temperatura de fusión del material polimérico, concretamente EVA, corresponde de forma teórica a 87°C, temperatura garantizada en el aire interior del molde a los 180 segundos del proceso para el ensayo a 100 °C, y 90 s en los ensayos a 120 y 140 °C.

| Tiempo de ciclo (s) | Ensayo 3. 100 °C | Ensayo 6. 120 °C | Ensayo 9. 140 °C |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0                   | 59,61%           | 58,60%           | 41,56%           |
| 30                  | 62,56%           | 59,63%           | 48,30%           |
| 60                  | 70,42%           | 67,89%           | 59,37%           |
| 90                  | 77,63%           | 75,67%           | 69,34%           |
| 120                 | 82,31%           | 81,19%           | 75,77%           |
| 150                 | 85,70%           | 84,54%           | 79,79%           |
| 180                 | 87,35%           | 86,57%           | 82,65%           |

Tabla 6.3: Porcentajes de temperatura del aire interior del molde alcanzada respecto a la temperatura de aceite, en los primeros 180 s del proceso de calentamiento en ensayos experimentales.

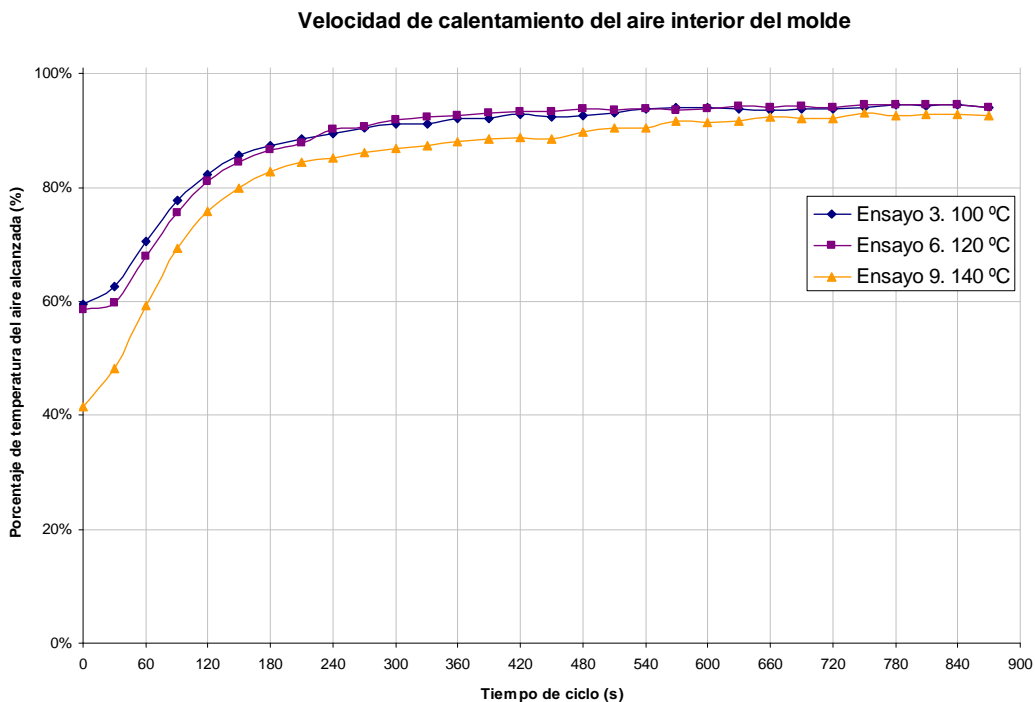


Figura 6.11: Diagrama de porcentaje de temperatura del aire interior del molde alcanzada en relación a la temperatura de aceite, en ensayos experimentales.

#### 6.4.1.4.2. Temperaturas máximas alcanzadas

En relación a la estabilización de la temperatura máxima alcanzada en el interior de la cavidad electroconformada, se observa un salto térmico de valor medio de 6 °C, aproximadamente para el ensayo a 100 °C y respecto a la temperatura del aceite térmico. Dicho efecto se encuentra producido fundamentalmente por la capa de material polimérico totalmente conformada que actúa como aislante térmico, además de las posibles pérdidas de temperatura que se producen en el molde. En los ensayos a 120 °C y 140 °C el salto térmico se sitúa aproximadamente en 7 °C y 11 °C respectivamente. En todos los casos se produce un salto térmico de valor porcentual similar.

Una de las principales ventajas del innovador molde prototipo de rotomoldeo queda demostrada, obteniéndose un salto térmico mínimo entre temperatura de aceite, la del molde y la del aire interior del molde, a diferencia de los procesos convencionales de rotomoldeo de calentamiento por horno. El uso de una cavidad del molde electroconformada en níquel, con tan sólo 1 mm de espesor, produce una elevada velocidad de calentamiento del níquel y del aire interior del molde así como una elevada temperatura en estado permanente del proceso de calentamiento.

#### 6.4.1.4.3. Comparativa de curvas experimentales y de simulación numérica

Las curvas del aire interior del molde obtenidas muestran un desfase entre sí en la fase transitoria del proceso de calentamiento, es decir, en los primeros minutos del proceso. En todos los casos la temperatura obtenida en los procesos de simulación numérica es superior a la obtenidos en los ensayos, aunque mantienen una pendiente de crecimiento semejante en los inicios.

Aunque tanto en los ensayos experimentales como en las simulaciones numéricas se han establecido las mismas condiciones iniciales de temperatura, en los ensayos experimentales se suceden diferentes circunstancias, propias en un sistema real experimental, a diferencia de las simulaciones teóricas, produciendo alteraciones lógicas y normales en los resultados. Una de dichas circunstancias a resaltar corresponde al tiempo requerido para la introducción del aceite en el molde, desde el baño termostático. Dicho periodo, inferior a 30 s, corresponde al necesario para que el aceite, en su recorrido desde el baño termostático, comience a entrar en el molde, desplazando el aceite a baja temperatura existente del proceso de enfriamiento del ciclo anterior.

En los procesos de simulación no se producen efectos como el descrito anteriormente, donde desde el inicio de los cálculos numéricos las condiciones de contorno e iniciales son las que se establezcan sin ningún tipo de retraso o desfase.

Según lo expuesto anteriormente, en los ensayos experimentales se produce un breve periodo inicial a modo de retraso en el calentamiento del molde, como se pueden observar en las figuras anteriormente expuestas. Este retardo, según la figura 6.12, se observa claramente en los inicios de las curvas experimentales de la temperatura del aire interior del molde y del níquel, produciendo una breve ralentización en la velocidad inicial de calentamiento.

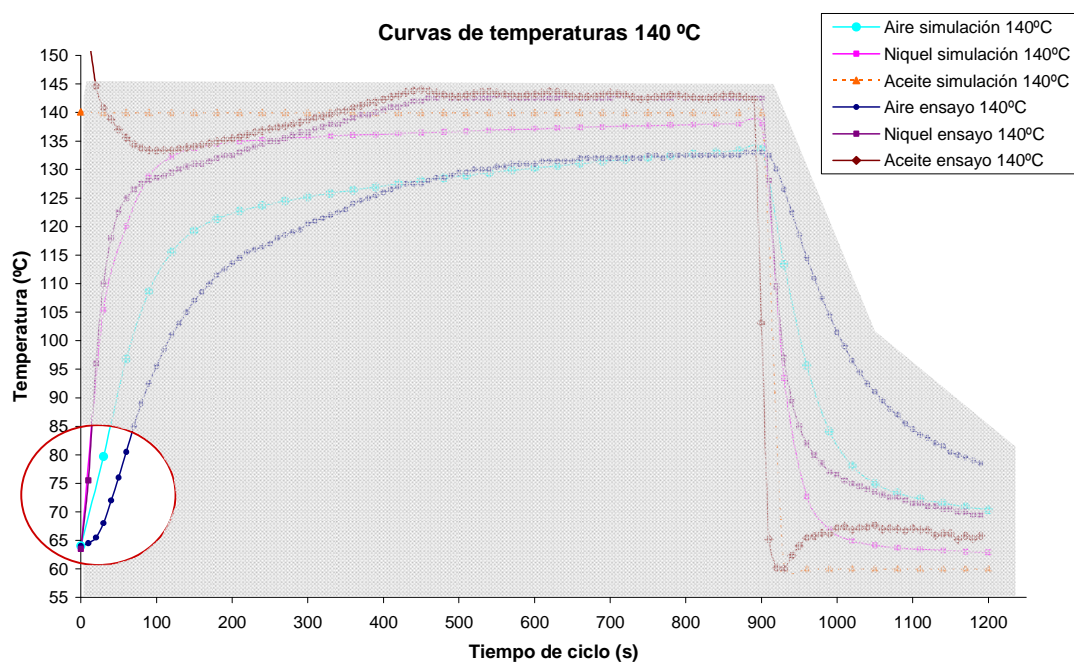


Figura 6.12: Detalle de diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales y en simulación numérica.

Considerando la segunda fase del proceso de calentamiento, donde se produce la estabilización de la temperatura interior del aire, los resultados en ambos casos disponen de gran similitud, existiendo un bajo margen de error en los datos experimentales y los teóricos. Las figuras 6.13, 6.14 y 6.15 muestran dicho error medio producido entre curvas, situándose en valores del 2,45%, 1,26% y 3,40% para los casos de 100 °C, 120 °C y 140 °C respectivamente.

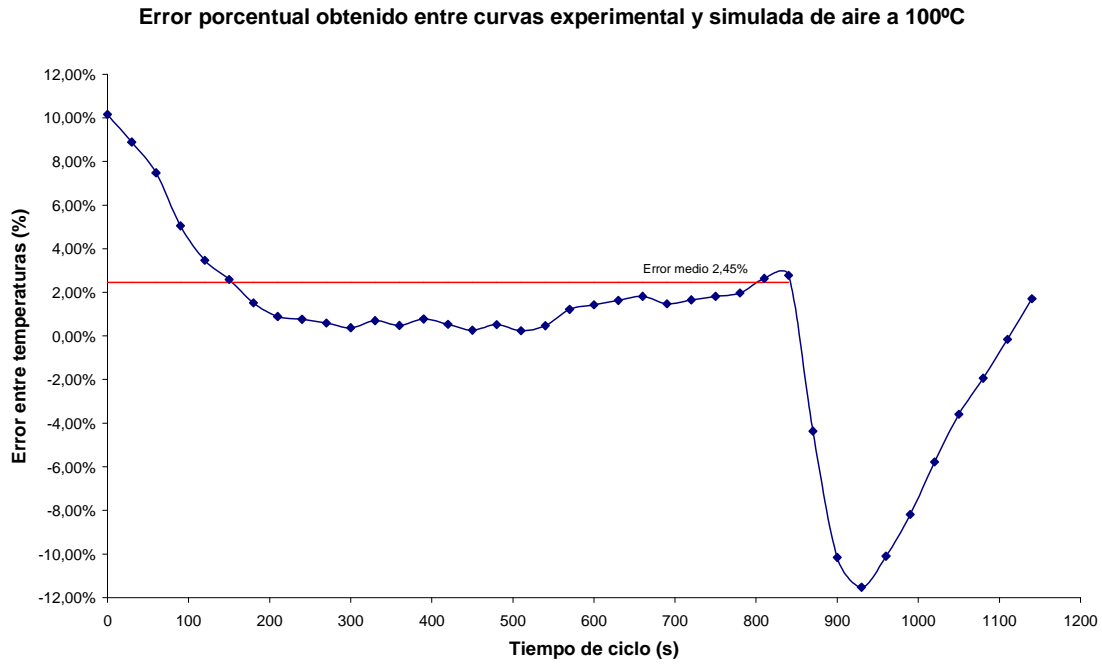


Figura 6.13: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de aire de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 100 °C.

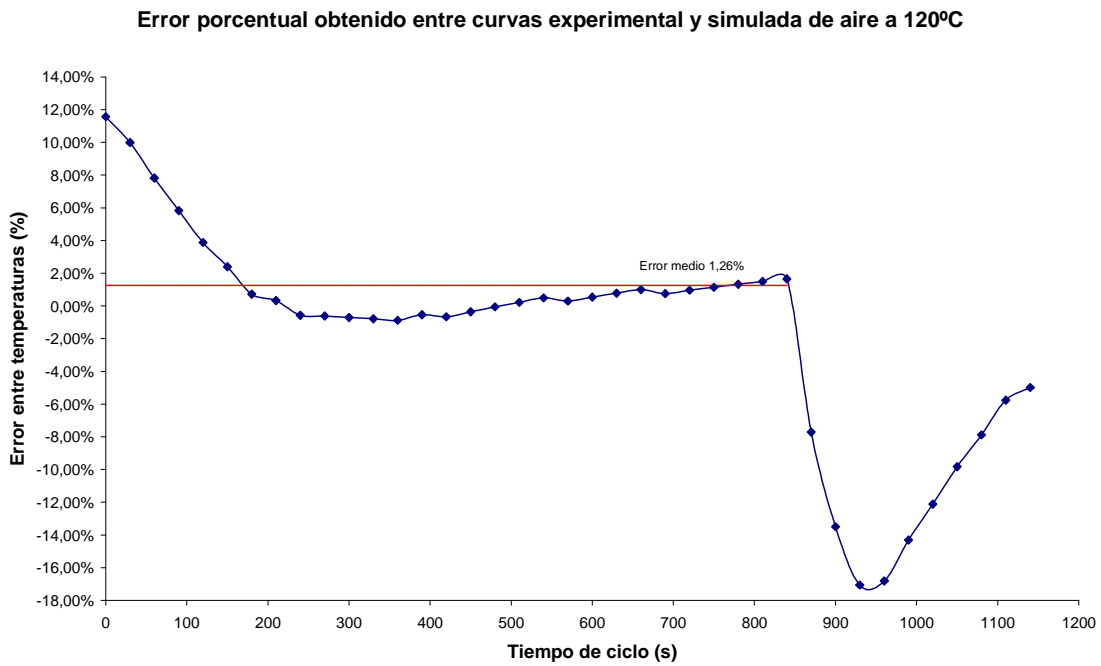


Figura 6.14: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de aire de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 120 °C.



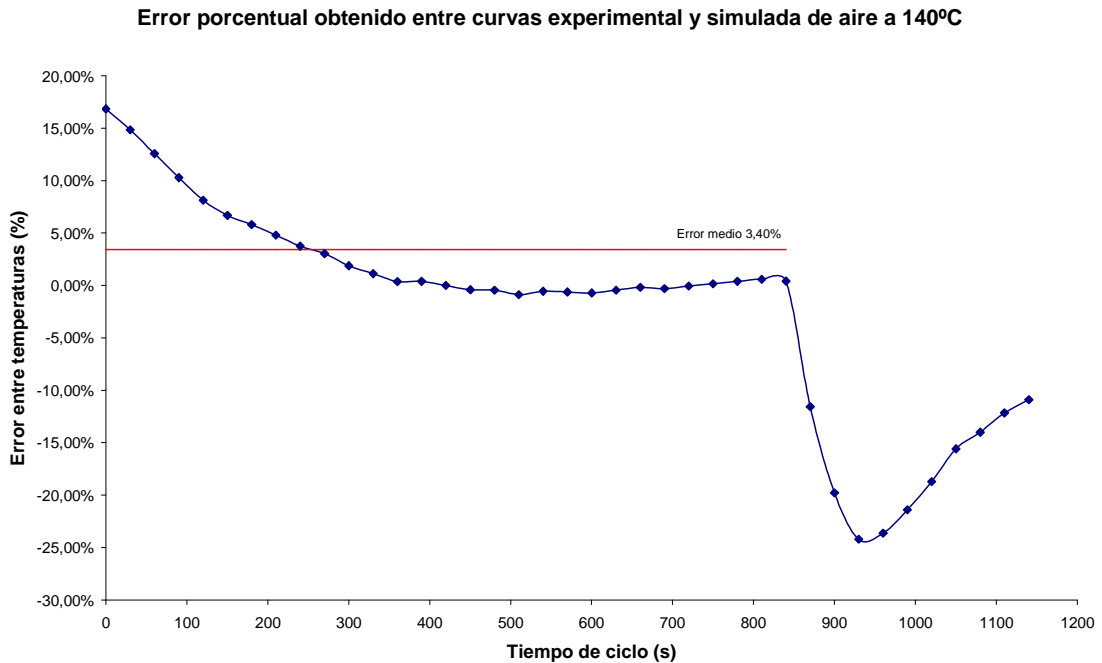


Figura 6.15: Diagrama de porcentaje de error entre temperatura de aire de ensayo experimental y temperatura simulada, ambas con temperatura de calentamiento de 140 °C.

#### 6.4.1.5. Conclusiones parciales de los ensayos y simulaciones en vacío

A partir de los resultados obtenidos y los análisis comparativos efectuados, puede concluirse de forma certera que los procesos de simulación numérica realizados para el desarrollo del molde prototipo, finalmente fabricado y ensayado, son totalmente válidos.

Las hipótesis de condiciones iniciales y generales de cálculo, establecidas inicialmente en el presente trabajo de investigación, quedan pues validadas, constatando la idoneidad de uso de las tecnologías de Dinámica de Fluidos Computacional y los resultados que éstas aportan.

Desde el punto de vista del proceso de rotomoldeo, los resultados experimentales muestran inequívocamente la eficacia tanto del diseño experimental del molde desarrollado como el uso de las tecnologías de Fabricación Aditiva y Rapid Toolings, englobadas en las denominadas tecnologías de Rapid Manufacturing, para las aplicaciones del moldeo rotacional.

En apartados y capítulos posteriores se continúa analizando los ensayos realizados con material polimérico así como las principales ventajas que el molde desarrollado dispone respecto a los moldes convencionales, tanto de calentamiento mediante aire en hornos como de los moldes de calentamiento por aceite existentes.

### 6.4.2. Ensayos con variación de temperaturas

Los ensayos presentados hasta ahora correspondían a condiciones de vacío, es decir, sin material polimérico, y por tanto, no producían la generación de ninguna pieza real. Tras estos primeros ensayos, que podrían considerarse de validación de los procesos de simulación, se han desarrollado los primeros con carga real de material. Esto implica la ejecución del proceso de moldeo rotacional completo, obteniéndose resultados hasta ahora no expuestos, ni tan siquiera de forma teórica mediante cálculos numéricos.

Entre el conjunto de ensayos experimentales realizados con carga de material, los 9 primeros se engloban dentro del grupo de *variación de temperatura*. Para la exposición de estos datos se han seleccionado los 3 ensayos más representativos, correspondiendo cada uno de ellos a las temperaturas de 100 °C, 120 °C y 140 °C. Esto permitirá el análisis de estos ensayos con sus homólogos sin material y las importantes afecciones que introduce el material polimérico en el desarrollo del proceso de rotomoldeo.

#### 6.4.2.1. Resultados experimentales y de simulación numérica

Los ensayos escogidos corresponden a los codificados con la numeración 12, 14 y 18 según la tabla 6.1 de relación de ensayos experimentales seleccionados y se muestran en las figuras 6.16, 6.17 y 6.18.

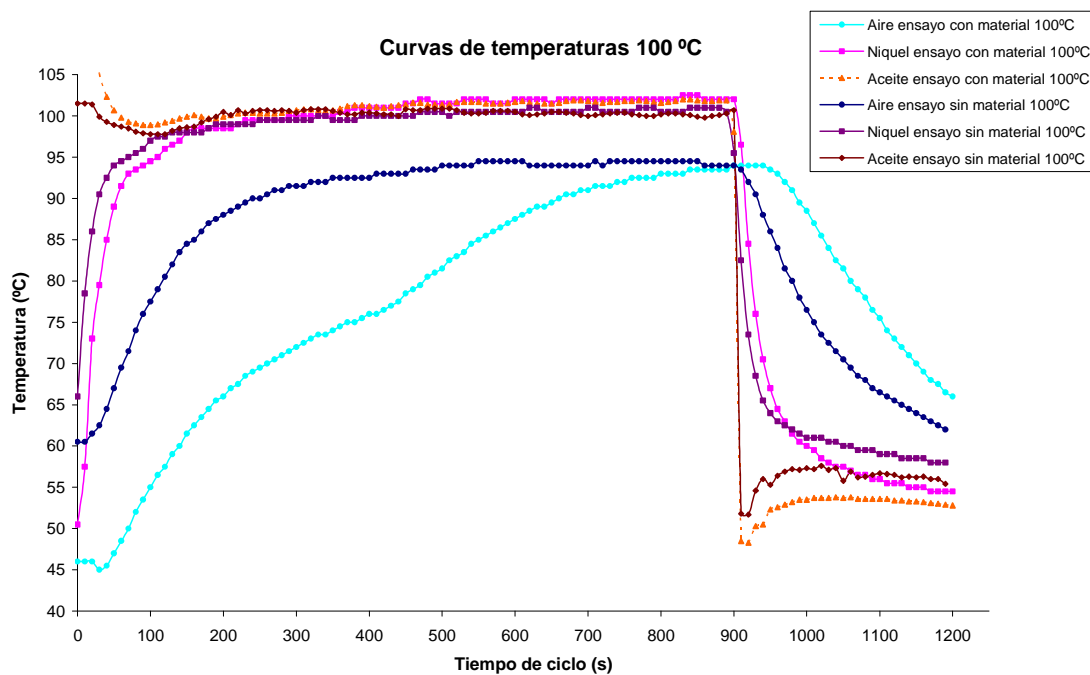


Figura 6.16: Diagrama de temperaturas a 100 °C obtenidos en ensayos experimentales sin carga de material y con 70 gramos.

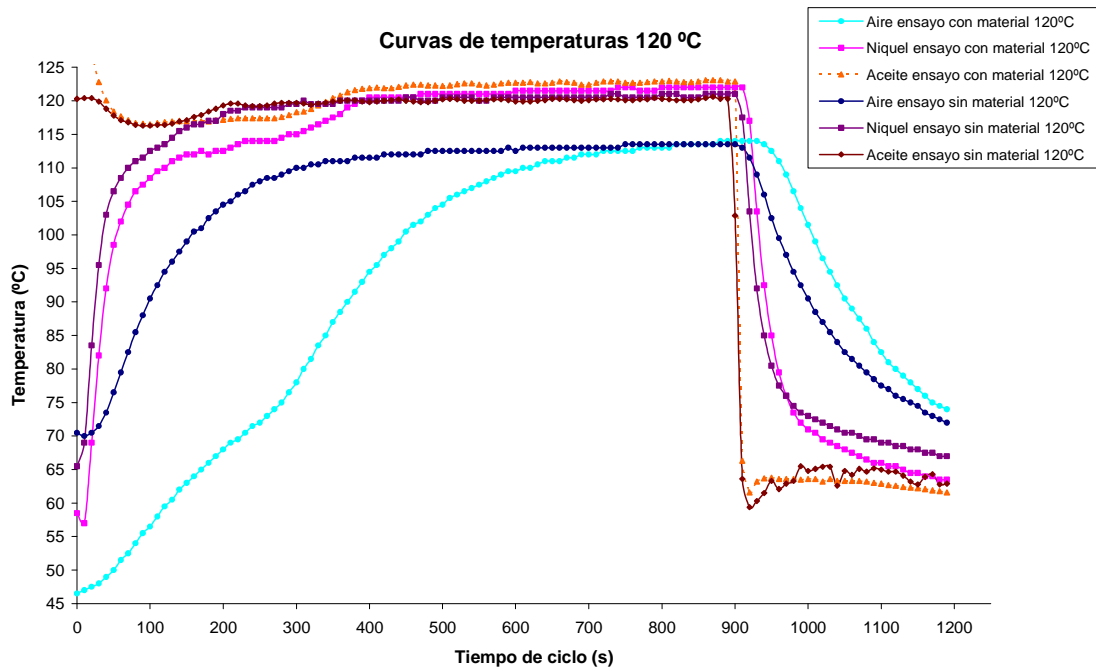


Figura 6.17: Diagrama de temperaturas a 120 °C obtenidos en ensayos experimentales sin carga de material y con 70 gramos.

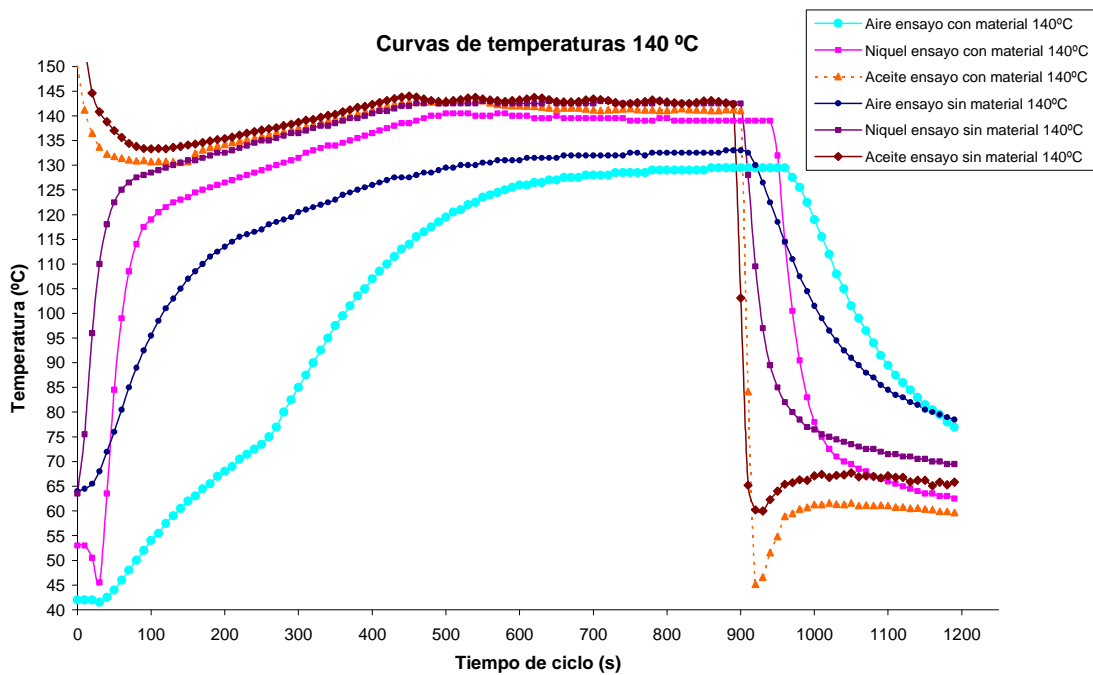


Figura 6.18: Diagrama de temperaturas a 140 °C obtenidos en ensayos experimentales sin carga de material y con 70 gramos.

Todos los ensayos con material se caracterizan por disponer de unas temperaturas iniciales, tanto de las partes sólidas del molde como del aire interior, inferiores a los ensayos sin material. En los ensayos con material, las temperaturas iniciales de aire se sitúan en valores próximos a los 45 °C, a diferencia de los ensayos sin material que disponen de valores en torno a los 65 - 70 °C. Esto es debido a que la ejecución de los

ensayos sin material no requiere de la apertura de la tapa del molde ni la extracción de la pieza generada, por lo que puede realizarse un ensayo de forma inmediata y continuada. En el caso de los ensayos con material, tras cada ensayo debe extraerse la pieza fabricada, entre otras operaciones, alargando las pausas de fabricación entre los diferentes ensayos, lo que produce la disminución de la temperatura global del molde. En cualquier caso este efecto, que se ha considerado importante aclarar, no dificulta el análisis comparativo que se está exponiendo.

#### 6.4.2.2. *Análisis comparativo de temperaturas*

En el grupo de *ensayos de vacío* se analizó pormenorizadamente las diferencias existentes entre los resultados experimentales y los simulados, pues uno de los principales objetivos recaía en la validación de los procesos de simulación. Sin embargo, en este grupo de ensayos la atención se centra en el comportamiento de las diferentes temperaturas evaluadas experimentalmente y afectadas por la introducción de un fundamental condicionante, la carga de 70 g de material polimérico de EVA.

Como se desprende de las figuras 6.16, 6.17 y 6.18, tanto en los ensayos experimentales sin carga como con ella, las temperaturas de aceite se mantienen sin variación, salvando la variabilidad que introducen los elementos de manipulación de la máquina experimental, fundamentalmente el baño termostático y las temperaturas iniciales del molde. Estos dos factores dificultan una exacta repetibilidad de los ensayos, que aún así puede considerarse aceptable dentro de los términos globales de los ensayos.

Por otra parte, las temperaturas del níquel igualmente pueden considerarse mínimamente afectadas por la introducción del material polimérico en el molde, pudiéndose atribuir a los mismos condicionantes expuestos en el párrafo anterior las posibles variaciones entre las curvas.

Por tanto, y considerando semejantes las curvas de temperaturas de aceite y níquel en los diferentes pares de ensayos que se están analizando, solo resta centrar la atención en el comportamiento de la temperatura del aire interior del molde, la cual sí se ve afectada sin ningún género de dudas y en gran medida por el uso de material polimérico en el proceso de fabricación.

El comportamiento de la temperatura del aire interior del molde se muestra de forma desigual según las fases distintivas del proceso de conformación del rotomoldeo, como

describen G. L. Beall [3] o Roy Crawford [2]. Para un mejor análisis de estos efectos se ha recurrido a las curvas 6.19, 6.20 y 6.21 en las cuales se representa el cociente de la variación de temperatura interior del aire y la duración de dicha variación, en los procesos de calentamiento de los ensayos realizados a 100 °C, 120 °C y 140 °C. Dicho factor representa el incremento de temperatura que se produce en cada segundo del proceso, lo cual permite observar con mayor claridad las etapas en las que se genera una ralentización de la temperatura interior del aire, y consecuentemente de los efectos de la solidificación y densificación del material EVA.

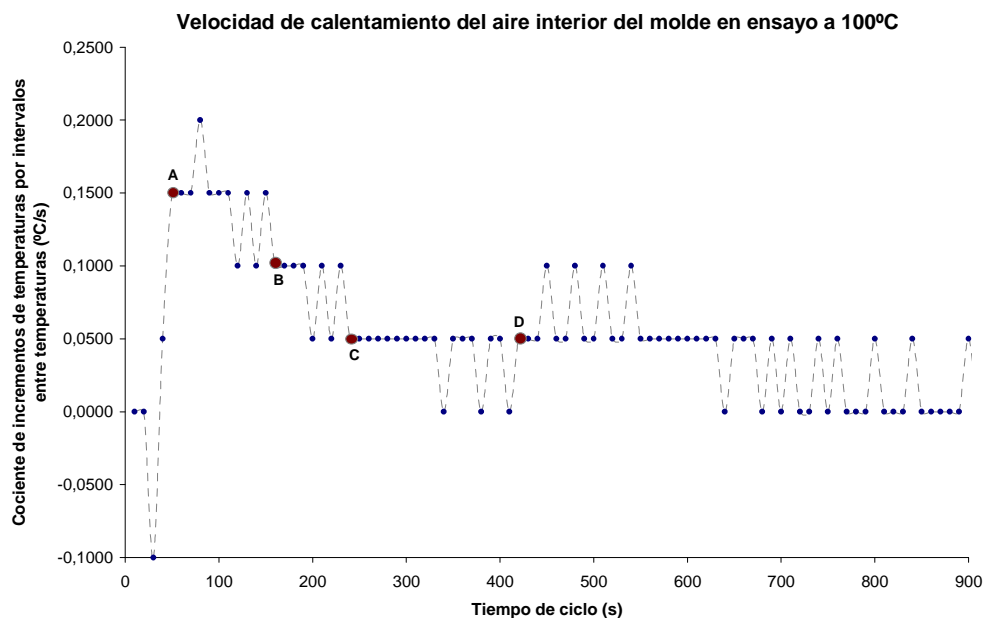


Figura 6.19: Diagrama de incrementos de temperaturas obtenidos en ensayos experimentales con 70 gramos y a 100°C.

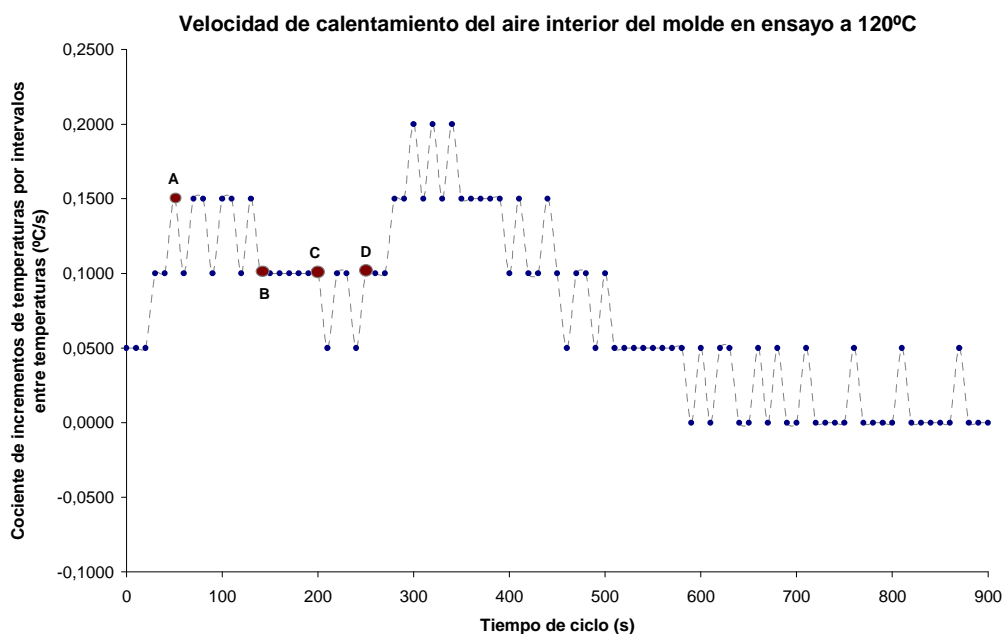


Figura 6.20: Diagrama de incrementos de temperaturas obtenidos en ensayos experimentales con carga de material a 120°C.

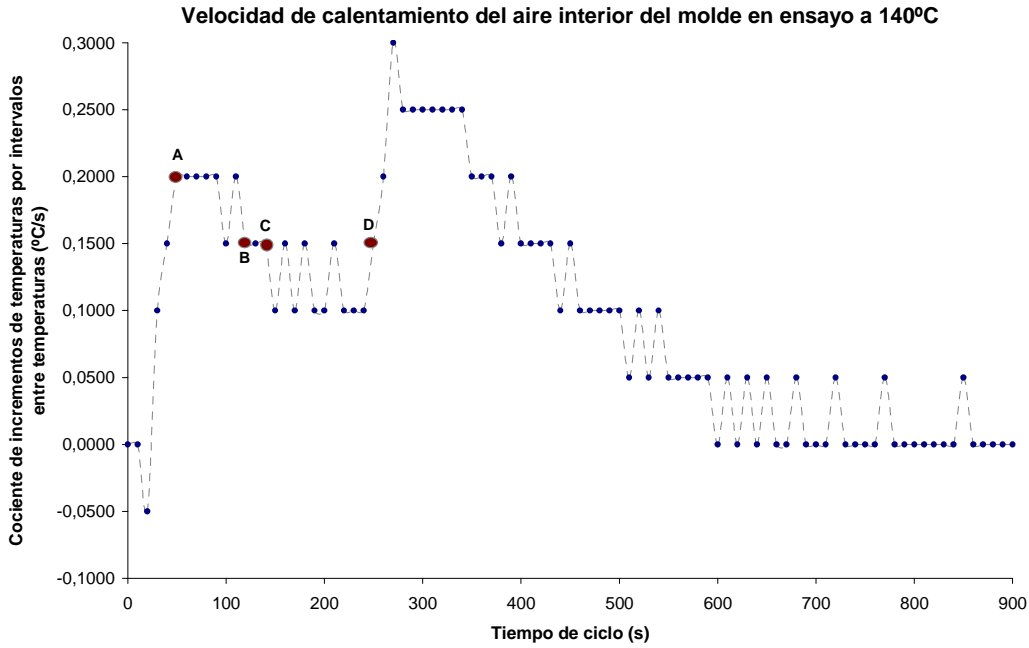


Figura 6.21: Diagrama de incrementos de temperaturas obtenidos en ensayos experimentales con carga de material a 140°C.

6.4.2.2.1. Fase A. Inicio del calentamiento

Partiendo de las figuras anteriores, es posible identificar un punto A de inicio de la fase de incremento de temperatura del proceso calentamiento, donde el material se encuentra aún en su estado inicial en forma de polvo y tanto el aceite como el molde han alcanzado temperaturas próximas a las nominales de funcionamiento.

A partir de dicho instante se producen incrementos de 0,15 °C por segundo en los ensayos a 100 °C y 120 C mientras que en el ensayo a mayor temperatura, 140 °C, la velocidad de calentamiento alcanza los 0,20 °C por segundo.

6.4.2.2.2. Fase A-B. Inicio de la adhesión y fluidificación del material

Durante el periodo correspondiente entre los puntos A y B, para cada ensayo se identifica una fase de incremento de temperatura a velocidad prácticamente constante, donde se comienza a producir las fases de adhesión del material en polvo a las paredes del molde y el inicio de la fluidificación del material.

Dicho periodo comienza a finalizar, punto B, en un rango de temperaturas del aire interior próximas a los 60 °C, donde la temperatura del material, superior a la del aire interior del molde, comienza a alcanzar temperaturas próximas a la de fusión, en torno a 87

°C. Nótese que la temperatura de la cavidad electroconformada del molde, en contacto con el material polimérico, dispone prácticamente de la temperatura máxima del ensayo.

Durante la fase B-C se observa un descenso paulatino de la velocidad de calentamiento donde el material se encuentra prácticamente en el inicio del proceso de sinterización. El material plástico adherido comienza a conformar una capa de menor transferencia térmica entre el molde y el aire interior, comenzando la absorción de energía térmica de cambio de fase.

#### 6.4.2.2.3. Fase C-D. Sinterización del material

La etapa fundamental y principal del proceso, la de sinterización del material, puede considerarse iniciada en el punto C, a partir del cual las velocidades de calentamiento alcanzan sus valores mínimos de la etapa transitoria del proceso de calentamiento.

En los ensayos a 100 °C la velocidad de incremento de temperatura incluso desciende a valores puntuales nulos, mientras que en los ensayos de 120 °C y 140 °C se alcanzan valores de 0,05 °C por segundo y 0,1 °C por segundo respectivamente. El material se encuentra pues completamente en su fase de cambio de estado.

Si bien las velocidades anteriores son variadas y correlativas según se incrementa la temperatura del ensayo, es de resaltar la fácil identificación de la etapa de sinterización en los ensayos de 100 °C y 120 °C, donde se produce en temperaturas del aire interior del molde próximas a los 70 °C, al contrario de los ensayos a 140 °C donde el proceso se produce de más forma acelerada. En este caso, la fase de absorción de energía térmica por parte del material, y por tanto de mínima velocidad de incremento de temperatura, queda confinada en un periodo de tiempo muy reducido difícilmente identificable. Nótese como en los procesos más lentos, los de ensayos a 100 °C, se produce una velocidad de calentamiento en la fase de sinterización 3 veces inferior a la de los ensayos a 140 °C, reduciéndose en éste último caso el ciclo de calentamiento en valores superiores al 50%.

#### 6.4.2.2.4. Fase D. Densificación del material

Tras alcanzar el punto D se comienzan a producir mayores velocidades de calentamiento, una vez finalizada la sinterización, y por tanto, la completa fluidificación del material. En dicha fase se dispone de una mayor transmisividad térmica, permitiendo incrementar la temperatura interior del aire mientras se produce la eliminación de burbujas

de aire intersticiales en el material. La densificación del material se comienza a producir en temperaturas de aire próximas a 75 °C en todos los casos, lo cual cabía esperar teniendo en cuenta la temperatura de fusión del material polimérico con independencia de las características del ensayo.

Desde dicho punto la temperatura interior del aire mantiene un crecimiento hasta alcanzar un estado estacionario donde no se alcanzan mayores cotas de temperatura. El proceso de calentamiento puede considerarse finalizado debiéndose establecer el punto óptimo de inicio de enfriamiento con el fin de optimizar la eficiencia de calentamiento y evitar sobrecalentamientos o gastos energéticos innecesarios que no produzcan mejoras en las piezas rotomoldeadas.

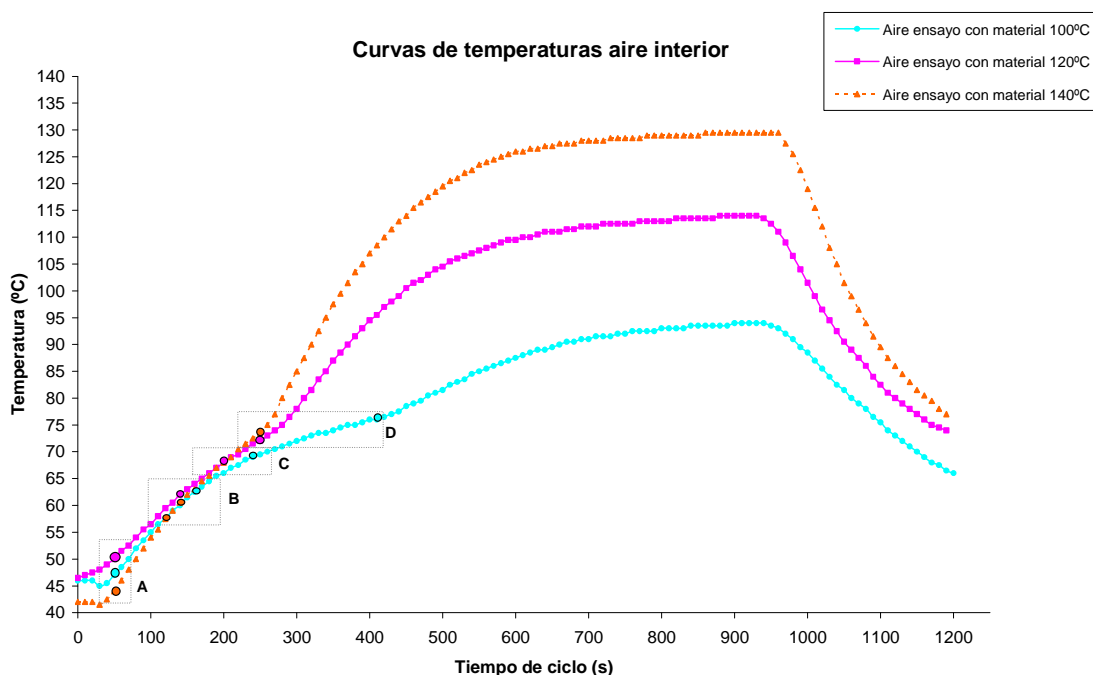


Figura 6.22: Diagrama de temperaturas del aire interior del molde obtenidos en ensayos experimentales con carga de material a 100 °C, 120 °C y 140°C.

#### 6.4.2.3. Conclusiones iniciales básicas

A partir de los ensayos anteriores, correspondientes a ensayos con material a 100 °C, 120 °C y 140 °C, se ha establecido de forma básica y resumida las fases principales del proceso de conformación de rotomoldeo durante el ciclo de calentamiento. De dicho análisis pueden extraerse un conjunto de conclusiones básicas que cabían esperar:

- El incremento de temperaturas del proceso de calentamiento afecta considerablemente a la rapidez del proceso, el cual puede optimizarse reduciendo



considerablemente el tiempo de ciclo con pequeños incrementos de temperatura del aceite térmico.

- En los procesos ensayados a mayor temperatura se minimizan los efectos de la etapa de sinterización del material, reduciendo el tiempo de dicha fase haciendo incluso difícil identificar gráficamente la misma mediante la temperatura interior del aire.
- Pueden obtenerse rangos de temperatura para las diferentes fases del proceso de conformación de las piezas conformadas en todos los casos, existiendo similitudes entre dichos parámetros, propias del material polimérico.
- Las velocidades de incremento de temperatura son sustancialmente superiores a mayores temperaturas, no siendo así en las etapas iniciales del ciclo de calentamiento, fundamentalmente hasta el proceso de sinterización del material.

Respecto a los ensayos y simulaciones numéricas realizadas sin material cabe igualmente realizar las siguientes reflexiones:

- La incorporación de material polimérico en los ensayos produce inevitablemente la ralentización del crecimiento de la temperatura del aire, por los efectos de absorción de energía y aislamiento térmico que produce el propio material.
- Tras la fase de sinterización se producen velocidades de calentamiento similares a las de simulación o de ensayos sin material, exceptuando los ensayos a 100 °C en cuyo caso se alcanza rápidamente la fase permanente del proceso. Este efecto pone de manifiesto el mínimo efecto que produce el material ya sinterizado sobre el proceso, siendo útil éste únicamente a efectos de acabados superficiales y características internas finales del material.
- Finalizada la sinterización del material, en todos los casos la temperatura interior del aire alcanza en estado permanente temperaturas máximas próximas a los ensayos sin material.
- En el inicio de las fases de enfriamiento se producen desfases de temperaturas del interior del aire dada la inercia térmica producida por la capa de material polimérico generada. Dicho efecto se produce de forma más intensa a mayor temperatura así como, en menor medida, también en la temperatura de la cavidad electroconformada

de níquel, la cual se mantienen en contacto en su parte interior con la capa de material conformado.

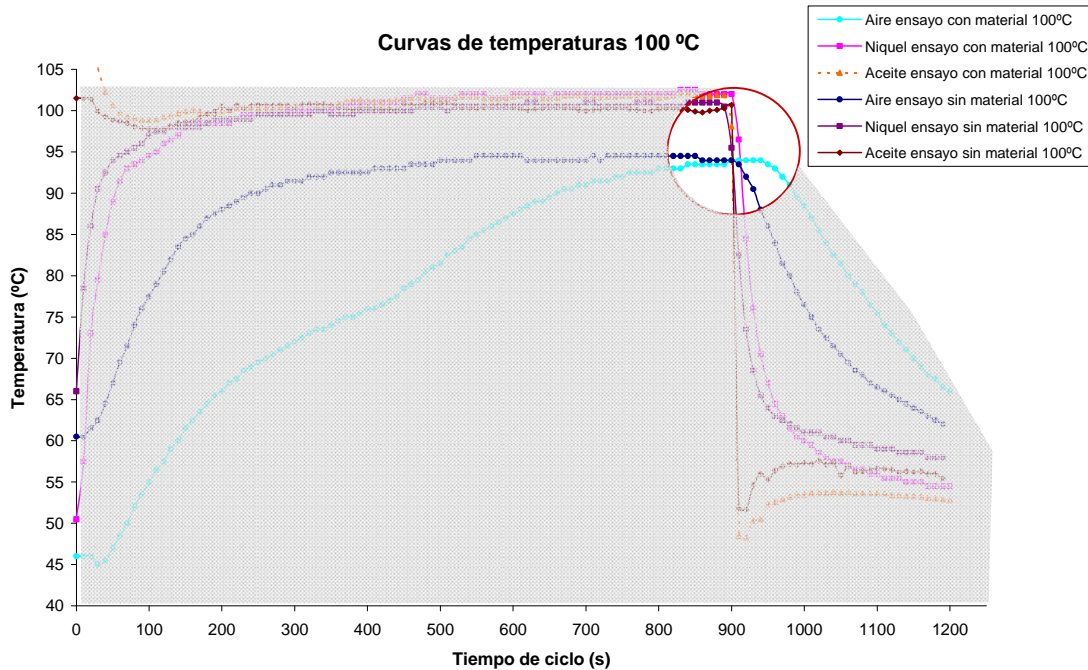


Figura 6.23: Detalle del desfase de temperaturas en diagrama de temperaturas a 100 °C obtenidos en ensayos experimentales con material y en simulación numérica.

#### 6.4.2.4. Reducción del tiempo de ciclo

El grupo de ensayos analizado anteriormente muestra las diferencias producidas por el incremento de la temperatura máxima de calentamiento, fundamentalmente sobre la temperatura interior del aire. Una de las principales peculiaridades observadas radica en que si bien a mayor temperatura mayores velocidades de calentamiento se obtienen, las fases de fluidificación y sinterización del material se producen en todos los casos en temperaturas similares, según la temperatura de fusión del material. Sin embargo, y en cuanto a tiempos requeridos para alcanzar dichas temperaturas, una aceleración del calentamiento produce una reducción del tiempo requerido.

Según la figura 6.24, y sin considerar las propiedades físicas de las piezas obtenidas, puede reducirse el tiempo de conformado de las piezas considerablemente al incrementar desde 100 °C hasta 140 °C la temperatura de calentamiento.

Observando la finalización del proceso de sinterización, se obtienen para los ensayos a 100 °C tiempos de 410 s aproximadamente, a diferencia de los 255 s en el caso

de los ensayos a 140 °C. Estas diferencias suponen una reducción del tiempo de calentamiento hasta dicho momento próxima al 40%.

Desde otro punto de vista, según la tabla 6.4, y considerando una temperatura de referencia a modo de ejemplo tal como 110 °C, las reducciones de la etapa de calentamiento pueden alcanzar valores superiores al 30% entre los ensayos con material a 120 °C y 140 °C.

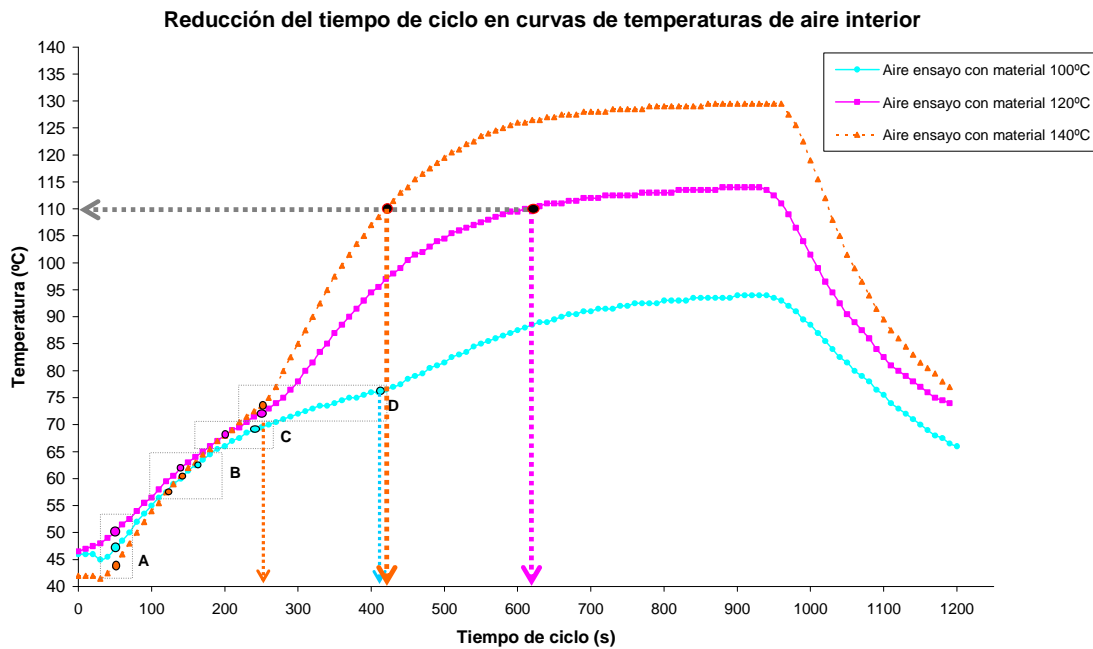


Figura 6.24: Reducción del tiempo de calentamiento en diagrama de temperaturas del aire interior obtenidos en ensayos experimentales con material.

| Temperatura<br>aire interior (°C) | Tiempo de ciclo (s) |        |        | Reducción 120°C<br>respecto a 100 °C | Reducción 140°C<br>respecto a 120 °C |
|-----------------------------------|---------------------|--------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|                                   | 100 °C              | 120 °C | 140 °C |                                      |                                      |
| 50                                | 70                  | 50     | 80     | 28,57%                               | -                                    |
| 60                                | 140                 | 120    | 130    | 14,29%                               | -                                    |
| 70                                | 260                 | 220    | 210    | 15,38%                               | 4,55%                                |
| 80                                | 480                 | 310    | 280    | 35,42%                               | 9,68%                                |
| 90                                | 660                 | 370    | 320    | 43,94%                               | 13,51%                               |
| 100                               | -                   | 440    | 360    | -                                    | 18,18%                               |
| 110                               | -                   | 610    | 420    | -                                    | 31,15%                               |
| 114                               | -                   | 880    | 450    | -                                    | 48,86%                               |
| 125                               | -                   | -      | 580    | -                                    | -                                    |

Tabla 6.4: Tiempos de calentamiento necesarios para alcanzar temperaturas interiores del aire determinadas para cada ensayo y reducción porcentual de dichos tiempos entre ensayos.

Por tanto, con el grupo de ensayos de *variación de temperaturas* en ensayos con material, queda demostrado la relevancia del incremento de temperatura y su optimización en la fase de calentamiento desde el punto de vista de la reducción del tiempo del ciclo, debiéndose en cualquier caso compatibilizar y supeditar a las calidades y prestaciones deseadas de las piezas finales rotomoldeadas, donde el papel de la temperatura de calentamiento y los tiempos de sinterización adquieren elevada importancia.

#### **6.4.3. Variación del tiempo de calentamiento a 140°C**

Hasta ahora y a modo de recapitulación se han mostrado los resultados de los *ensayos en vacío* y los *ensayos con variación de temperatura* con material. En los primeros se ha podido validar y analizar de forma comparativa los procesos de análisis numérico de simulación con los ensayos experimentales, mientras que el segundo grupo de ensayos ya ha permitido analizar el proceso de rotomoldeo con material, en un proceso que podría considerarse completo y real.

Tras estos dos grupos de ensayos, se han desarrollado otros grupos más específicos. A continuación se expone el tercer grupo, compuesto por 4 ensayos, con temperatura de calentamiento del aceite térmico de 140 °C, 70 gramos de EVA y granulometría general en todos los casos. El parámetro variable corresponde al tiempo de calentamiento.

En el grupo de ensayos anterior se ha iniciado en el estudio básico de la reducción del tiempo de ciclo mediante la reducción de los tiempos de calentamiento. Nótese que uno de los principales objetivos del presente trabajo de investigación consiste en la optimización del proceso desde el punto de vista energético y del tiempo de procesado, parámetros ambos íntimamente relacionados con el tiempo requerido para la fabricación de las piezas. Sin embargo es posible abordar con mayor profundidad los tiempos de calentamiento necesarios para la completa finalización del proceso.

Los tiempos de calentamiento nuevamente ensayados corresponden a 300 s, 900 s, 1500 s y 2400 s.

##### *6.4.3.1. Objetivos principales de la variación del tiempo de ciclo*

A diferencia de los grupos de ensayos anteriores, en esta ocasión el estudio comparativo entre los 4 ensayos del presente grupo de experimentación no reporta más información que las de calidades de las piezas generadas. Esto se debe a que los ensayos

sólo varían entre sí en los tiempos de calentamiento utilizados. Por otra parte, no existen datos numéricos de simulación al tratarse de ensayos con material, y las diferentes curvas experimentales de temperaturas son semejantes entre sí salvo por las diferentes finalizaciones del proceso.

Dicho lo anterior, se hace necesario reflexionar en los tiempos de ciclo que hasta ahora se han estudiado, concretamente los tiempos de calentamiento.

A partir de los primeros ensayos experimentales realizados con material se determinó suficiente, para el conjunto de ensayos que se pretendían realizar, 900 s como tiempo de calentamiento estándar para alcanzar temperaturas de aire interior del molde en estado cuasi-permanente. Analizados los ensayos generales realizados, cabe determinar cuáles son los tiempos de calentamiento mínimos para unas condiciones de ensayo determinadas, que permitan obtener piezas con las calidades que se requieran, optimizando así los costes de producción.

La principal finalidad pues del presente grupo de ensayos se centra en la evaluación básica de los tiempos mínimos de ciclo, que permitan posteriormente el análisis comparativo del molde de rotomoldeo prototipo realizado y los procesos de rotomoldeo convencionales.

#### 6.4.3.2. *Resultados experimentales*

En la figura 6.25 se muestran las diferentes curvas de los ensayos seleccionados con variación de tiempo de calentamiento a 140 °C.

No se dispone más que de las propias características físicas de las piezas generadas en estos ensayos para realizar un análisis comparativo entre las mismas, ya que las diferentes curvas muestran ensayos semejantes. Es por ello que es posible realizar un útil y sencillo estudio de dichos ensayos mediante los espesores de las piezas obtenidas.

En este momento resulta de interés recalcar que no se pretende estudiar de forma precisa y detallada la mejor configuración de los ensayos y sus parámetros para obtener las mejores piezas posibles. Entre los objetivos del presente estudio de investigación no se encuentran el ajuste, regulación y/u optimización del proceso de rotomoldeo desarrollado, pues resultaría de una profundidad impropia para una sola Tesis Doctoral, correspondiendo realmente a líneas futuras de investigación susceptibles de desarrollo.

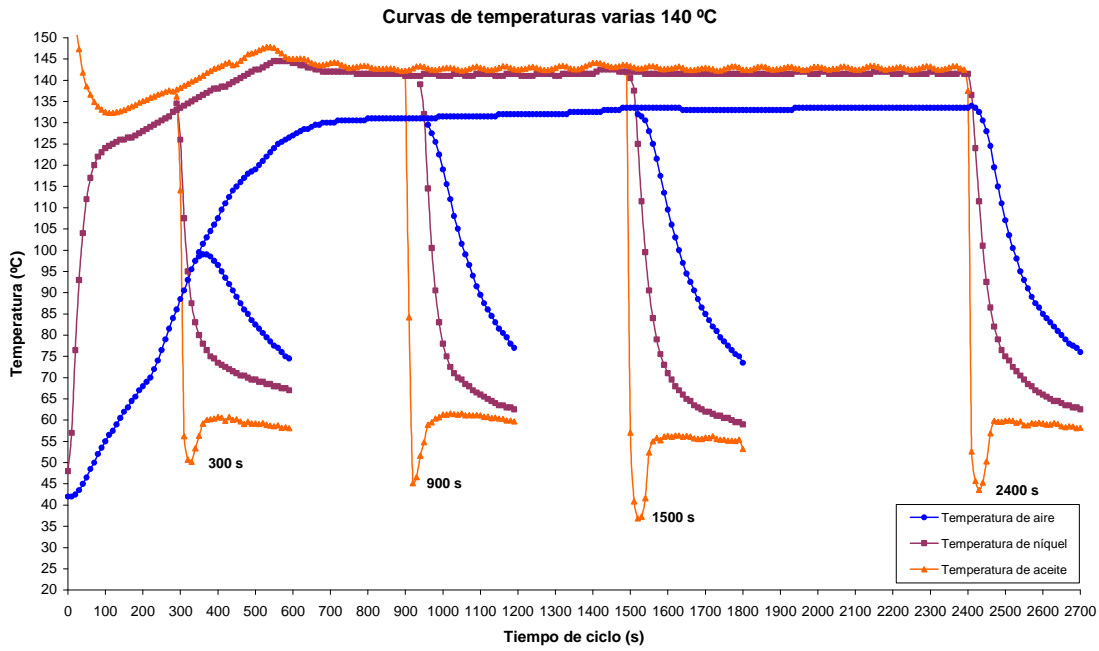


Figura 6.25: Diagramas de temperaturas superpuestas de los diferentes ensayos a 140 °C con variación del tiempo de calentamiento.

6.4.3.2.1. Espesores de piezas obtenidas en ensayos

Los espesores de las piezas rotomoldeadas van a constituir la principal herramienta para el análisis del grupo de ensayos de *variación del tiempo de calentamiento* a 140 °C dado que los datos experimentales de temperaturas son semejantes o equivalentes en todos los ensayos.

En las tablas 6.5 y 6.6 se muestran los valores de espesores obtenidos en las 4 caras laterales de las piezas rotomoldeadas, tomados en 3 puntos equidistantes en cada cara y separados 20 mm respecto al borde superior de la pieza rotomoldeada.

| Ensayo | Tiempo de calent. (s) | Espesor (mm)    |      |      |              |      |      |                |      |      |                |      |      |
|--------|-----------------------|-----------------|------|------|--------------|------|------|----------------|------|------|----------------|------|------|
|        |                       | cara de entrada |      |      | cara derecha |      |      | cara izquierda |      |      | cara de salida |      |      |
| 19     | 300                   | 3,17            | 3,22 | 3,08 | 3,65         | 3,77 | 3,60 | 3,57           | 3,54 | 3,43 | 3,22           | 3,22 | 3,07 |
| 18     | 900                   | 2,52            | 2,46 | 2,49 | 2,65         | 2,63 | 2,74 | 2,57           | 2,72 | 2,63 | 2,37           | 2,41 | 2,44 |
| 20     | 1500                  | 2,40            | 2,00 | 2,11 | 2,17         | 2,10 | 2,09 | 1,95           | 2,18 | 2,17 | 1,56           | 1,64 | 1,74 |
| 21     | 2400                  | 1,93            | 1,90 | 1,80 | 2,04         | 1,80 | 1,95 | 2,03           | 1,82 | 1,97 | 1,54           | 1,66 | 1,65 |

Tabla 6.5: Espesores de los diferentes puntos tomados en las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 140 °C.

| Ensayo | Tiempo de calentamiento (s) | Espesor medio (mm) |              |                |                |        |
|--------|-----------------------------|--------------------|--------------|----------------|----------------|--------|
|        |                             | cara de entrada    | cara derecha | cara izquierda | cara de salida | global |
| 19     | 300                         | 3,16               | 3,67         | 3,51           | 3,17           | 3,38   |
| 18     | 900                         | 2,49               | 2,67         | 2,64           | 2,41           | 2,55   |
| 20     | 1500                        | 2,17               | 2,12         | 2,10           | 1,65           | 2,01   |
| 21     | 2400                        | 1,88               | 1,93         | 1,94           | 1,62           | 1,84   |

Tabla 6.6: Espesores medios de las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 140 °C.

Según los resultados obtenidos pueden destacarse dos efectos fundamentales producidos por el incremento del tiempo de calentamiento:

- En todos los puntos medidos, el espesor decrece a mayor tiempo de calentamiento. Dicho efecto viene producido por la densificación del material en la última fase de la etapa de calentamiento, la cual se desarrolla en mayor medida a mayores tiempos de calentamiento.
- El decrecimiento del espesor por incremento de tiempo de calentamiento se reduce hasta alcanzar valores mínimos de espesores con tendencias a valores constantes, aún aumentando los tiempos de calentamiento. Este efecto determina el fin del proceso de densificación a modo de saturación de dicha fase. Véase figura 6.26.

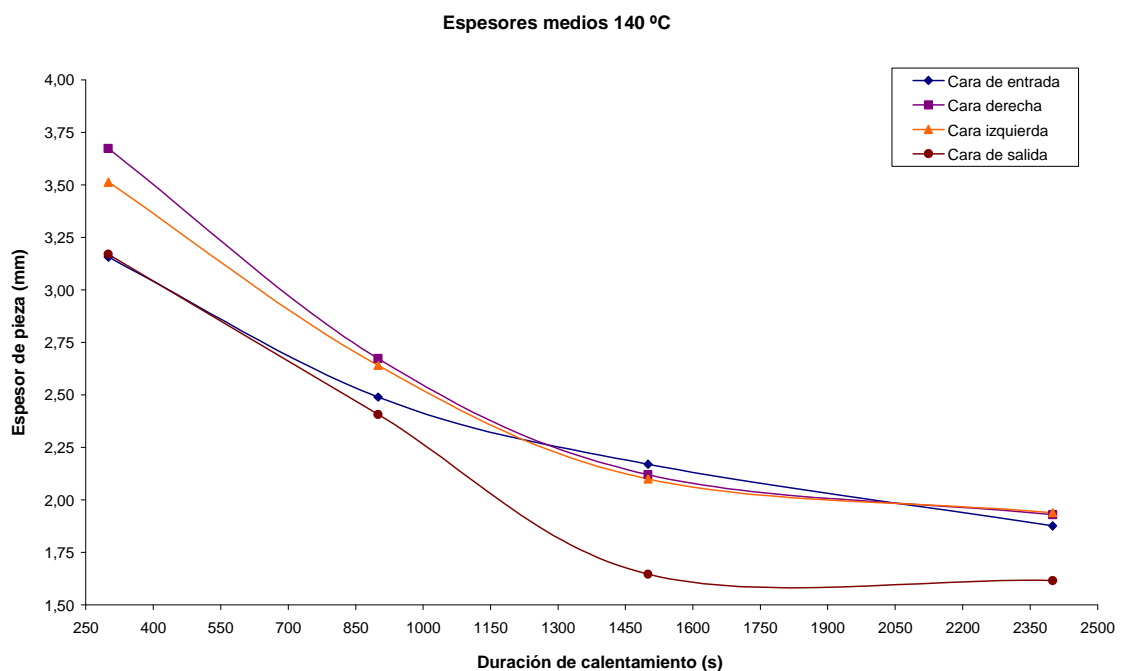


Figura 6.26: Diagramas de espesores medios de las piezas obtenidas en ensayos a 140 °C y según variación del tiempo de calentamiento.

Analizando desde otro punto de vista el efecto sobre los espesores producidos por el incremento de la duración del tiempo de calentamiento del proceso, puede observarse una reducción del espesor medio de las piezas del 24,44% considerando el espesor medio del ensayo con 300 s de calentamiento y su equivalente a 900 s. Dicha reducción de espesor alcanza un 45,51% en el mayor de los tiempos de calentamiento dispuestos, 2400 s. La tendencia asintótica de dicha reducción, según la representación de la figura 6.27, pone de manifiesto los espesores mínimos alcanzables, y por tanto, los límites de los procesos de densificación del material durante el proceso de rotomoldeo.

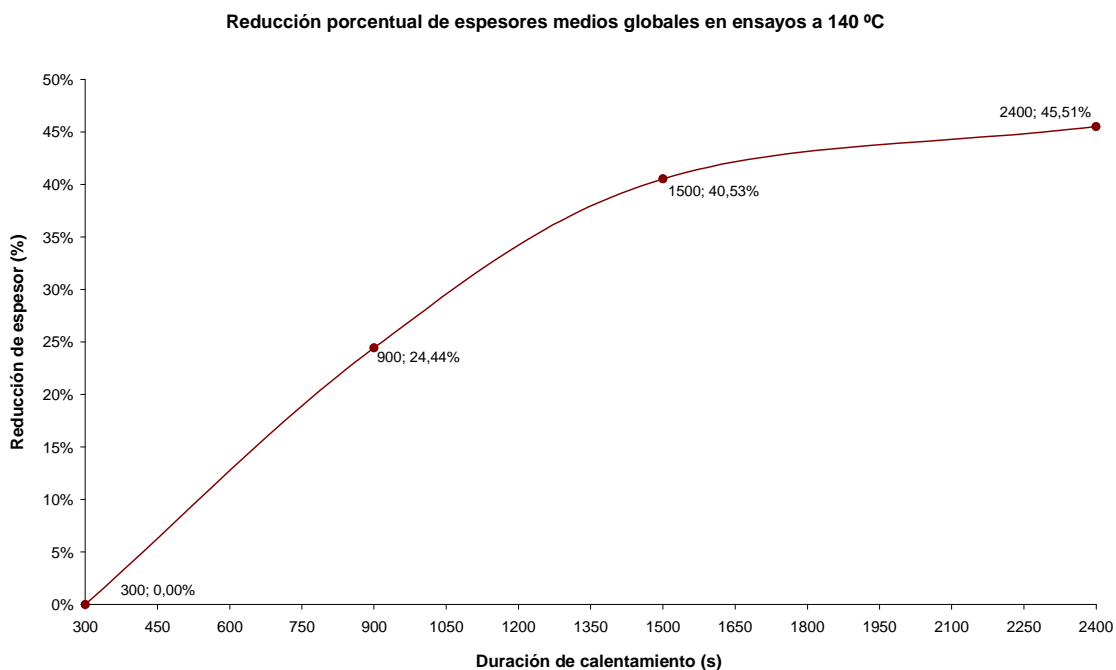


Figura 6.27: Diagramas de reducción porcentual de espesor medio global de las piezas obtenidas en ensayos a 140 °C y según variación del tiempo de calentamiento.

Por tanto, el aumento de la duración del proceso de calentamiento durante el moldeo rotacional produce una mayor densificación del material, lo cual revierte en espesores menores de piezas, con mayor densidad y mínimo contenido de aire interior. Este proceso redundará en mejores características mecánicas, impermeabilidad, flexibilidad, elasticidad y otros aspectos concordantes.

Sin embargo, una de las principales cuestiones a resolver en el moldeo rotacional consiste en la reducción del tiempo de ciclo, muy condicionado al tiempo de calentamiento necesario para la conformación de las piezas. De ahí la importancia de los análisis que en estos apartados se están llevando a cabo.



Según las especificaciones y características que se requieran en las piezas rotomoldeadas, deberán optimizarse los tiempos de calentamiento, entre otros parámetros, deseándose generalmente minimizar la duración del calentamiento, y por tanto de ciclo. Como se mostrará en el siguiente apartado de ensayos a 160 °C, así como en lo expuesto en el grupo de ensayos de variación de temperatura del apartado 6.4.2., el incremento de la temperatura de calentamiento permite reducir los tiempos de calentamiento necesarios para producir densificaciones del material adecuadas a las necesidades generales de las piezas del moldeo rotacional.

#### **6.4.4. Variación del tiempo de calentamiento a 160°C**

Prosiguiendo en el análisis y optimización de la reducción del tiempo de ciclo se desarrollan nuevos ensayos con variación del tiempo de calentamiento, similares al grupo de ensayos anterior, incrementando la temperatura de calentamiento del aceite térmico hasta 160 °C, que corresponde con la máxima temperatura posible por razones de limitaciones de la máquina de ensayos y de seguridad operacional.

De forma análoga a los ensayos realizados con variación del tiempo de calentamiento a 140 °C, se desarrollan ensayos a 160 °C con tiempos de calentamiento a 300 s, 900 s, 1500 s y 2400 s que corresponden a 5, 15, 25 y 40 minutos respectivamente, manteniendo el resto de parámetros invariables.

##### *6.4.4.1. Objetivos principales de la variación del tiempo de ciclo*

El presente grupo de ensayos permitirá, además de corroborar las conclusiones parciales y análisis realizados anteriormente, establecer en mayor profundidad los aspectos fundamentales de reducción del tiempo de ciclo global y la densificación del material en las piezas rotomoldeadas, utilizando como base comparativa los ensayos similares realizados a 140 °C.

##### *6.4.4.2. Resultados experimentales*

En la figura 6.28 se muestran las diferentes curvas de los ensayos con variación de ciclo, en esta ocasión a temperaturas de calentamiento del aceite térmico de 160 °C. Dichas curvas muestran de forma solapada los resultados obtenidos en los diferentes ensayos para los diferentes tiempos de calentamiento seleccionados.

Tras la exposición de los resultados y mediciones de espesores resulta de interés el análisis comparativo de los espesores obtenidos y los tiempos de ciclo equivalentes entre los ensayos realizados a 140 °C y 160 °C.

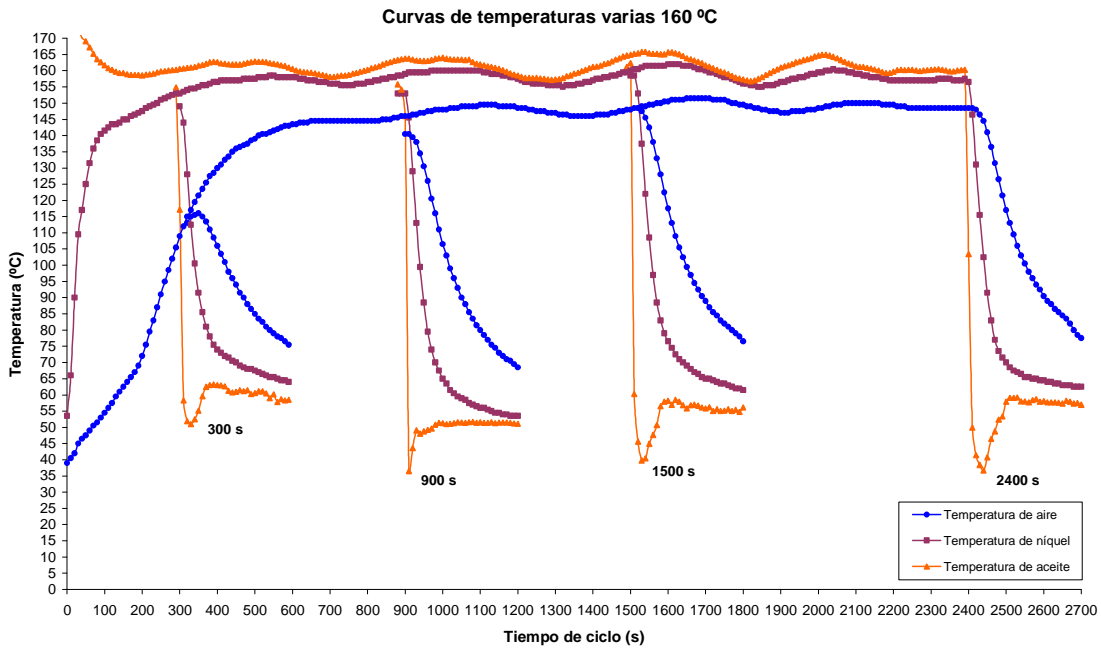


Figura 6.28: Diagramas de temperaturas superpuestas de los diferentes ensayos a 160 °C con variación del tiempo de calentamiento.

6.4.4.2.1. Espesores de piezas obtenidas en ensayos

De igual forma a la exposición de los ensayos a 140 °C, la medición de los espesores resulta primordial para realizar una comparación de los tiempos de calentamiento. Las piezas rotomoldeadas han sido caracterizadas mediante sus espesores como se muestra en las tablas 6.7 y 6.8.

| Ensayo | Tiempo de calentam. (s) | Espesor (mm)    |      |      |              |      |      |                |      |      |                |      |      |
|--------|-------------------------|-----------------|------|------|--------------|------|------|----------------|------|------|----------------|------|------|
|        |                         | cara de entrada |      |      | cara derecha |      |      | cara izquierda |      |      | cara de salida |      |      |
| 22     | 300                     | 2,78            | 2,56 | 2,68 | 3,31         | 3,32 | 3,05 | 2,98           | 2,80 | 2,94 | 2,50           | 2,31 | 2,53 |
| 23     | 900                     | 2,21            | 2,16 | 2,20 | 2,08         | 2,12 | 2,20 | 2,11           | 2,15 | 2,21 | 1,52           | 1,53 | 2,56 |
| 24     | 1500                    | 1,67            | 1,65 | 1,69 | 2,12         | 2,05 | 2,03 | 1,68           | 1,82 | 1,90 | 1,45           | 1,50 | 1,51 |
| 25     | 2400                    | 1,71            | 1,67 | 1,65 | 1,79         | 1,78 | 1,87 | 1,65           | 1,70 | 1,64 | 1,43           | 1,50 | 1,53 |

Tabla 6.7: Espesores de los diferentes puntos tomados en las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 160 °C.

| Ensayo | Tiempo de calentamiento (s) | Espesor medio (mm) |              |                |                |             |
|--------|-----------------------------|--------------------|--------------|----------------|----------------|-------------|
|        |                             | cara de entrada    | cara derecha | cara izquierda | cara de salida | global      |
| 22     | 300                         | 2,67               | 3,23         | 2,91           | 2,45           | <b>2,81</b> |
| 23     | 900                         | 2,19               | 2,13         | 2,16           | 1,87           | <b>2,09</b> |
| 24     | 1500                        | 1,67               | 2,07         | 1,80           | 1,49           | <b>1,76</b> |
| 25     | 2400                        | 1,68               | 1,81         | 1,66           | 1,49           | <b>1,66</b> |

Tabla 6.8: Espesores medios de las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 160 °C.

Los resultados obtenidos reafirman los dos efectos fundamentales producidos anteriormente en los ensayos a 140 °C; decrecimiento de los espesores a mayor tiempo de calentamiento y saturación del proceso de densificación tras el incremento del tiempo de calentamiento de forma que no se producen menores espesores con el incremento de la duración de calentamiento.

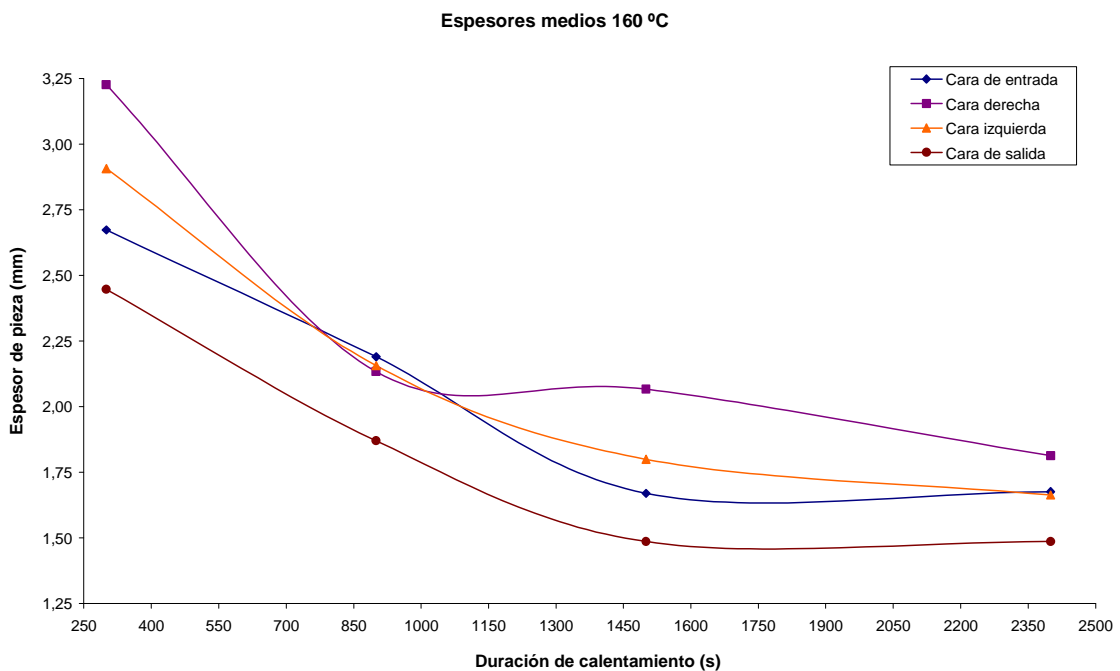


Figura 6.29: Diagramas de espesores medios de las piezas obtenidas en ensayos a 160 °C y según variación del tiempo de calentamiento.

Los espesores producidos por el incremento de la duración del tiempo de calentamiento del proceso quedan reducidos al 25,80%, considerando el espesor medio del ensayo con 300 s de calentamiento y su equivalente a 900 s. Dicha reducción de espesor alcanza un máximo de 41,00% en el mayor de los tiempos de calentamiento dispuestos,

2400 s. La tendencia asintótica de dicha reducción, según la representación de la figura 6.30, pone de manifiesto los espesores mínimos alcanzables, y por tanto, los límites de los procesos de densificación del material durante el procesos de rotomoldeo, de igual forma que en los ensayos a 140 °C.

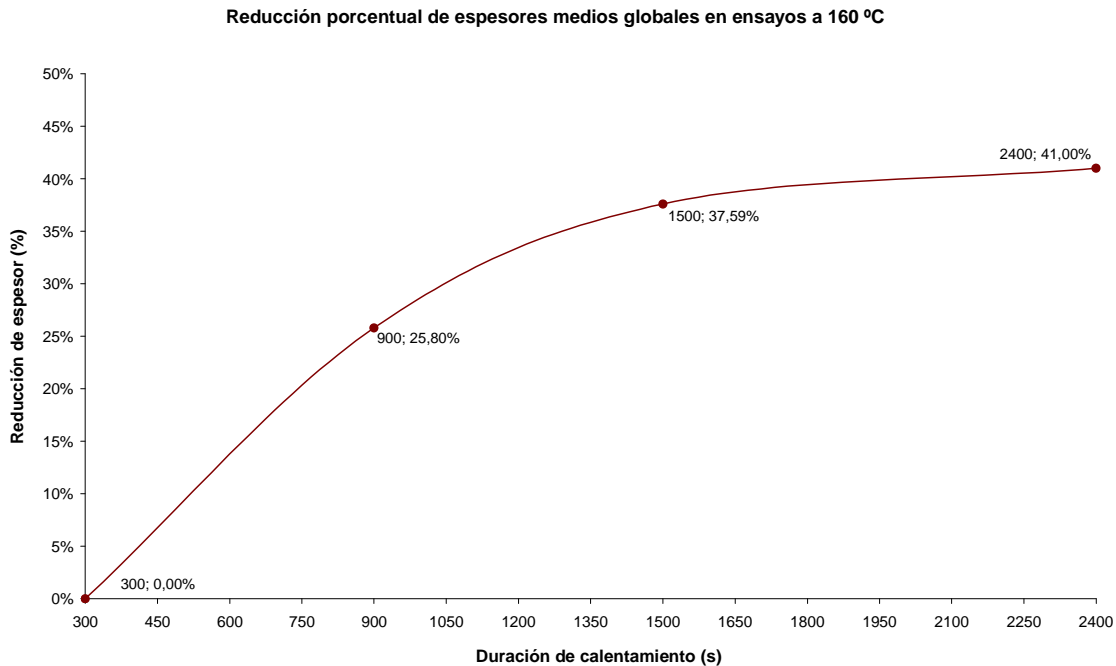


Figura 6.30: Diagramas de reducción porcentual de espesor medio global de las piezas obtenidas en ensayos a 160 °C y según variación del tiempo de calentamiento.

#### 6.4.4.3. Análisis comparativo de ensayos a 140 °C y 160 °C

El mayor interés de los dos grupos de ensayos de variación de temperatura, realizados a 140 °C y 160 °C, se encuentra en el análisis del efecto que estas temperaturas producen en los tiempos de calentamiento para obtener espesores de piezas similares. Dicho de otra forma, cómo el incremento de temperatura permite obtener piezas de igual espesores con menor tiempo de proceso, respecto a otros ensayos de menor temperatura.

En la figura 6.31 se muestra la variación del espesor medio de las piezas rotomoldeadas en los ensayos experimentales realizados tanto a 140 °C como a 160 °C. Además, se ha representado una extrapolación simple de los resultados aproximados que podrían darse para ensayos a 180 °C. Ha de tenerse en cuenta que para dichas extrapolaciones se han utilizado parámetros correspondientes también a ensayos a 100 °C y 120 °C en similares condiciones.

El incremento de temperaturas realizado en los ensayos a 160 °C ha producido una reducción del espesor medio respecto a los ensayos a 140 °C en valores superiores al 18%, en los ensayos con menor tiempo de calentamiento. Atendiendo a los datos extrapolados a ensayos a 180 °C, las reducciones podrían superar el 30% de reducción de espesor.

Es de resaltar además cómo a medida que se incrementa la temperatura del proceso, las diferencias de espesores medios entre los diferentes ensayos se minimizan, observándose como las variaciones de espesores se acortan paulatinamente con el incremento de la duración de la etapa de calentamiento. Mientras que entre los ensayos de 900 s y 300 s de calentamiento, donde se produce un incremento del tiempo de ciclo en 600 s, las reducciones de espesores a 140 °C y 160 °C alcanzan valores superiores al 24%, en los ensayos de 1500 s y 2400 s de tiempo de calentamiento las reducciones de espesores entre dichos ensayos tan sólo alcanzan valores próximos al 8% y 5% para las temperaturas de 140 °C y 160 °C respectivamente. Por tanto, las reducciones de espesores más productivas o eficientes se localizan en los primeros 900 s del proceso, siendo imperativo desde un punto de vista energético un incremento de temperatura en contrapartida a un incremento del tiempo de calentamiento.

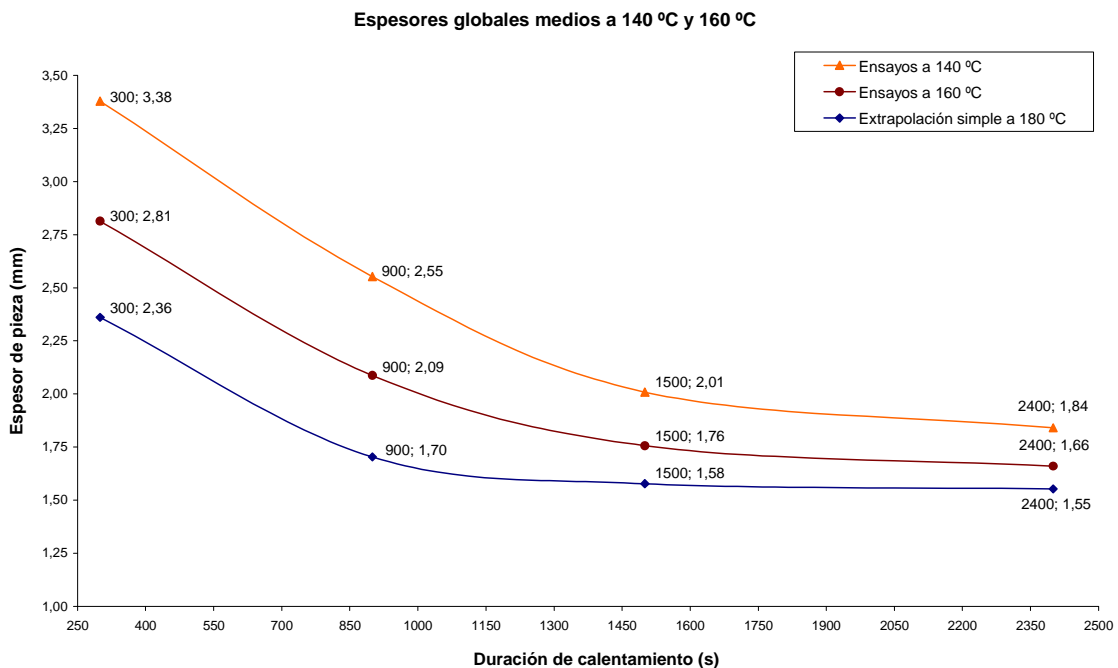


Figura 6.31: Diagramas de espesores medios globales de las piezas obtenidas en ensayos a 140 °C y 160 °C según la variación del tiempo de calentamiento y extrapolación simple de espesores a 180 °C.

Atendiendo a las reducciones de espesores alcanzables con el incremento paulatino de las temperaturas de aceite térmico en las fases de calentamiento, es posible evaluar las reducciones del tiempo de calentamiento en condiciones de similares espesores en piezas

rotomoldeadas. En la figura 6.32 se establece a modo comparativo los tiempos de calentamiento necesarios para obtener piezas de similares espesores en función de las temperaturas de calentamiento de aceite térmico utilizadas.

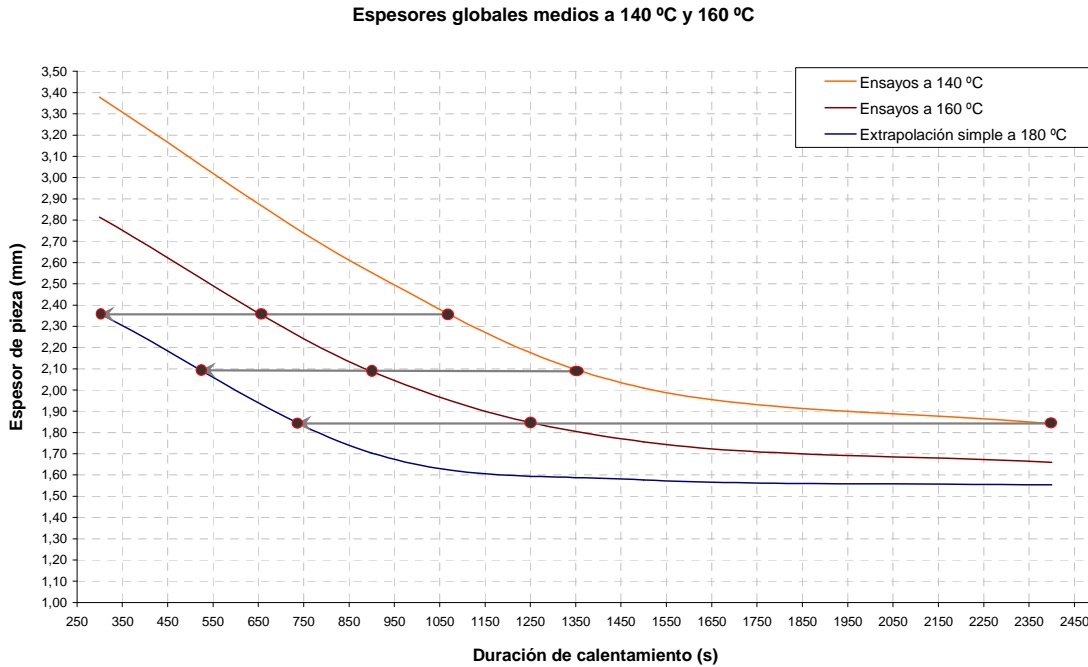


Figura 6.32: Diagramas de espesores medios globales de las piezas obtenidas en ensayos a 140 °C y 160 °C según la variación del tiempo de calentamiento y extrapolación simple de espesores a 180 °C.

Las piezas rotomoldeadas a 140 °C y con tiempos de calentamiento de 2400 s dispondrían así de similares configuraciones de espesores (valor medio de 1,84 mm) que las obtenidas en los ensayos a 160 °C, siendo necesarias en éstas tan sólo 1250 s, lo que supone una reducción aproximada del 48% del tiempo de calentamiento. Considerando admisible la extrapolación de un hipotético ensayo a 180 °C, los tiempos de calentamiento necesarios entonces se reducirían en un 69,2%. Aunque para mayores temperaturas los tiempos de calentamiento podrían estar limitados físicamente por los tiempos mínimos que los propios mecanismos de sinterización y densificación del material requirieran.

Los análisis comparativos anteriores permiten confirmar la importancia que en la reducción del tiempo de ciclo global del rotomoldeo juega la temperatura de calentamiento, siendo el parámetro más determinante para la minimización de los tiempos de procesado de las piezas en las fases de calentamiento, al acelerar los procesos de sinterización y densificación del material.

A pesar de los comentarios anteriores, no se desea obviar los condicionantes fundamentales existentes en el moldeo rotacional que siempre relativizan los límites de las variables susceptibles de modificar para optimizar los gastos energéticos y de tiempo de procesado. Estos condicionantes son fundamentalmente las cualidades mecánicas y de acabados que sin lugar a dudas pueden limitar enormemente los tiempos mínimos de calentamiento, enfriamiento, cantidades de materiales o las temperaturas del proceso.

#### **6.4.5. Variación de granulometría**

La granulometría del material en polvo utilizado para la fabricación de piezas mediante moldeo rotacional puede resultar de interés pues podrían influir en los procesos de sinterización y densificación.

Se han seleccionado 3 ensayos con diferentes granulometrías de EVA, realizados a 140 °C, 900 segundos de calentamiento, 300 s de enfriamiento y 70 g de carga de material EVA. En estas condiciones la única variable del proceso resulta ser la propia granulometría. Concretamente se han utilizado cargas de material en polvo 100% a 400 micrómetros (ensayo número 26), 100 % a 125 micrómetros (ensayo número 27) y se ha tomado el ensayo número 18, con granulometría general, como configuración estándar.

##### *6.4.5.1. Resultados experimentales*

Las curvas obtenidas en los diferentes ensayos de este grupo de experimentación, correspondientes a las temperaturas de níquel y aceite térmico de calentamiento y enfriamiento, no muestran ninguna diferencia relevante entre los diferentes ensayos más allá de las mínimas variaciones que produce el propio sistema experimental. La granulometría del material no debe, en cualquier caso, afectar a dichos parámetros pues son prácticamente independientes de dicho factor. Sin embargo la granulometría puede incidir de forma importante en la configuración de la capa de material sinterizado, fundamentalmente en cuanto a espacios intersticiales producidos, la rapidez de sinterización, la porosidad de la pieza etc.

En cuanto a las curvas de aire interior del molde (figura 6.33) aparecen resultados interesantes en los ensayos con grano grueso, correspondiente a 400 micrómetros. En dichos ensayos el comportamiento en la fase de sinterización resultó ser muy dispar respecto al resto de ensayos, los cuales guardan una concordancia similar entre sí.

El tamaño de los granos del material polimérico requiere de una mayor energía y tiempo de absorción de la misma para el inicio de la sinterización, lo cual, unido a la mayor cantidad de aire intersticial que se produce, genera una curva de gran horizontalidad en las temperaturas próximas a la fusión del material, que en términos de temperatura del aire interior del molde se ubican, para el EVA, en valores próximos a los 75 °C.

Este efecto produce una ralentización general del moldeo rotacional así como el descenso de las temperaturas máximas alcanzables, dada la más acusada fase de densificación del material.

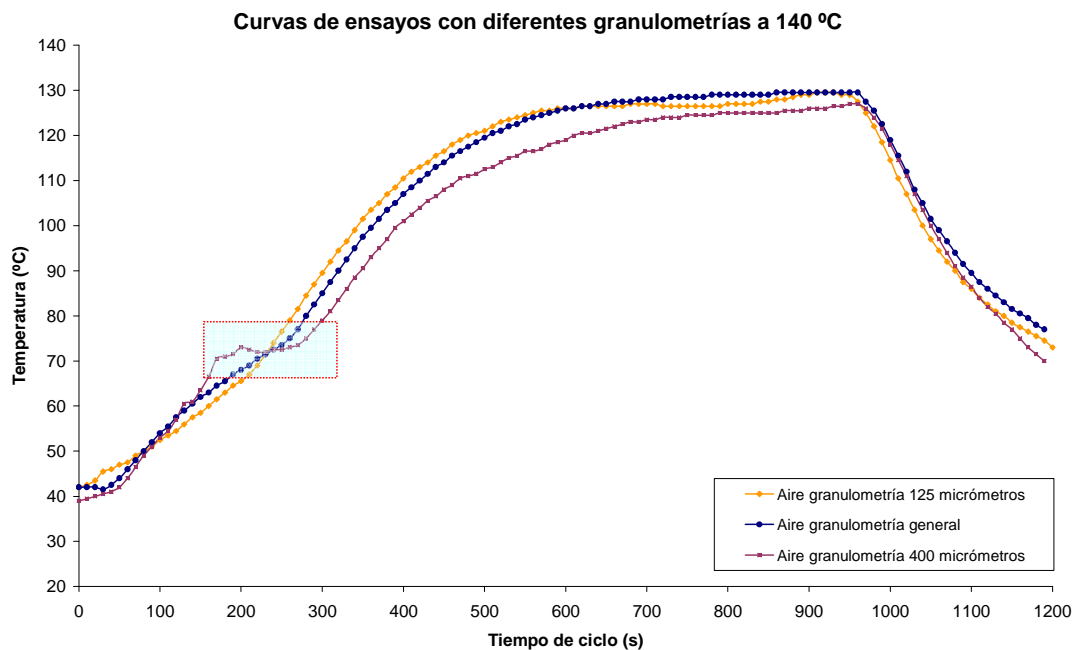


Figura 6.33: Diagramas de temperaturas de aire interior del molde en ensayos a 140 °C con variación de granulometría del material polimérico.

Por tanto, se establece la necesidad de disponer de granulometrías adecuadas, generalmente de mínimo tamaño de grano, que optimicen los procesos de sinterización y densificación del material debido a que, aunque en menor medida que otras variables estudiadas, producen efectos de cierta magnitud en las etapas de sinterización y densificación de las piezas en conformación.

#### 6.4.6. Variación de carga de material polimérico

Del conjunto de ensayos experimentales desarrollados y seleccionados en el presente trabajo de investigación, se encuentran como últimos ensayos los realizados



utilizando la carga de material polimérico como única variable. De esta forma y al igual que en grupos de ensayos anteriores, se mantiene la temperatura de calentamiento a 140 °C.

En cuanto al resto de parámetros del proceso de ensayo se ha aumentado la duración estándar del proceso de calentamiento, alcanzando 1500 s, respecto a los 900 s genéricos. Esta modificación se encuentra motivada por el hecho de utilizar en determinados ensayos cargas de 100 g de material EVA, por lo que se requieren mayores tiempos de ciclo para obtener curvas de aire interior totalmente desarrolladas, es decir, hasta alcanzar valores casi permanentes. De esta manera es posible analizar completamente los ensayos realizados.

#### 6.4.6.1. *Resultados experimentales*

Las curvas de temperaturas de aceite y níquel obtenidas en los diferentes ensayos de este grupo de experimentación no revelan ninguna información notable, al igual que en el grupo de ensayos anterior, mientras que las temperaturas de aire interior del molde vuelven a resultar de interés para un breve análisis comparativo.

El ensayo tomado como base comparativa, correspondiente al de carga de material de 70 g, dispone de una curva de temperatura de aire interior ya analizada en otros grupos. Respecto a esta curva, cabe destacar comparativamente las obtenidas para cargas de 35 g y 100 g:

- En el primer caso (35 g de carga de polímero), las velocidades de calentamiento son muy superiores al ensayo tomado como estándar, con 70 g de carga de material. Si bien en éste ensayo estándar se obtienen velocidades de 0,124 °C/s en el intervalo de calentamiento comprendido entre 50 s y 250 s, en el caso de 35 g la velocidad alcanza valores superiores a los 0,3 °C por segundo. Véase tabla 6.9.  
Este efecto corresponde de forma lógica a la menor cantidad de energía requerida al disponerse de menor cantidad de material polimérico, reduciéndose los espesores de capa de material finalmente generada y los efectos térmicos que ésta produce.
- De modo contrario al caso anterior, la disposición de 100 g de material polimérico requiere de mayores cantidades de energía para su sinterización, lo cual se aprecia en las curvas de aire interior del molde como una ralentización para alcanzar la fase de densificación. Cabe destacar que las velocidades de incremento de temperatura

respecto a los ensayos con 70 g son mínimas, siendo el desfase existente entre ambas curvas debido a la diferencia de temperatura inicial de los ensayos.

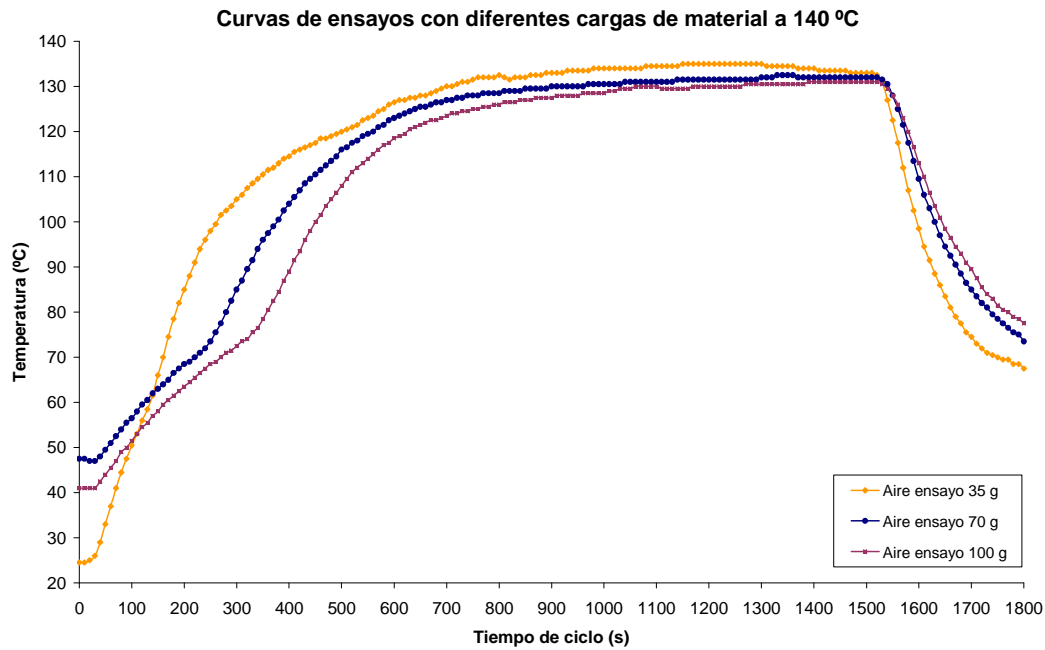


Figura 6.34: Diagramas de temperaturas de aire interior del molde en ensayos a 140 °C con variación de carga de material polimérico.

| Ensayo | Carga de material (g) | Velocidad de calentamiento (°C/s) |
|--------|-----------------------|-----------------------------------|
| 28     | 35                    | 0,317                             |
| 20     | 70                    | 0,124                             |
| 29     | 100                   | 0,119                             |

Tabla 6.9: Incremento de temperatura medio en intervalo desde 50 s hasta 250 s de los ensayos con variación de carga de material a 140 °C.

#### 6.4.6.1.1. Espesores de piezas obtenidas en ensayos

Sin lugar a dudas el grupo de ensayos de *variación de carga de material* muestra las principales diferencias entre ensayos, al analizar los espesores de piezas obtenidas, pues la única variable modificada corresponde a la carga de material, debiéndose de producir diferentes espesores medios entre los ensayos realizados.

La tabla 6.10 muestra la distribución de espesores básicos de las diferentes piezas obtenidas. Como era de suponer, el incremento de carga de material, y manteniendo el resto de parámetros sin variación, debe producir mayores espesores de pieza, tal y como se puede comprobar en las mediciones efectuadas.

| Ensayo | Carga de material (g) | Espesor medio (mm) |              |                |                |        |
|--------|-----------------------|--------------------|--------------|----------------|----------------|--------|
|        |                       | cara de entrada    | cara derecha | cara izquierda | cara de salida | global |
| 28     | 35                    | 1,23               | 1,07         | 1,15           | 0,90           | 1,09   |
| 20     | 70                    | 2,17               | 2,12         | 2,10           | 1,65           | 2,01   |
| 29     | 100                   | 2,70               | 3,04         | 2,84           | 2,45           | 2,76   |

Tabla 6.10: Espesores medios de las caras laterales de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 140 °C con variación de carga de material.

## 6.5. ANÁLISIS DE PIEZAS ROTOMOLDEADAS OBTENIDAS

El conjunto de datos obtenidos mediante los diferentes ensayos realizados han sido analizados de forma particular, en función de los grupos en los que se han organizado, obteniéndose una visión particular del comportamiento del proceso en cada caso. No obstante, es de vital importancia establecer una visión global de los diferentes resultados conseguidos, que permita comprender el comportamiento global del proceso de rotomoldeo para las condiciones específicas que se han desarrollado, lo cual puede realizarse de forma concreta e inequívoca mediante el estudio de las piezas rotomoldeadas obtenidas.

Sería posible, aunque requeriría de mayor disposición de recursos, realizar un análisis pormenorizado de las piezas rotomoldeadas, mediante la caracterización física de sus parámetros principales (densidades, resistencias mecánicas, elasticidad, deformación, ...) De esta manera, podría analizarse comparativamente y de forma absoluta los resultados y prestaciones que la tecnología desarrollada permite obtener, comparativamente con las tecnologías convencionales de rotomoldeo de calentamiento mediante horno e incluso de canales exteriores de aceite.

Según lo anterior, se considera cuanto menos útil y necesario realizar un estudio básico y global de un conjunto representativo de piezas rotomoldeadas en diferentes condiciones, desde un punto de vista cuantitativo a través de la medición de espesores de las mismas, y de forma cualitativa mediante la observación de las porosidades y acabados superficiales obtenidos.

### 6.5.1. Análisis cuantitativo global de espesores de piezas rotomoldeadas obtenidas

En los apartados y capítulos anteriores se ha puesto de manifiesto la validación tanto de los métodos computacionales utilizados como de los desarrollos finales del molde prototipo, en base a los resultados de los ensayos y siempre en términos de temperaturas y tiempos de ciclo. Sin embargo no se ha establecido aún una relación completa entre los objetivos esperados en aquellas fases iniciales de cálculo y simulación con los resultados finalmente obtenidos en las piezas fabricadas, que en definitiva son el resultado final de todo el proceso de investigación, más allá que las propias curvas experimentales de temperaturas.

Con el fin de disponer de una visión global tanto de las piezas rotomoldeadas, en términos de espesores, como de las relaciones de dichos espesores con las simulaciones numéricas que sirvieron de base, se ha establecido una metodología de medición de espesores en 5 puntos principales de cada cara, de un conjunto de piezas, y se ha procedido a su comparación con los resultados iniciales de las simulaciones numéricas.

#### 6.5.1.1. Medición de espesores en piezas rotomoldeadas obtenidas

En la figura 6.35 se muestran los puntos seleccionados para la medición de los espesores de un conjunto de piezas seleccionadas, las cuales corresponden a los ensayos estándares a 120 °C, 140 °C y 160 °C, tiempos de calentamiento de 900 s, tiempos de enfriamiento de 300 s, granulometría general y cargas de material de 70 g. Estos puntos se encuentran distribuidos de forma simple y simétrica respecto al centro, en las diferentes caras de las piezas, permitiendo obtener un conjunto de datos representativos.

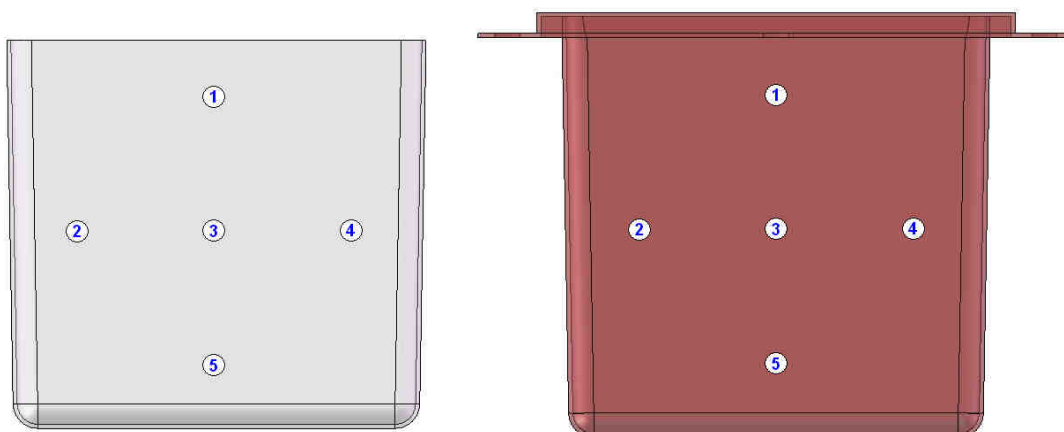


Figura 6.35: Numeración de puntos de medición de espesores en cada cara de las piezas rotomoldeadas (imagen izquierda) y de puntos de medición de temperaturas en cada cara del molde en procesos de simulación numérica (imagen derecha).

Los valores medios de los espesores tomados en al menos tres piezas por temperatura de calentamiento se encuentran relacionados en la tabla 6.11.

| Temperatura ensayo (°C) | Punto de medida | Espesor medio (mm) |                |              |                |               | global |
|-------------------------|-----------------|--------------------|----------------|--------------|----------------|---------------|--------|
|                         |                 | cara de entrada    | cara izquierda | cara derecha | cara de salida | Cara inferior |        |
| 120                     | 1               | 2,48               | 2,73           | 3,09         | 2,30           | 3,55          | 2,83   |
|                         | 2               | 2,52               | 3,18           | 2,98         | 2,31           | 2,85          | 2,77   |
|                         | 3               | 2,52               | 3,09           | 2,65         | 2,23           | 2,78          | 2,65   |
|                         | 4               | 2,81               | 3,31           | 2,90         | 2,51           | 3,44          | 3,00   |
|                         | 5               | 2,91               | 3,39           | 2,70         | 2,57           | 3,35          | 2,98   |
| 140                     | 1               | 2,52               | 2,53           | 2,78         | 2,30           | 2,91          | 2,61   |
|                         | 2               | 2,66               | 2,79           | 2,72         | 2,26           | 2,67          | 2,62   |
|                         | 3               | 2,51               | 2,78           | 2,56         | 2,24           | 2,56          | 2,53   |
|                         | 4               | 2,67               | 2,94           | 2,68         | 2,62           | 2,98          | 2,78   |
|                         | 5               | 2,75               | 3,05           | 2,78         | 2,31           | 2,77          | 2,73   |
| 160                     | 1               | 2,24               | 2,13           | 2,22         | 1,50           | 2,64          | 2,15   |
|                         | 2               | 2,35               | 2,08           | 1,81         | 1,58           | 1,89          | 1,94   |
|                         | 3               | 2,14               | 2,33           | 2,04         | 1,49           | 2,25          | 2,05   |
|                         | 4               | 2,26               | 2,43           | 2,27         | 1,63           | 2,49          | 2,22   |
|                         | 5               | 2,36               | 2,54           | 1,93         | 1,58           | 1,95          | 2,07   |

Tabla 6.11: Espesores medios de los puntos medidos en cada cara de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a diferentes temperaturas.

| Temperatura ensayo (°C) | Espesor medio total | Desviación típica | Coefficiente de variación |
|-------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| 120                     | 2,846               | 0,379             | 13,33%                    |
| 140                     | 2,654               | 0,219             | 8,25%                     |
| 160                     | 2,085               | 0,336             | 16,13%                    |

Tabla 6.12: Valores estadísticos básicos de los espesores medidos.

Los valores de la tabla 6.11 quedan perfectamente reflejados en las siguientes gráficas, 6.36, 6.37 y 6.38, las cuales representan dichos espesores medios a las temperaturas de ensayos realizadas.

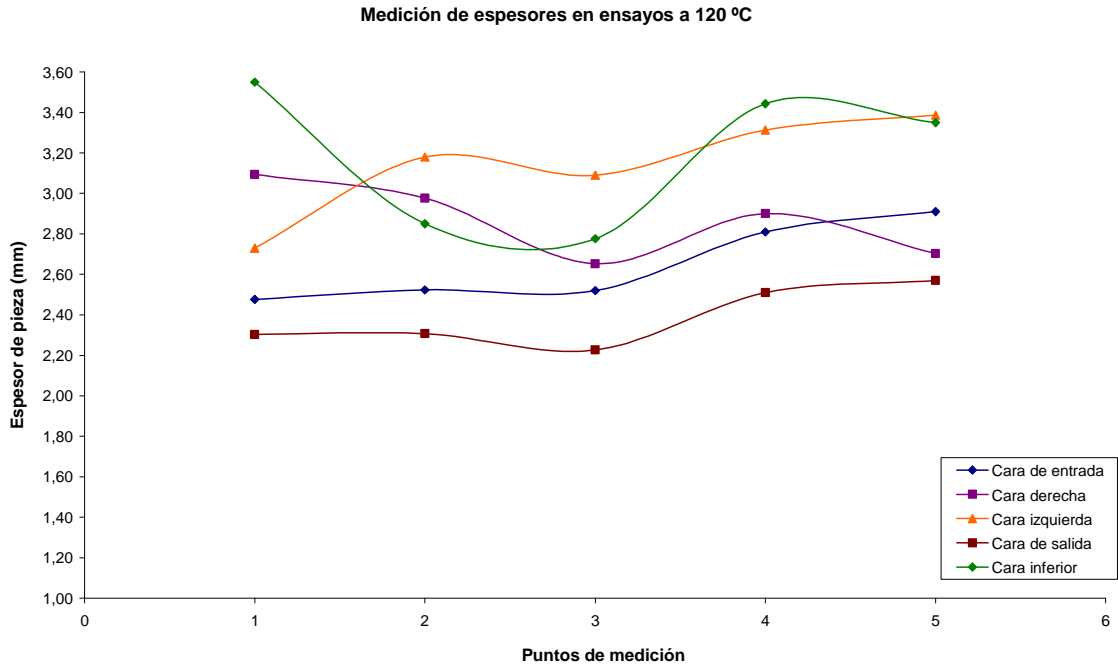


Figura 6.36: Diagramas de espesores medios de los puntos medidos en cada cara de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 120 °C.

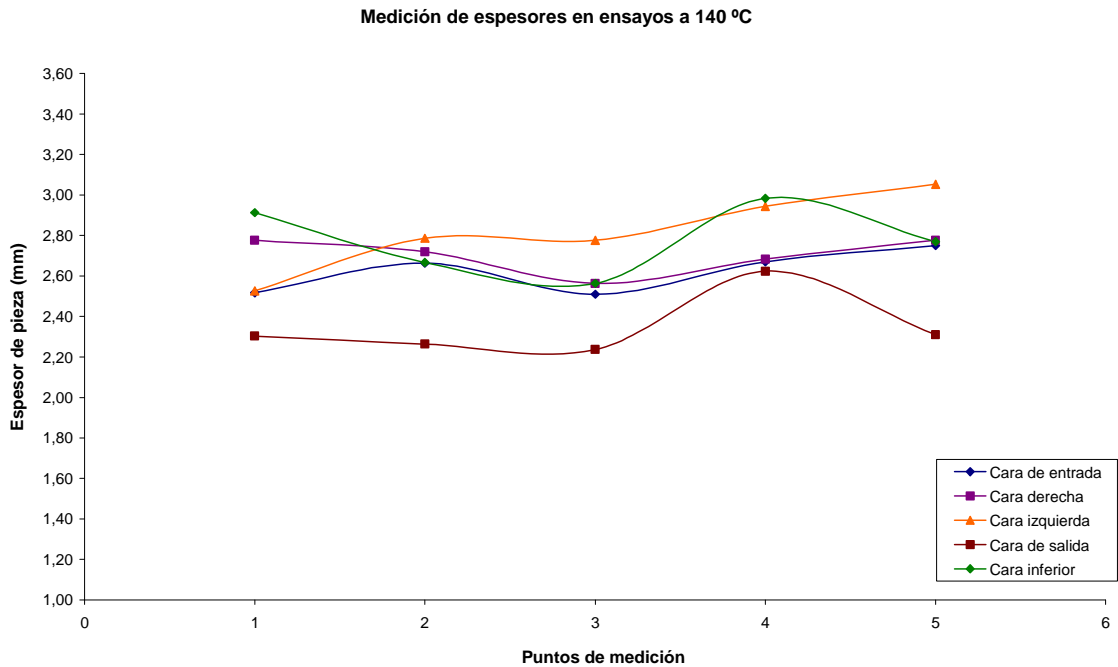


Figura 6.37: Diagramas de espesores medios de los puntos medidos en cada cara de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 140 °C.

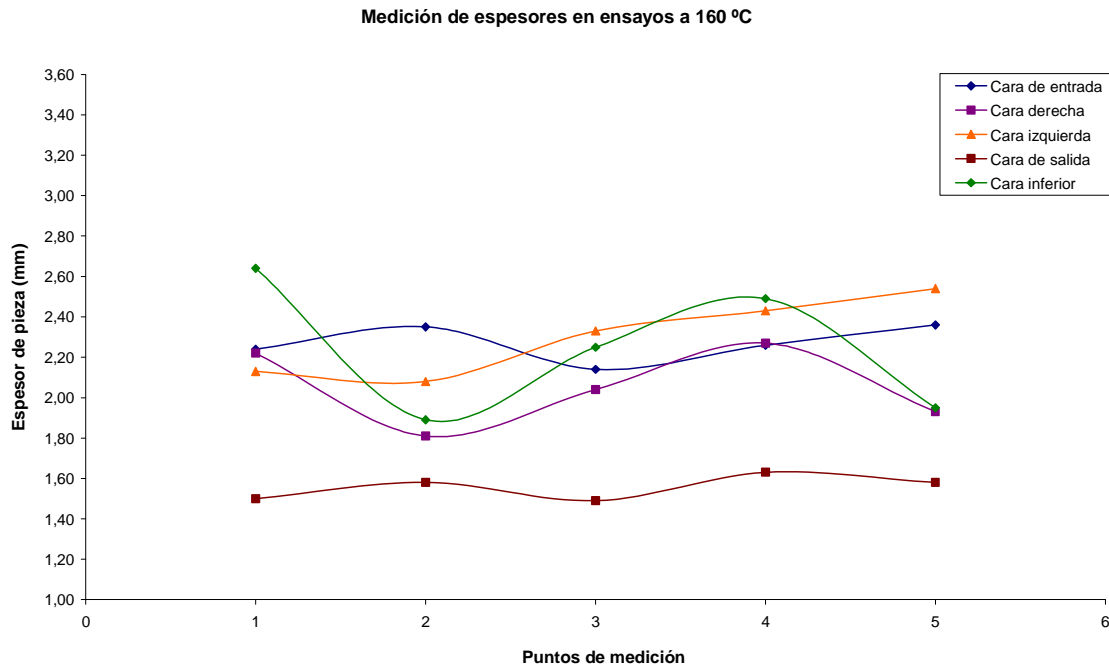


Figura 6.38: Diagramas de espesores medios de los puntos medidos en cada cara de las piezas rotomoldeadas obtenidas en los ensayos a 160 °C.

#### 6.5.1.2. Análisis de espesores medios de las piezas rotomoldeadas

Existen gran variedad de factores que pueden influir de diferentes maneras en la configuración de espesores de las piezas rotomoldeadas; velocidad de rotación, configuración de temperaturas interiores del molde, imprecisiones o rugosidad, fluidez del material... Estos y muchos otros aspectos inciden en la uniformidad y configuración de los espesores de las piezas rotomoldeadas. Concretamente para el diseño de molde desarrollado y las configuraciones de ensayos establecidas, se han obtenido una serie de resultados mostrados en las tablas y gráficos anteriores de los que se pueden derivar las siguientes afirmaciones:

- a. El incremento de la temperatura de calentamiento produce una mayor densificación del material de forma global en toda la pieza reduciendo así su espesor final en todos los casos ensayados. Este hecho se confirma en todos los puntos medidos a las diferentes temperaturas.
- b. En todos los casos, la cara de salida presenta los menores espesores entre todas las caras de la pieza rotomoldeada.
- c. En términos generales y exceptuando las caras inferiores, en cada cara los espesores de los puntos próximos a la parte superior y de entrada del molde (1 y 2) son inferiores a los espesores de las zonas más próximas a la zona inferior y

de salida (4 y 5). Es decir, existe una tendencia creciente de espesor desde los puntos 1 hasta el 5.

- d. Las caras inferiores disponen de una configuración de espesores diferente al patrón ascendente del resto de caras del apartado anterior.
- e. Las caras de entradas disponen de mayores espesores en todos los casos respecto a las caras de salida.
- f. En términos generales los espesores de las caras laterales izquierdas son superiores a las caras laterales derechas.

La temperatura de la pared del molde resulta crucial, pues aquellas zonas de mayores temperaturas en las primeras fases del proceso de calentamiento producen un incremento, respecto del resto de partes, del material depositado. Por tanto, dichas zonas podrían ser fácilmente identificables mediante la colocación de un mayor número de termopares que los dispuestos en los ensayos experimentales.

Por otra parte, el incremento de la temperatura general del molde y su duración en el proceso permite densificar el material en mayor medida, lo cual reduce de forma global los espesores obtenidos. Nótese en las curvas como dicho efecto de densificación varía los espesores de forma general en todas las caras y puntos medidos aunque el efecto de densificación pueda producirse en mayor o menor medida en función de las temperaturas de las distintas partes del molde que puedan ser desiguales.

Para obtener una visión más clara de los efectos que pueden producir las afirmaciones anteriormente descritas se ha recurrido a los únicos datos disponibles relacionados con los espesores medidos, las temperaturas de dichos puntos en el molde electroconformado de níquel mediante los procesos de simulación, que se detallan en el siguiente apartado.

#### 6.5.1.3. *Temperaturas de molde obtenidas en procesos de simulación*

Las limitaciones de los aparatos de medida de la máquina experimental de rotomoldeo imposibilita la medición de temperaturas reales durante el proceso de diferentes puntos del molde, sólo disponiéndose los valores de la temperatura interior del aire, la temperatura del punto central del la cara de entrada del molde electroconformado de níquel y la temperatura de entrada del aceite térmico. Por lo tanto no se disponen de datos que caractericen en mayor medida las diferentes temperaturas puntuales o globales del molde (caras laterales, cara de salida, cara inferior o fondo, etc.)



Con el fin de intentar establecer una interrelación entre valores de temperaturas teóricas y espesores reales obtenidos se han calculado, a través de las simulaciones numéricas, los valores de temperatura correspondiente a los mismos puntos donde se han realizado las mediciones.

Por otra parte, las herramientas informáticas disponibles sólo permiten realizar simulaciones del proceso de rotomoldeo en condiciones de vacío, sin material, por lo que establecer una relación entre espesores reales obtenidos y temperaturas reales o simuladas con material del molde resulta complicado. Para comprender aún más la complejidad para establecer esas relaciones espesor-temperatura con los datos disponibles, cabe recordar que los espesores de las piezas fabricadas corresponden al estado final de las mismas tras el ciclo completo de rotomoldeo, siendo más dificultoso aún determinar qué punto o rango temporal del proceso de rotomoldeo puede mantener una correlación real e inequívoca con el espesor final obtenido en cada pieza.

| Temperatura ensayo (°C) | Punto de medida | Temperaturas a 120 s de tiempo de ciclo (°C) |                |              |                |               |               |
|-------------------------|-----------------|--|----------------|--------------|----------------|---------------|---------------|
|                         |                 | cara de entrada                              | cara izquierda | Cara derecha | cara de salida | cara inferior | global        |
| 120                     | 1               | 96,66  | 92,90          | 92,19        | 87,76          | 116,83        | <b>97,27</b>  |
|                         | 2               | 113,08                                       | 112,48         | 112,36       | 109,81         | 116,15        | <b>112,77</b> |
|                         | 3               | 113,23                                       | 111,37         | 110,87       | 109,33         | 116,15        | <b>112,19</b> |
|                         | 4               | 113,05                                       | 110,80         | 109,98       | 110,55         | 115,92        | <b>112,06</b> |
|                         | 5               | 116,29                                       | 115,33         | 114,82       | 114,28         | 115,68        | <b>115,28</b> |
| 140                     | 1               | 101,27                                       | 95,11          | 93,99        | 86,50          | 134,81        | <b>102,34</b> |
|                         | 2               | 128,55                                       | 127,57         | 127,38       | 123,26         | 133,73        | <b>128,10</b> |
|                         | 3               | 128,79                                       | 125,77         | 124,97       | 122,44         | 133,73        | <b>127,14</b> |
|                         | 4               | 128,50                                       | 124,83         | 123,55       | 124,44         | 133,35        | <b>126,93</b> |
|                         | 5               | 133,90                                       | 132,36         | 131,52       | 130,70         | 132,99        | <b>132,29</b> |
| 160                     | 1               | 89,19  | 82,15          | 80,89        | 72,58          | 124,09        | <b>89,78</b>  |
|                         | 2               | 119,33                                       | 117,40         | 117,22       | 108,27         | 120,45        | <b>116,53</b> |
|                         | 3               | 119,46                                       | 113,60         | 112,30       | 106,92         | 119,38        | <b>114,33</b> |
|                         | 4               | 119,18                                       | 111,72         | 109,41       | 110,59         | 118,61        | <b>113,90</b> |
|                         | 5               | 123,99                                       | 119,22         | 116,58       | 114,29         | 117,53        | <b>118,32</b> |

Tabla 6.13: Temperaturas medias de los puntos en cada cara calculados mediante simulaciones numéricas realizadas a diferentes temperaturas en el momento temporal de 120 s.

La tabla 6.13 anterior, y a modo resumen la 6.14, muestran las temperaturas de los mismos puntos medidos en las diferentes piezas ensayadas y mostradas anteriormente, en el momento concreto del ciclo de 120 s a modo de ejemplo. Cabe reiterar lo expresado en el párrafo anterior, en cuanto a que dicho tiempo del proceso seleccionado no corresponde aún a ningún criterio en concreto que permite establecer una relación entre las temperaturas presentadas y los espesores finales obtenidos.

| Temperatura | Temperatura media global | Desviación típica | Coefficiente de variación |
|-------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|
| 120         | 109,91                   | 8,23              | 7,49%                     |
| 140         | 123,36                   | 13,68             | 11,09%                    |
| 160         | 110,57                   | 14,02             | 12,68%                    |

Tabla 6.14: Valores estadísticos básicos de las temperaturas simuladas en el momento temporal de 120 s.

Las gráficas 6.39, 6.40 y 6.41 representan los valores anteriormente expuestos en la tabla 6.13 para las correspondientes temperaturas de simulación de aceite térmico en fase de calentamiento de 120 °C, 140 °C y 160 °C.

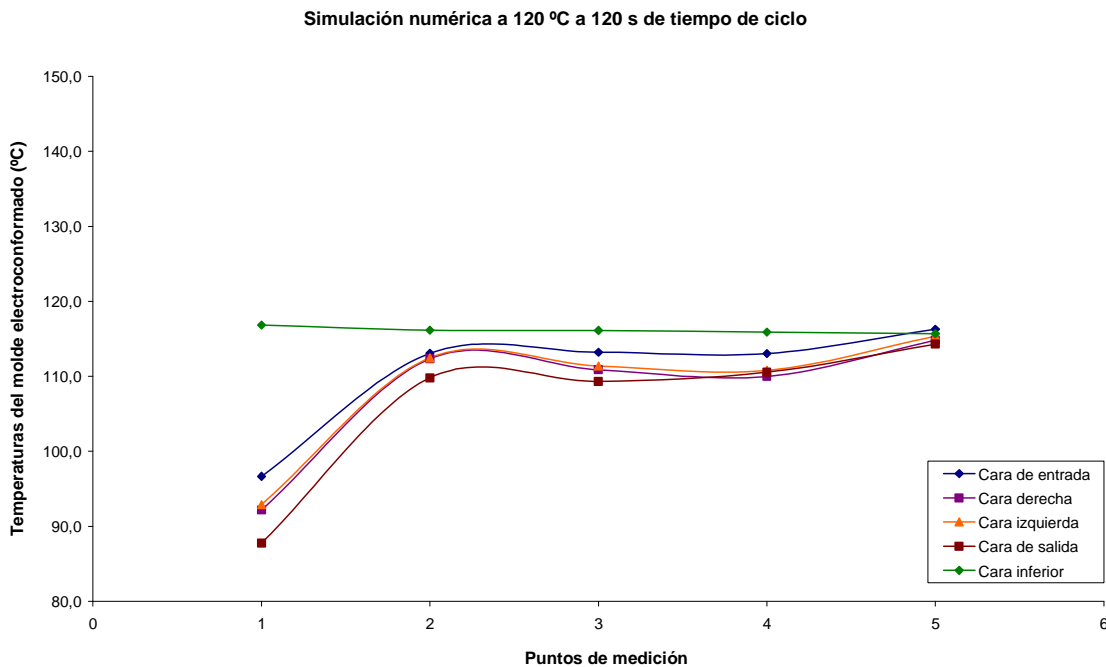


Figura 6.39: Diagramas de temperaturas de los puntos medidos en cada cara del moldeo obtenidos mediante simulación numérica a 120 °C.

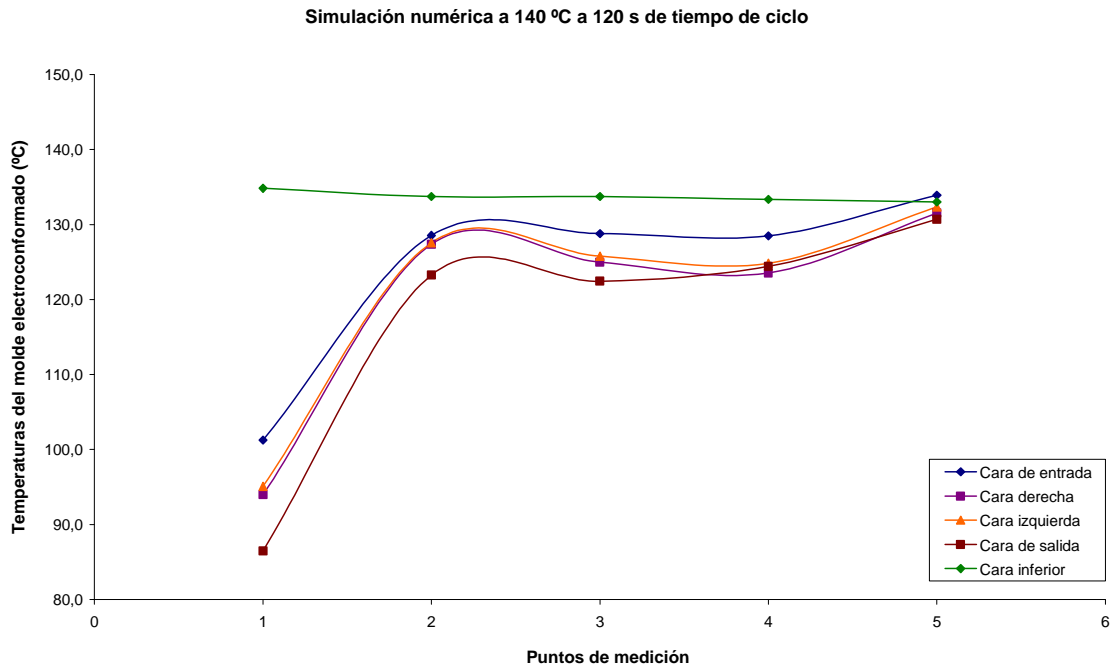


Figura 6.40: Diagramas de temperaturas de los puntos medidos en cada cara del moldeo obtenidos mediante simulación numérica a 140 °C.

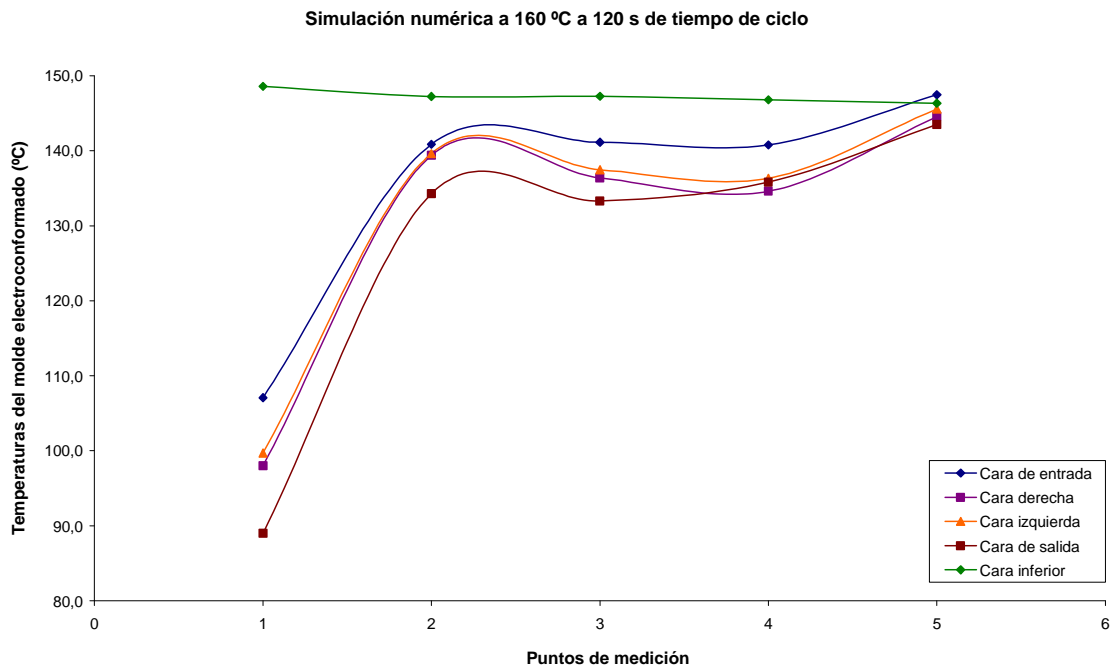


Figura 6.41: Diagramas de temperaturas de los puntos medidos en cada cara del moldeo obtenidos mediante simulación numérica a 160 °C.

Los cálculos numéricos disponen de configuraciones de temperaturas muy semejantes entre sí salvando las diferencias de temperaturas existentes entre ensayo. A pesar de ello, puede observarse como en todas las caras calculadas, las temperaturas de

los puntos numerados como 1 disponen de las menores cotas de temperatura, al estar dicho punto situado en las zonas más próximas a la tapa, y por tanto, de menor flujo calorífico.

El resto de puntos intermedios, puntos 2, 3 y 4, disponen de valores muy semejantes entre sí en cada cara, indicando una gran uniformidad del proceso al menos de forma teórica. Los puntos finales correspondientes a la numeración 5 representan los valores más próximos a la cara inferior o de fondo del molde, donde se producen las mayores temperaturas alcanzadas.

Tal y como se había expuesto en los primeros procesos de cálculos numéricos y simulaciones, el flujo de aceite térmico en las configuraciones de entrada y salidas del molde seleccionadas para su fabricación producían una ligera mayor temperatura en las partes inferiores del molde. Sin embargo, la mayor parte de este efecto se encuentra originado por la asimetría horizontal del molde, ya que la cara superior del mismo se encuentra asilada térmicamente, al no disponerse como una cara activa del molde sino como la entrada de material y salida de la pieza fabricada. Por el contrario, la cara inferior del molde es totalmente activa, por lo que el flujo calorífico del proceso queda descentrado hacia la parte inferior del molde. Este efecto queda constatado teóricamente mediante las curvas de temperaturas de las caras inferiores del molde de las gráficas anteriores.

Respecto a los patrones encontrados en los resultados de los espesores de las piezas rotomoldeadas, los resultados teóricos simulados pueden aportar puntos de vista interesantes y diversos tales como los siguientes:

- a. Las mayores temperaturas globales en todas las partes del molde obtenidas en las simulaciones confirman que el incremento de la temperatura de calentamiento produce una mayor densificación del material de forma global en toda la pieza reduciendo así su espesor final en todos los casos ensayados.
- b. Todas las simulaciones realizadas ratifican la menor temperatura global de la cara de salida del molde respecto al resto de caras. Esto produce menores espesores de pieza en la misma al disminuirse la adhesión del material en polvo en dichas zonas respecto del resto de caras que disponen de mayor temperatura. Con lo cual puede corroborarse los efectos reales detectados en la medición de espesores mediante las curvas teóricas del proceso.

- 
- c. De forma similar a los resultados de los espesores medidos en las piezas rotomoldeadas, las curvas de temperatura confirman cómo dicha temperatura se incrementa desde los puntos próximos a la parte superior y de entrada del molde (1 y 2) hasta los más próximos a la zona inferior y de salida (4 y 5). Es decir, existe una tendencia creciente de espesor desde los puntos 1 hasta el 5 de forma correlacionada con los espesores obtenidos y en términos generales, pues existen limitados valores que no cumplen con dicha afirmación.
  - d. Las caras inferiores disponen de una configuración de espesores diferente al patrón ascendente del resto de caras del apartado anterior. Esto puede concordar en cierta forma con la configuración de temperaturas de las caras inferiores en los cálculos numéricos, que muestran cómo a diferencia del resto de caras, las temperaturas de las caras inferiores son superiores a aquéllas y prácticamente uniformes entre los diferentes puntos de referencia. Sin embargo no disponen de una configuración similar a los datos obtenidos en los ensayos, existiendo pues una importante variabilidad de los resultados y una mínima correlación.
  - e. En todas las simulaciones realizadas se disponen de mayores temperaturas en todos los casos en las caras de entradas respecto a las de salida, lo cual reafirma la obtención de mayores espesores en dichas caras.
  - f. Finalmente, las temperaturas de las caras laterales obtenidas en los procesos numéricos son muy similares entre sí, a diferencia de los espesores detectados, por lo que los efectos de dicha variabilidad entre caras laterales de espesores pueda obedecer a la influencia del movimiento a derechas del molde y/o a imprecisiones en la fabricación del molde de forma que produzcan diferencias térmicas reales mayores entre dichas caras. Estas imprecisiones pueden darse por la distorsión de los canales del distribuidor, holguras en los canales envolventes, diferencia de espesores de la cavidad electroconformada de níquel, etc.

Como conclusión parcial de las consideraciones planteadas anteriormente, los datos obtenidos mediante los ensayos experimentales en forma de espesores de pieza pueden considerarse correlacionados de forma general con los datos iniciales establecidos en los procesos de simulación numérica que sirvieron de base para el desarrollo y ejecución del molde prototipo real.

6.5.1.4. Correlación de espesores de pieza y temperaturas procedentes de cálculos numéricos

Los resultados expuestos tanto de espesores medidos como de distribución de temperaturas obtenidas mediante simulación numérica quedan referidos a las mismas condiciones de ensayo (reales o teóricas) y a los mismos puntos de medición, por lo que es posible estudiar comparativamente ambos conjuntos de resultados entre sí y determinar las posibles correlaciones que pudieran existir.

Dado que las temperaturas simuladas y los espesores medidos se encuentran a escala numérica diferente, se ha procedido a escalar estos últimos de forma que, en términos globales, el valor medio de los espesores y el de las temperaturas simuladas sean iguales en cada cara. De esta forma, y escalando los espesores mediante los factores correspondientes a la tabla 6.15, se puede representar las diferentes curvas de espesores y temperaturas, tal y como se muestra en la figura 6.42 (temperaturas y ensayos a 140 °C).

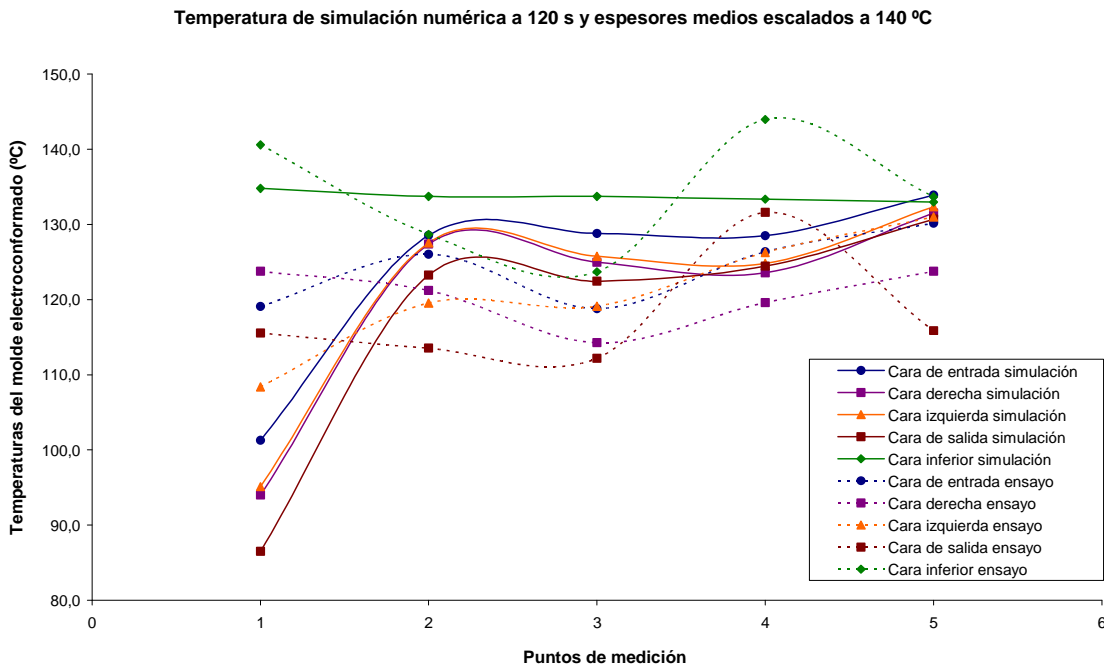


Figura 6.42: Diagramas de temperaturas de los puntos calculados en cada cara del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140 °C.

| Factores de escala |                |              |                |               |
|--------------------|----------------|--------------|----------------|---------------|
| cara de entrada    | cara izquierda | cara derecha | cara de salida | cara inferior |
| 47,33              | 42,90          | 44,57        | 50,16          | 48,26         |

Tabla 6.15: Factores de escala globales aplicados a los espesores medios. Temperaturas de simulación numérica a 120 s.

Para un mayor detalle se han representado de forma independiente las diferentes curvas de temperaturas y espesores de cada cara del molde y pieza rotomoldeada. Figuras 6.43, 6.44, 6.45, 6.46 y 6.47.

Todos los datos comparados presentan bajas correlaciones entre sí, lo que hace no garantizar la interrelación lineal o proporcional de los diferentes grupos de datos.

Los datos correspondientes de la cara de entrada muestran correlaciones similares en los puntos 2, 4 y 5, mientras que los puntos 1 y 3 difieren en mayor medida. En cambio, y exceptuando los puntos 1, las caras laterales derecha e izquierda disponen de relación próximas entre datos, existiendo en ambos casos una configuración a partir de los puntos 2 muy similar, concordando las curvas.

Las curvas de las caras de salida y cara inferior muestran valores muy dispares entre los diferentes grupos de datos (temperaturas y espesores escalados) siendo mínima la correspondencia entre estos.

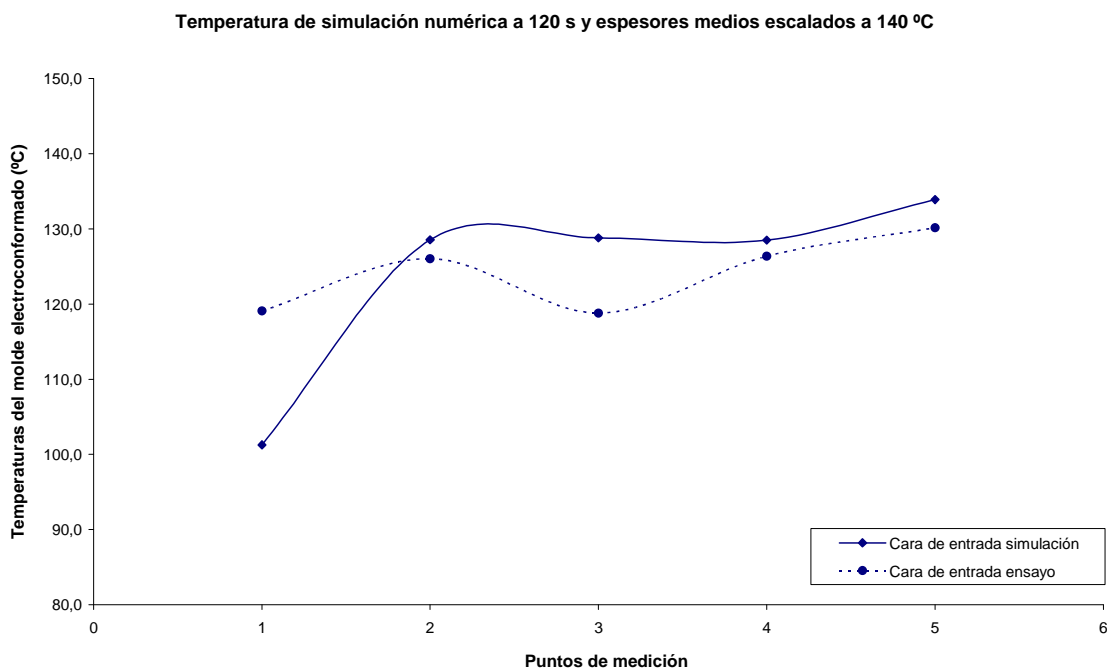


Figura 6.43: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara de entrada del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C.

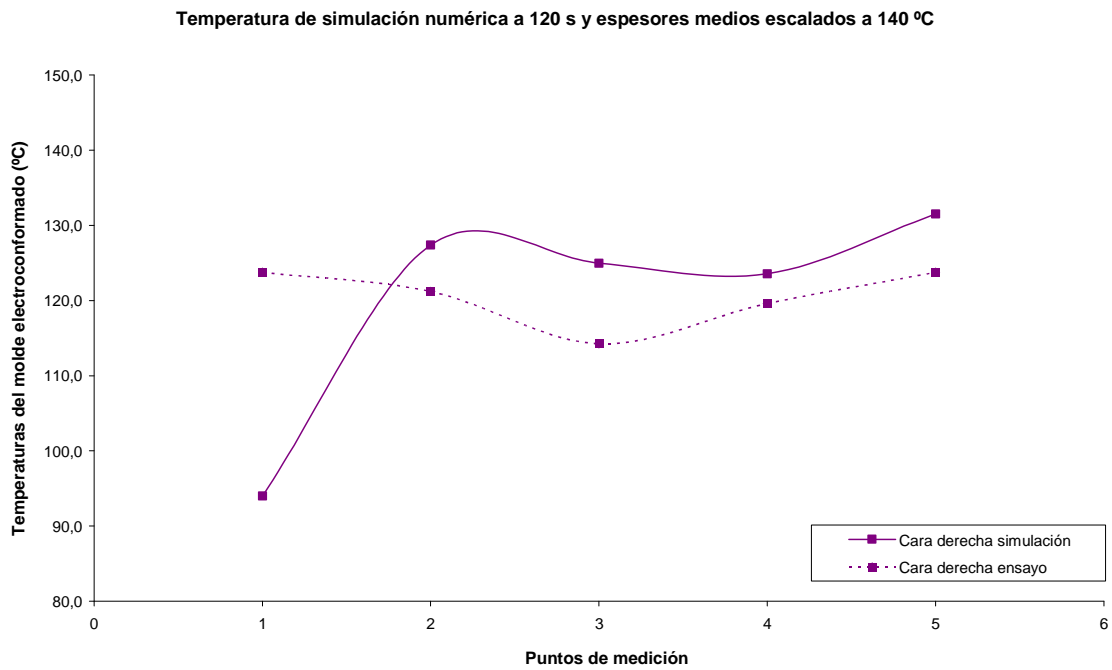


Figura 6.44: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara derecha del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C.

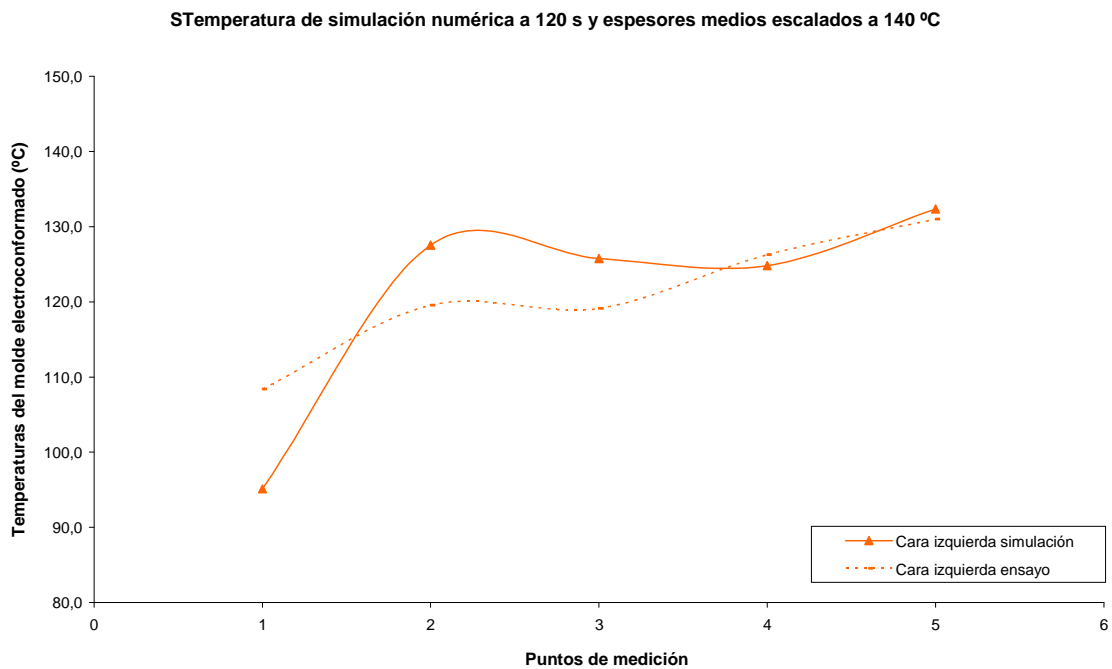


Figura 6.45: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara izquierda del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C.



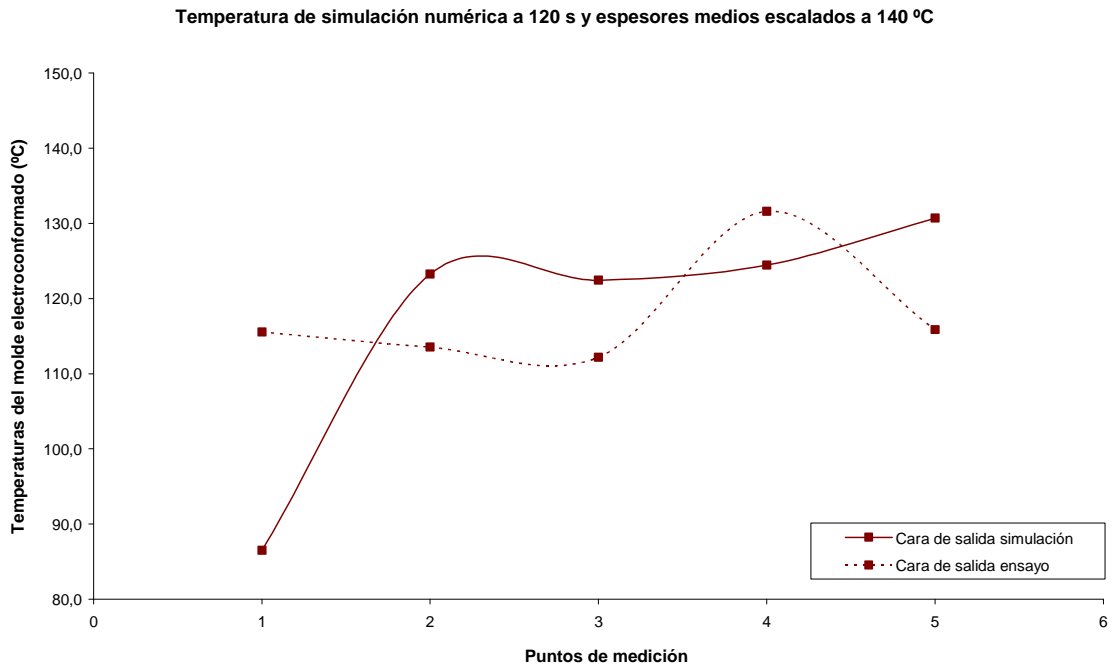


Figura 6.46: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara de salida del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C.

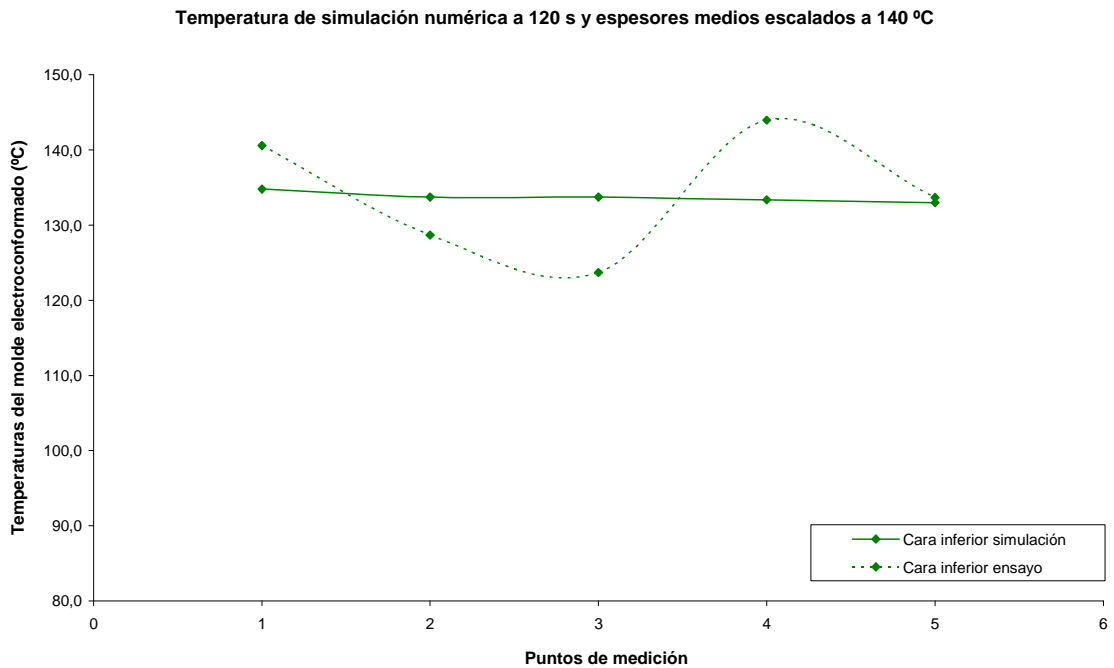


Figura 6.47: Diagrama de temperatura de los puntos calculados en la cara inferior del molde, obtenidos mediante simulación numérica a 120 s, y de espesores escalados obtenidos en las mediciones de piezas. Ambos casos a 140°C.

Con los datos expuestos, no puede establecerse de forma global e inequívoca ningún tipo de correlación entre los datos de espesores medidos en los diferentes puntos y sus valores simulados de temperatura correspondientes.

Según se adelantó anteriormente, la búsqueda de correlaciones de temperaturas simuladas de molde y de espesores finales de pieza se encuentra afectada por innumerables factores que influyen en mayor o menor medida. Además de los propios factores geométricos del molde, el proceso de rotomoldeo o la distribución de temperaturas reales del molde (probablemente muy dispares a las procedentes de cálculo numérico) se encuentra la mezcla de etapas transitorias y permanentes del proceso.

Anteriormente se ha considerado como temperatura de referencia aquella simulada en los diferentes puntos seleccionados para un tiempo del ciclo concreto, a 120 s del inicio del mismo. Probablemente no exista un tiempo de ciclo, ni un intervalo del mismo, que permita correlacionar la temperatura simulada, como único factor, con los espesores de piezas obtenidos. Una posible formulación del espesor debería disponer como variables o factores gran cantidad de parámetros como temperatura de calentamiento, duración de la fase de calentamiento, características del material, parámetros geométricos del molde, y otras variables importantes, que unidas y ponderadas en su medida podrían aportar valores próximos de espesores. Hoy en día solo es posible determinar dichos espesores de forma previa y con ciertas garantías a partir de programas avanzados de simulación de rotomoldeo tales como el RotoSim® [4], aunque únicamente en moldes de calentamiento mediante hornos.

Con el fin de confirmar la imposibilidad de establecer de forma simple y directa dichas correlaciones, se muestra en la tabla 6.16 la gran dispersión y variabilidad de los factores de proporcionalidad directa necesarios para correlacionar las temperaturas simuladas en el molde en un momento puntual del ciclo de 120 s y los espesores reales obtenidos, en ambos casos para temperaturas de aceite de calentamiento de 120 °C, 140 °C y 160 °C.

| Temperatura ensayo y simulación (°C) | Punto de medida | Factores de escala |                |              |                |               |        |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------|----------------|--------------|----------------|---------------|--------|
|                                      |                 | cara de entrada    | cara izquierda | cara derecha | cara de salida | cara inferior | global |
| 120                                  | 1               | 39,03              | 34,03          | 29,80        | 38,10          | 32,91         | 39,03  |
|                                      | 2               | 44,81              | 35,37          | 37,75        | 47,60          | 40,75         | 44,81  |
|                                      | 3               | 44,93              | 36,04          | 41,78        | 49,10          | 41,83         | 44,93  |
|                                      | 4               | 40,23              | 33,44          | 37,92        | 44,04          | 33,66         | 40,23  |
|                                      | 5               | 39,96              | 34,05          | 42,47        | 44,47          | 34,53         | 39,96  |
| 140                                  | 1               | 40,24              | 37,64          | 33,85        | 37,55          | 46,27         | 40,24  |
|                                      | 2               | 48,27              | 45,78          | 46,83        | 54,46          | 50,15         | 48,27  |
|                                      | 3               | 51,31              | 45,30          | 48,75        | 54,74          | 52,17         | 51,31  |
|                                      | 4               | 48,13              | 42,41          | 46,04        | 47,44          | 44,70         | 48,13  |
|                                      | 5               | 48,69              | 43,35          | 47,37        | 56,58          | 48,01         | 48,69  |
| 160                                  | 1               | 47,80              | 46,82          | 44,16        | 59,33          | 56,28         | 47,80  |
|                                      | 2               | 59,93              | 67,13          | 77,01        | 84,99          | 77,91         | 59,93  |
|                                      | 3               | 65,95              | 59,00          | 66,85        | 89,47          | 65,44         | 65,95  |
|                                      | 4               | 62,29              | 56,11          | 59,29        | 83,33          | 58,95         | 62,29  |
|                                      | 5               | 62,48              | 57,31          | 74,89        | 90,83          | 75,04         | 62,48  |

Tabla 6.16: Factores de escala puntuales aplicados a los espesores de cada punto de medición para obtener una correlación exacta temperatura-espesor. Temperaturas de simulación numérica a 120 s.

En la tabla anterior se muestra la disparidad del coeficiente de correlación o factores de escalas aplicados. Dada la variabilidad de estos, resulta imposible obtener un factor global válido para todos los puntos del molde. Según los parámetros estadísticos de la tabla 6.17 y considerando de forma global todos los puntos de cada cara, se obtienen coeficientes de variación (cocientes entre desviaciones estándares y valores medios) muy elevados. La mínima variación entre factores de escala se localiza en los puntos de la cara derecha y correspondiente a los ensayos y simulaciones a 120 °C, donde los factores de escala se sitúan entre valores de 33,44 y 36,04, relativamente aceptables. Sin embargo se alcanzan valores superiores al 20,69% de variación en los puntos de la cara izquierda entre los ensayos y simulaciones a 160 °C. En este caso, la variación de los factores de escala se encuentra entre 59,33 y 90,83, totalmente dispares.

| Temp. ensayo y simul. (°C) | Parámetro estadístico            | cara de entrada | cara izquierda | cara derecha  | cara de salida | cara inferior |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| 120                        | Valor medio                      | 41,79           | 34,59          | 37,95         | 44,66          | 36,74         |
|                            | Desviación estándar              | 2,85            | 1,08           | 5,04          | 4,24           | 4,21          |
|                            | <b>Coefficiente de variación</b> | <b>6,81%</b>    | <b>3,12%</b>   | <b>13,28%</b> | <b>9,49%</b>   | <b>11,47%</b> |
| 140                        | Valor medio                      | 47,33           | 42,90          | 44,57         | 50,15          | 48,26         |
|                            | Desviación estándar              | 4,17            | 3,24           | 6,07          | 7,86           | 2,98          |
|                            | <b>Coefficiente de variación</b> | <b>8,81%</b>    | <b>7,56%</b>   | <b>13,63%</b> | <b>15,67%</b>  | <b>6,18%</b>  |
| 160                        | Valor medio                      | 59,69           | 57,27          | 64,44         | 81,59          | 66,73         |
|                            | Desviación estándar              | 6,98            | 7,26           | 13,33         | 12,82          | 9,56          |
|                            | <b>Coefficiente de variación</b> | <b>11,70%</b>   | <b>12,68%</b>  | <b>20,69%</b> | <b>15,71%</b>  | <b>14,32%</b> |

Tabla 6.17: Parámetros estadísticos de los factores aplicados a los espesores según las caras de medición en el molde. Temperaturas de simulación numérica a 120 s.

Considerando en un segundo caso la variabilidad entre los diferentes puntos medidos para el conjunto de caras, los coeficientes de variación siguen siendo muy elevados, desde el 4,99% hasta el 18,06%. Tabla 6.18.

| Temperatura ensayo y simulación (°C) | Punto de medida | Molde completo |                     |                           |
|--------------------------------------|-----------------|----------------|---------------------|---------------------------|
|                                      |                 | Valor medio    | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
| 120                                  | 1               | 34,77          | 3,81                | 10,95%                    |
|                                      | 2               | 41,26          | 5,00                | 12,13%                    |
|                                      | 3               | 42,74          | 4,79                | 11,21%                    |
|                                      | 4               | 37,86          | 4,50                | 11,89%                    |
|                                      | 5               | 39,10          | 4,67                | 11,95%                    |
| 140                                  | 1               | 39,11          | 4,61                | 11,78%                    |
|                                      | 2               | 49,10          | 3,42                | 6,96%                     |
|                                      | 3               | 50,45          | 3,59                | 7,12%                     |
|                                      | 4               | 45,74          | 2,28                | 4,99%                     |
|                                      | 5               | 48,80          | 4,82                | 9,88%                     |
| 160                                  | 1               | 50,88          | 6,55                | 12,88%                    |
|                                      | 2               | 73,39          | 9,85                | 13,42%                    |
|                                      | 3               | 69,34          | 11,67               | 16,83%                    |
|                                      | 4               | 63,99          | 11,03               | 17,23%                    |
|                                      | 5               | 72,11          | 13,02               | 18,06%                    |

Tabla 6.18: Parámetros estadísticos de los factores aplicados a los espesores según los puntos de medición en el molde. Temperaturas de simulación numérica a 120 s.

Desde una visión general, englobando todos los puntos y caras parametrizados, se obtienen los valores reflejados en la tabla 6,19. Finalmente y de forma global los valores medios obtenidos de los factores de escala no pueden considerarse mínimamente aceptables para la correlación general de temperaturas simuladas y espesores reales obtenidos en las diferentes temperaturas de ensayo.

| Temperatura ensayo y simulación (°C) | Molde completo |                     |                           |
|--------------------------------------|----------------|---------------------|---------------------------|
|                                      | Valor medio    | Desviación estándar | Coefficiente de variación |
| <b>120</b>                           | 39,15          | 5,037               | 12,87%                    |
| <b>140</b>                           | 46,64          | 5,441               | 11,67%                    |
| <b>160</b>                           | 65,94          | 12,88               | 19,45%                    |

Tabla 6.19: Parámetros estadísticos globales de los factores aplicados a los espesores según piezas globales. Temperaturas de simulación numérica a 120 s.

Dado que todo el análisis expuesto anteriormente se encuentra basado en datos de temperaturas simuladas y puntuales para un tiempo de ciclo concreto de 120 s, en la tabla 6.20 se resumen los parámetros estadísticos de los factores necesarios para la correlación de temperaturas simuladas, en diferentes valores temporales del ciclo, y los espesores reales obtenidos en las piezas ensayadas.

| Temperatura ensayo y simulación (°C) | Parámetro estadístico            | Tiempos de ciclo seleccionados |               |               |               |               |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                      |                                  | 30                             | 60            | 90            | 150           | 300           |
| <b>120</b>                           | Valor medio                      | 30,56                          | 34,90         | 37,86         | 39,74         | 40,64         |
|                                      | Desviación estándar              | 3,80                           | 4,38          | 4,85          | 5,11          | 5,11          |
|                                      | <b>Coefficiente de variación</b> | <b>12,44%</b>                  | <b>12,55%</b> | <b>12,80%</b> | <b>12,85%</b> | <b>12,57%</b> |
| <b>140</b>                           | Valor medio                      | 31,81                          | 39,31         | 44,42         | 47,67         | 49,24         |
|                                      | Desviación estándar              | 3,06                           | 4,38          | 5,13          | 5,49          | 4,94          |
|                                      | <b>Coefficiente de variación</b> | <b>9,63%</b>                   | <b>11,13%</b> | <b>11,56%</b> | <b>11,52%</b> | <b>10,04%</b> |
| <b>160</b>                           | Valor medio                      | 42,03                          | 54,12         | 62,33         | 67,59         | 70,12         |
|                                      | Desviación estándar              | 6,47                           | 9,82          | 11,82         | 13,01         | 12,83         |
|                                      | <b>Coefficiente de variación</b> | <b>15,40%</b>                  | <b>18,14%</b> | <b>18,96%</b> | <b>19,25%</b> | <b>18,29%</b> |

Tabla 6.20: Parámetros estadísticos de los factores de escala necesarios para la correlación temperatura-espesores de forma global y según los tiempos de ciclo seleccionados para la obtención de los valores de temperaturas.

De forma similar a los resultados analizados para un tiempo de ciclo concreto de 120 s, en los diferentes tiempos de ciclo seleccionados se obtienen valores de temperatura que producen factores de escala muy dispersos. Dicho esto, se comprueba que la determinación de las temperaturas simuladas, y concretamente en un momento temporal concreto del proceso de calentamiento, no permite más que un análisis global y cualitativo de los efectos que producen las distintas temperaturas globales en las piezas finalmente fabricadas. De esta manera es posible determinar, a partir de los procesos de simulación, comportamientos reales del molde y de los procesos internos de rotomoldeo de forma global para diferentes caras o el conjunto de la pieza. Sin embargo, resulta complicado prever espesores puntuales o medios a partir de dichas simulaciones y con garantías de precisión, con lo que se requerirá, al igual que en los procesos convencionales, ensayos experimentales y ajustes previos antes de la fabricación definitiva de piezas.

## **6.6. ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS PIEZAS ROTOMOLDEADAS OBTENIDAS**

Como finalización del presente capítulo de exposición y análisis de resultados, se ha estimado oportuna la muestra de imágenes que permitan complementar los resultados expuestos anteriormente así como ilustrar los efectos que las diferentes configuraciones de temperaturas y tiempos de ciclo, fundamentalmente, producen en las piezas obtenidas. Dichos efectos corresponden básicamente a la rugosidad y eliminación de burbujas del interior de las piezas rotomoldeadas los cuales son fácilmente identificables sin necesidad de recurrir a equipamiento específico de investigación.

Si bien es totalmente posible realizar un análisis en profundidad mediante el uso de herramientas específicas tales como el microscopio electrónico o rugosímetros digitales, para la identificación y valoración cualitativa de los efectos que se pretenden mostrar es suficiente el uso de cámaras fotográficas digitales de alta resolución. Como sucesivas líneas de investigación en esta área se plantean la mejora de las prestaciones de los moldes y máquina de ensayo experimental desarrollados así como la completa caracterización de las piezas rotomoldeadas y su contraste con los criterios internacionales de prestaciones mecánicas y acabados según los campos de aplicación industriales que dicha tecnología pretenda abarcar.

La totalidad de las piezas rotomoldeadas en los ensayos seleccionados para el análisis de sus resultados disponen de una consistencia y cohesión más que aceptables considerando las bajas temperaturas a las que se produjeron los ensayos; figuras 6.48. No

obstante, en ensayos preeliminares y de ajustes de la máquina de ensayo se han producido piezas inservibles o con malformaciones como las mostradas en las figuras 6.49.

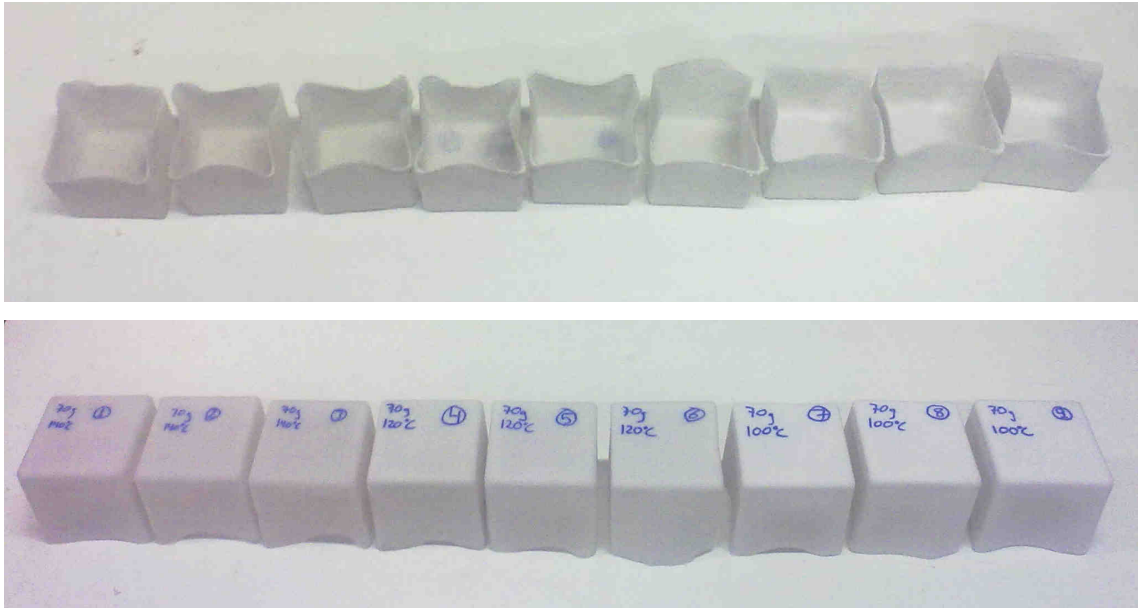


Figura 6.48: Imágenes superior e inferior de las 9 primeras piezas obtenidas.



Figura 6.49: Imágenes de piezas obtenidas en diferentes ensayos preliminares.

### 6.6.1. Efectos producidos por incremento de tiempo de ciclo

Uno de los aspectos fácilmente identificables en las piezas obtenidas son los producidos por el incremento del tiempo de ciclo, concretamente por el incremento de la duración de la fase de calentamiento.

El siguiente grupo de imágenes, correspondiente a las figuras 6.50, 6.51, 6.52 y 6.53 muestran en detalle ampliado las caras inferiores de las piezas seleccionadas en los ensayos a 140 °C con tiempos de calentamiento de 5, 15, 25 y 40 minutos. Estas corresponden a los ensayos número 19, 18, 20 y 21 respectivamente, con carga de material de 70 g y granulometría general.



Figura 6.50: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 19, a 140 °C y 5 minutos de calentamiento.



Figura 6.51: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 18, a 140 °C y 15 minutos de calentamiento.

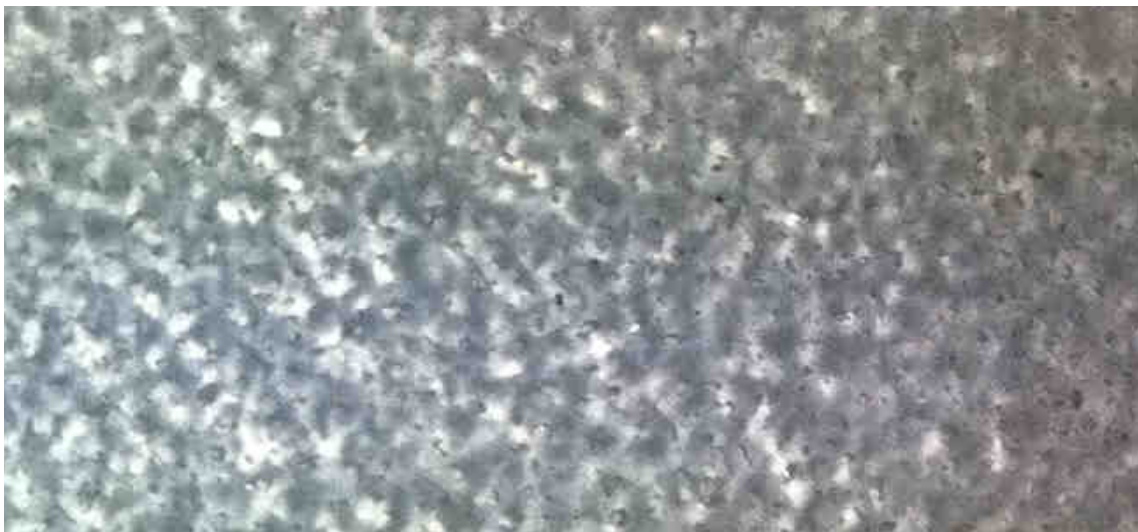


Figura 6.52: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 20, a 140 °C y 25 minutos de calentamiento.





Figura 6.53: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 21, a 140 °C y 40 minutos de calentamiento.

El ensayo número 19, con tan sólo 5 minutos de calentamiento a 140 °C produce una fluidificación y densificación mínima, existiendo gran cantidad de material mínimamente adherido a la pieza y grandes espacios entre granos de material, lo cual produce grandes rugosidades. Esto produce una imagen amorfa del material solidificado.

El aumento del tiempo de calentamiento, también a 140 °C, hasta valores de 15 minutos, según el ensayo número 18, reduce considerablemente los problemas anteriores produciendo mayores cotas de fluidificación y densificación en el material. Los gránulos de material en polvo se incrementan pero al ser visibles indican una baja consolidación del material entre sí. La pieza no se ha conformado de manera total y completa, siendo heterogénea su estructura interior.

La imagen 6.52 correspondiente al ensayo 20 con 25 minutos de calentamiento muestra un siguiente paso en el proceso de conformación de la pieza al no identificarse los gránulos de material. En esta ocasión, se ha obtenido una pieza con gran homogeneidad y se identifica en ella por primera vez y claramente burbujas interiores de aire generadas durante la densificación del material.

Finalmente, el ensayo número 21 con 45 minutos de calentamiento muestra una menor rugosidad que en ensayo anterior, una mayor homogeneidad y transparencia de la pieza aunque continúan existiendo grandes cantidades de burbujas de aire aunque más próximas a la superficie de la pieza.

Como conclusión parcial se ha observado una concordancia entre los resultados numéricos expuestos en apartados anteriores con las características físicas de

densificación y solidificación de las piezas generadas. Los incrementos paulatinos de temperatura producen mayores cotas de homogeneizaciones, eliminación de aire y reducciones de rugosidades que son fácilmente reconocibles en las piezas generadas. Además cabe destacar que estas diferencias son más acusadas a menor temperatura de ensayo, como es el caso de las imágenes mostradas a 140 °C, las cuales no son tan evidentes como las correspondientes a los ensayos a 160 °C.

### 6.6.2. Efectos producidos por incremento de temperatura

Las diferencias entre las piezas analizadas en el apartado anterior también son obtenidas de forma muy similar variando la temperatura del ensayo, y no la duración de la fase de calentamiento.



Figura 6.54: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 18, a 140 °C y 15 minutos de calentamiento. Imagen análoga a la figura 6.51.



Figura 6.55: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 23, a 160 °C y 15 minutos de calentamiento.

Los ensayos 18 y 23, correspondientes a las figuras 6.54 y 6.55, han sido realizados a diferentes temperaturas, 140 °C y 160 °C respectivamente, aunque manteniendo la duración de la fase de calentamiento invariable, 15 minutos. El efecto producido es equivalente al obtenido en los ensayos a 140 °C pero con tiempos de calentamiento de 25 minutos, por ejemplo el ensayo número 20. Esto indica la importancia del incremento de la temperatura, de tal forma que un incremento de 20 °C podría suponer, aunque de forma imprecisa, reducciones del tiempo de calentamiento en torno al 40%.

Comparando los ensayos con mayor duración de calentamiento (40 minutos) a diferentes temperaturas, tales como los ensayos 21 y 25, a 140 °C y 160 °C respectivamente, se obtienen diferencias de rugosidades de gran importantes, así como una disminución de la cantidad y tamaño de las burbujas de aire. Dado que la duración de la fase de calentamiento en ambos ensayos es idéntica, queda de manifiesto la enorme eficacia del incremento de temperatura en cuanto a acabados y calidades de piezas.



Figura 6.56: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 21, a 140 °C y 40 minutos de calentamiento. Imagen análoga a la figura 6.53.



Figura 6.57: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de pieza número 25, a 160 °C y 40 minutos de calentamiento.

Las imágenes correspondientes a la figura 6.58 inciden en la importancia de la temperatura de calentamiento. En las mismas pueden observarse una mejora de la rugosidad y minimización de las burbujas de aire interior en el caso de un mayor tiempo de calentamiento (imagen derecha), aunque dicha mejora en menor grado comparativamente entre piezas a 160 °C que a temperaturas inferiores, como las correspondientes a las figuras 6.52 y 6.53 a 140 °C donde las diferencias son más relevantes.

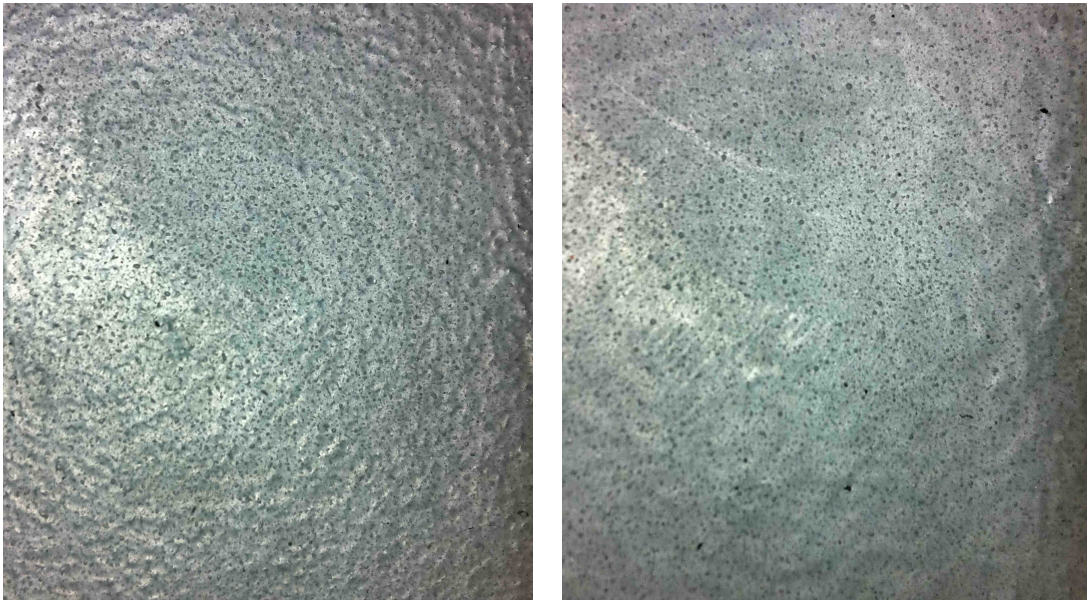


Figura 6.58: Imagen a tamaño real de cara inferior o fondo de piezas número 24 a 160 °C y 25 minutos de calentamiento (izquierda) y pieza número 25, a 160 °C y 40 minutos de calentamiento (derecha).

### 6.6.3. Efectos asociados a la granulometría y el peso del material

La modificación de la granulometría del polímero o la carga de material producen modificaciones también analizadas en los apartados anteriores en función de las diferentes curvas de temperatura obtenidas.

Dichos efectos también son perfectamente visibles en las piezas obtenidas. Tal es el caso de la figura 6.59 que muestra de forma ampliada la cara inferior de la pieza obtenida en el ensayo número 27, correspondiente a 140 °C, 15 minutos de calentamiento, 70 g de material pero con material en polvo con tamaño de grano de 125 micras.



Figura 6.59: Imagen ampliada de cara inferior o fondo de piezas número 27 a 140 °C y 15 minutos de calentamiento.

La incorporación como material de carga de polímero EVA con grano en polvo de 125 micras produce unos efectos notables, estos son una reducción significativa de la rugosidad, gran homogeneidad de la pieza, buena fluidificación e incluso densificación elevada, comparable con los ensayos a 160 °C con máxima duración de calentamiento, 40 minutos.

Un bajo micraje puede llegar a producir problemas de baja fluidez, entre otros, [2], sin embargo y dado su menor tamaño, permiten una menor acumulación de aire intergranular, lo cual beneficia en gran medida la obtención de buenas calidades de piezas y amplios rangos de densificación. Por lo tanto, debe tomarse vital importancia en la selección de una granulometría adecuada según las aplicaciones y cualidades que se requieran a las piezas en los procesos de rotomoldeo.

En cuanto a la carga de material, resulta menos controlable dicho factor pues quedará determinado según los espesores de pieza y tamaños de las mismas que se requiera. Por otra parte, resulta evidente la importancia de dicha variable pues mayores cantidades de material requerirán mayores tiempos y/o temperaturas de proceso para producir los procesos de solidificación y densificación en iguales condiciones que piezas de menores magnitudes o cargas de material.



## *Capítulo VII*

**ESTUDIO ENERGÉTICO COMPARATIVO ENTRE EL PROCESO  
DESARROLLADO Y PROCESOS CONVENCIONALES DE  
ROTOMOLDEO**





## **7. ESTUDIO ENERGÉTICO COMPARATIVO ENTRE EL PROCESO DESARROLLADO Y PROCESOS CONVENCIONALES DE ROTOMOLDEO**

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

Los procesos convencionales de rotomoldeo, y por tanto, los más generalizados a nivel industrial, se encuentran basados en el calentamiento del molde mediante la convección forzada de aire a alta temperatura. Dichos procesos están caracterizados por un excesivo consumo energético, y consecuentemente, una baja eficiencia energética. Estos aspectos son los precursores de algunas de las actuales líneas de investigación en el campo del moldeo rotacional.

Michael J. Wright et al. [1] han determinado de forma aproximada la distribución de la energía aportada en estos procesos convencionales de rotomoldeo, afirmando que tan sólo el 1% de la energía es finalmente absorbida por el polímero durante el proceso. Entre otros datos destacan la energía absorbida por los brazos soportes de los moldes, hasta un 49%, o la energía perdida mediante los gases de combustión, un 25%. Este estudio, así como los datos reales de máquinas industriales, avala la necesidad de la investigación y desarrollo de nuevos moldes y procesos de rotomoldeo, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

En el presente capítulo, y a partir de los datos y análisis expuestos en los capítulos anteriores, se estudiará, una vez más de forma comparativa, los procesos de molde rotacional convencionales y el proceso de rotomoldeo mediante el molde prototipo desarrollado en este trabajo de investigación. Dicho análisis se encuentra enfocado fundamentalmente desde el punto de vista energético y a partir de un conjunto de condiciones de ensayo análogas que permitan el contraste de datos.

De forma inicial se expondrán los datos y condiciones básicas de los ensayos y/o datos disponibles, establecidos para cada proceso de rotomoldeo objeto de estudio, con el fin de validar los mismos así como su completa y correcta idoneidad para el estudio que se ha llevado a cabo.

## 7.2. ESTABLECIMIENTO DE BASE COMPARATIVA

La comparación entre dos procesos cualesquiera debe basarse en un conjunto de variables que diferencien ambos procesos entre sí, pero más fundamental aún, deben establecerse un conjunto de condiciones estándares, iguales en todos los casos de estudio, que permitan garantizar que las variaciones producidas se deban única y exclusivamente a las variables alterables.

En los procesos de molde rotacional, son diversas las formas de establecer una base común o comparativa entre los diferentes procesos de ensayo, que se cumplan y mantenga en todos los casos, y que permitan comparar el resto de parámetros variables. Podrían establecerse como base comparativa las características de las piezas rotomoldeadas de forma que se ajustasen todos los ensayos y procesos a comparar hasta obtener en todos los casos piezas equivalentes, en cuanto a espesores, acabados, resistencias, ... Esto permitiría analizar todos los parámetros de los diferentes procesos en estudio en función de dicho objetivo común.

Otra posibilidad de análisis comparativo podría basarse en ensayar diferentes procesos de rotomoldeo que produjesen el mismo consumo energético, valorando el resto de resultados (temperaturas máximas obtenidas, tiempos de ciclo necesarios, características de piezas rotomoldeadas,...)

Resulta de elevado interés analizar la eficiencia energética, como variable dependiente del proceso de rotomoldeo que se trate, de forma que pueda establecerse con claridad la mejora de eficiencia energética, entre otros aspectos, que es posible obtener con el molde prototipo desarrollado.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha establecido como base comparativa en todos los procesos que se van a analizar a continuación, el siguiente conjunto de parámetros globales:

- Las temperaturas de calentamiento, con independencia del tipo de fluido térmico, corresponderán a 140 °C y a 300 °C en dos casos posibles.
- Se establece un molde estándar, en forma de cubo, con todas sus caras activas para la generación de pieza, de dimensiones interiores 100x100x100 mm.
- El tiempo de ciclo general se establece en 1200 s, de los cuales los primeros 900 s corresponden a la etapa de calentamiento, aunque en algunos procesos de cálculo se reducirán el tiempo de ciclo global para adecuarse a los datos experimentales disponibles de otras fuentes.

- En todos los casos se considera el proceso en vacío, sin carga de material polimérico.

El conjunto de parámetros fundamentales que serán variables en función de la tecnología de rotomoldeo que se trate serán los siguientes:

- Tipo de calentamiento: convección de aire forzado o convección mediante fluido térmico.
- Flujos volumétricos y/o másicos de convección.
- Material y espesores de moldes según el proceso de rotomoldeo.

Los datos y resultados principales seleccionados para el análisis comparativo de los diferentes procesos corresponden a los siguientes:

- Temperatura media de una de las caras laterales de los moldes
- Temperaturas del aire en el punto central interior de los moldes.
- Consumos energéticos principales asociados a los procesos globales de rotomoldeo.

Según las condiciones básicas de comparación establecidas, se desprende que los diferentes procesos, en igualdad de condiciones de geometría de molde, temperaturas de calentamiento de proceso y tiempos de ciclo deben desarrollar el proceso completo de rotomoldeo, produciendo como resultados diferentes eficiencias energéticas y de generación de piezas rotomoldeadas.

### **7.3. CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS CONVENCIONALES DE ROTOMOLDEO MEDIANTE HORNOS**

#### **7.3.1. Datos disponibles del proceso convencional de rotomoldeo mediante hornos**

La tecnología convencional de rotomoldeo seleccionada para el presente estudio comparativo, y sus correspondientes datos, corresponde a la de tipo “carrusel de brazo independiente”. Para ello se ha obtenido un conjunto de datos experimentales correspondientes a la máquina RotoSpeed™, modelo RS-160 de Ferry Industries, INC [2], a partir diferentes fuentes, fundamentalmente del centro de investigación de la Universidad de Queen’s, Belfast [3].

La máquina RS-160, basada en la tecnología convencional de rotomoldeo de tipo carrusel, se fundamenta en el calentamiento del molde mediante el uso de un horno de quemadores de gas propano licuado, aunque también es posible el uso de gas natural o fuel oil.

Las características principales de dicha máquina se detallan en la tabla 7.1:

| <b>Características principales RS-160</b>                           |                           |
|---|---------------------------|
| <b>Brazos/carros</b>  |                           |
| • Número de brazos/carros.....                                      | 1 a 4                     |
| • Diámetro máximo de molde .....                                    | 1.625 mm                  |
| • Velocidad eje menor (plato) .....                                 | 2.1 – 16 rpm              |
| • Velocidad eje mayor (brazo) .....                                 | 1.6 – 12 rpm              |
| <b>Horno</b>  |                           |
| • Energía calorífica máxima.....                                    | 541.810 kCal/h            |
| • Consumo máximo de gas propano licuado .....                       | 88,73 l/h                 |
| • Consumo máximo de gas natural.....                                | 60,89 m <sup>3</sup> /h   |
| • Consumo máximo de fuel oil .....                                  | 54,25 l/h                 |
| • Temperatura máxima del horno .....                                | 455 °C                    |
| • Dimensiones del horno aproximadas .....                           | 2,00 m x 2,00 m x 2,00 m  |
| <b>Motores</b>  |                           |
| • Flujo volumétrico máximo de soplante de circulación de aire ..... | 375,2 m <sup>3</sup> /min |
| • Potencia instalada de soplante de circulación de aire .....       | 7,46 kW                   |
| • Flujo volumétrico máximo de soplante de quemador.....             | 10,9 m <sup>3</sup> /min  |
| • Potencia instalada de soplante de quemador.....                   | 0,56 kW                   |
| • Flujo volumétrico máximo de soplante de escape .....              | 10,9 m <sup>3</sup> /min  |
| • Potencia instalada de soplante de escape .....                    | 0,373 kW                  |
| • Operación de puerta .....   | 0,373 kW                  |
| • Flujo volumétrico máximo de soplante de enfriamiento .....        | 311,5 m <sup>3</sup> /min |
| • Potencia instalada de soplante de enfriamiento .....              | 1,12 kW                   |
| • Flujo volumétrico máximo de soplante de escape .....              | 226,5 m <sup>3</sup> /min |
| • Potencia instalada de soplante de escape .....                    | 1,12 kW                   |

Tabla 7.1. Características principales de la máquina de moldeo rotacional RS-160, cortesía de Ferry Industries, INC.

Como datos específicos del proceso de rotomoldeo efectuado en dicha máquina se exponen, en la figura 7.1, las curvas de temperatura del aire exterior del molde (temperatura de calentamiento y enfriamiento) y la temperatura del aire interior del molde, obtenidas todas en ensayos estándares.

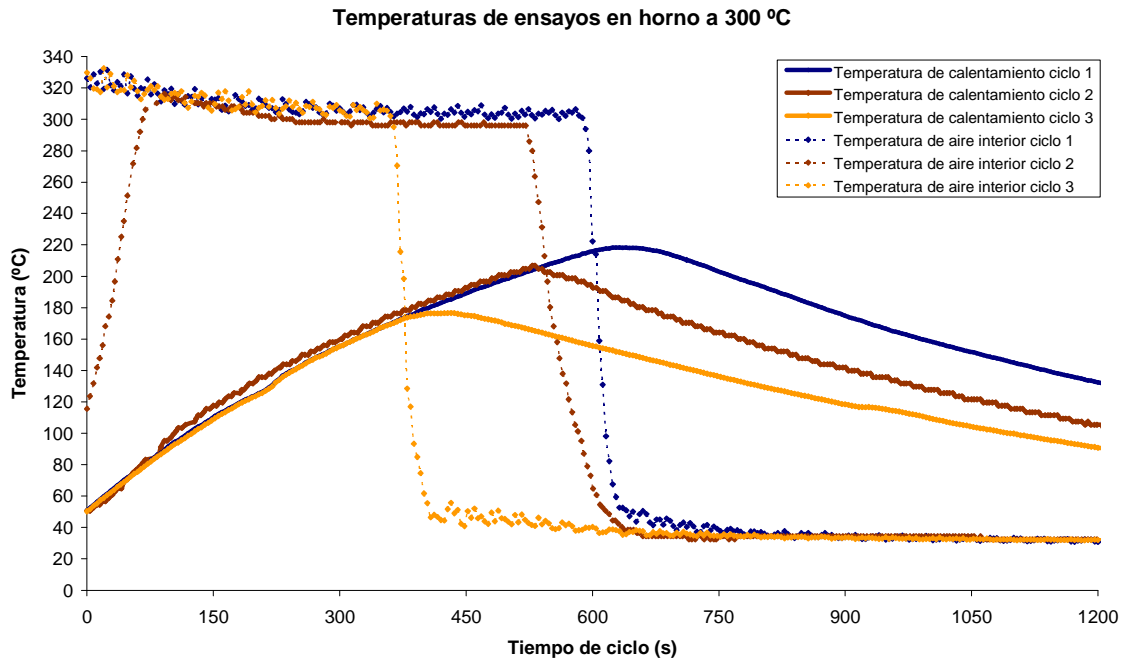


Figura 7.1. Curvas experimentales de ensayo sin carga de material en máquina de moldeo rotacional RS-160 con temperatura media aproximada de calentamiento de 300 °C. Cortesía de Queen's University Belfast.

Los datos experimentales anteriormente expuestos disponen de las siguientes configuraciones generales de ensayo:

- Temperatura media máxima de calentamiento de 300 °C.
- Molde cúbico con dimensiones interiores de 200 mm x 200 mm x 200 mm.
- Material de molde correspondiente a aluminio, con espesores en torno a 8 y 10 mm.
- Ensayos en vacío, sin carga polimérica.
- Procesos de calentamiento y enfriamiento en cámaras independientes.
- Enfriamiento mediante pulverización de agua.
- Tiempos de ciclo según temperatura máxima de consigna deseada: 180 °C, 200 °C y 220 °C para ciclos 1, 2 y 3 respectivamente.

Respecto a las condiciones de consumos principales, se establecen a partir de los datos disponibles y de las consideraciones de ensayos similares desarrollados en la Universidad de Queen's [1], los siguientes parámetros generales de consumo:

- Consumo medio de gas propano para sostenimiento de 300 °C de 4,08 m<sup>3</sup>/h.
- Consumo medio de recirculación de aire para proceso de convección de calentamiento a 6 m<sup>3</sup>/h (360 m<sup>3</sup>/min). Aproximadamente 7,16 kW.
- Consumo medio de soplante de escape de 0,373 kW.

- Consumo medio de recirculación de aire para proceso de convección de enfriamiento a 5 m<sup>3</sup>/h (300 m<sup>3</sup>/min). Aproximadamente 1,08 kW.
- Consumo medio de soplante de escape en enfriamiento de 1,12 kW.

Con el motivo de simplificar el análisis de gastos energéticos asociados a los procesos convencionales de rotomoldeo no se han valorado los consumos energéticos que por su reducido valor han sido despreciados. Estos son los consumos asociados a los procesos de extracción de aire de gases de escape del quemador y de la zona de enfriamiento, flujos de aire de alimentación al quemador, consumos de manipulación de puertas y accesorios, así como elementos tales como agua de enfriamiento, aire comprimido, y otros.

Por otra parte, y para el posterior estudio energético comparativo entre procesos, se ha prescindido de los consumos asociados a los elementos que de forma general deberán ser similares en cualquier tipo de procesos de rotomoldeo. Estos elementos corresponden fundamentalmente a los accionamientos de los brazos para los movimientos giratorios de los moldes, los accesorios de control así como sistemas secundarios de mínimo consumo.

Finalmente destacar que los datos corresponden a consumos estables de forma permanente, sin considerar los procesos iniciales y transitorios de arranque del horno desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de consigna.

### **7.3.2. Modelización y simulación numérica del proceso convencional de rotomoldeo disponible**

Los datos disponibles de los procesos convencionales de rotomoldeo mediante horno corresponden a un molde de medidas superiores a los del molde prototipo ensayado así como a temperaturas de proceso muy diferentes. Por dicho motivo no es posible comparar en condiciones similares los datos de temperaturas obtenidas así como los consumos energéticos asociados.

Como solución aproximada al problema planteado por la diferencia de escala geométrica y de temperaturas entre los diferentes datos disponibles se ha optado por la modelización y simulación numérica de los procesos de rotomoldeo convencionales por horno permitiendo así obtener valores teóricos aproximados del proceso de rotomoldeo en horno a 140 °C y para un molde de dimensiones idénticas al prototipo.

Para obtener otro criterio y base comparativa, igualmente se extrapolarán los datos de los resultados experimentales del molde prototipo desde 140 °C hasta 300 °C manteniendo la configuración del molde de 100 mm de lado, mediante los procesos de simulación numérica ampliamente utilizados y expuestos en el presente trabajo de investigación.

Por tanto, los datos experimentales disponibles de rotomoldeo en horno a 300 °C con molde cúbico de 200 mm de longitud interior permitirán simular y validar los resultados numéricos resultantes para escalar el proceso hasta otras dos configuraciones posibles, para un molde de 100 mm de longitud, y a las temperaturas de 140 °C y 300 °C. Igualmente se realizará el mismo proceso a la inversa con los resultados del molde prototipo, extrapolando y validando los resultados simulados hasta 300 °C y en molde cúbico de 100 mm. Estos procesos permitirán, a través de dos vías, analizar comparativamente los procesos estudiados.

Las simulaciones se han realizado según la metodología y descripciones realizadas en el capítulo 3. Las condiciones reales de la máquina RS-160 han sido modelizadas y simplificadas con volúmenes de horno similares, aunque no se han considerado la afecciones que producen las aberturas existentes de gases de escape, aberturas del horno necesarias para la colocación del brazo soporte del molde, afecciones del propio brazo soporte, así como otros elementos que dificultarían en gran medida los procesos de simulación numérica. Por otro lado, se han respetado las características reales del molde y las de los fluidos intervinientes en el proceso y otros aspectos.

Según las condiciones anteriores, y considerando los parámetros fundamentales de temperatura de calentamiento de 300 °C y el flujo principal de convección de 6 m<sup>3</sup>/h, las simulaciones numéricas reflejan los resultados expuestos en la figura 7.2, existiendo una gran correlación entre los datos experimentales y los obtenidos mediante simulación, fundamentalmente en las fases de calentamiento. En cuanto a la fase de enfriamiento, en los ensayos reales se refuerza la convección de aire a temperatura ambiente con pulverización de agua, de ahí las diferencias entre curvas, ya que en las simulaciones numéricas no se ha podido modelar dicho efecto.

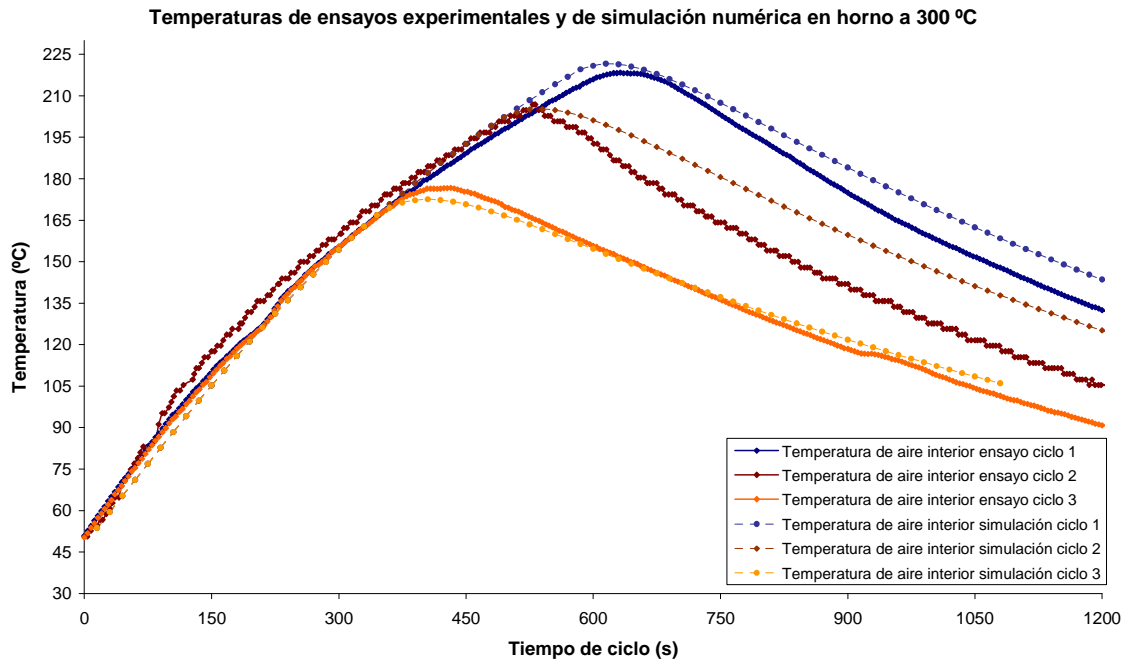


Figura 7.2. Curvas experimentales de ensayo sin carga de material y simulaciones numéricas, ambos casos de rotomoldeo convencional mediante horno.

Los procesos de simulación, y los resultados obtenidos a través de ellos, se consideran pues validados, tras su contraste con los datos experimentales, permitiendo obtener, mediante nuevas simulaciones numéricas, datos aproximados en otras condiciones de temperaturas y tamaños de moldes, manteniendo el resto de parámetros del horno invariables.

#### 7.4. CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS CONVENCIONALES DE ROTOMOLDEO MEDIANTE FLUIDOS TÉRMICOS

Los procesos de rotomoldeo actualmente existentes que utilizan aceite térmico, a los cuales se les ha denominado procesos convencionales mediante fluidos térmicos, se caracterizan, tal y como se ha expresado en capítulos anteriores, por el uso de moldes análogos a los empleados en rotomoldeo mediante hornos así como por el uso de canales externos a dichos moldes por los que discurre el fluido térmico.

Sobre estos procesos existen diversas investigaciones, tales como las realizadas por *Michael J Wright* y *Roy Crawford* [4] o *Jared A. Sunday* [5] donde se pone de manifiesto las ventajas de ahorro energético y de tiempo de ciclo obtenidas por el uso de fluidos térmicos introducidos en el molde. Sin embargo, la complejidad y el coste de los moldes sigue siendo una limitación importante de estos desarrollos.



Por otra parte, aún existiendo fabricantes que desarrollan y comercializan máquinas de rotomoldeo convencionales de calentamiento por aceite, como el fabricante Persico spA [6], los datos disponibles de este tipo de procesos son muy limitados. Por tanto, la caracterización de estos procesos convencionales mediante empíricos y en las condiciones de base establecidas anteriormente resulta compleja, fundamentalmente para el estudio comparativo que se desea realizar.

Por tanto, los análisis de estas tecnologías se continuarán realizando mediante los análisis numéricos desarrollados en este trabajo de investigación, teniendo en cuenta que la fiabilidad de los mismos ha sido contrastada con datos empíricos en diferentes condiciones y procesos quedando totalmente validados.

La modelización y simulación numérica de esta tecnología, necesarias en cuanto a la obtención de resultados para el estudio comparativo entre tecnologías, corresponderá a la desarrollada en el apartado 3.6 “Análisis de molde de rotomoldeo de aceite convencional” del capítulo III y según los parámetros básicos establecidos en el apartado 7.2 del presente capítulo. Cabe recordarse que el molde convencional de aceite térmico se configura con dos canales exteriores al molde, el cuál se encuentra conformado en aluminio con un espesor de 5 mm.

## **7.5. CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS DE ROTOMOLDEO MEDIANTE MOLDE PROTOTIPO**

### **7.5.1. Datos disponibles del proceso de rotomoldeo mediante molde prototipo**

Los procesos de rotomoldeo realizados mediante la máquina de ensayo experimental y el molde prototipo desarrollados, ya detallados en capítulos anteriores, han requerido los siguientes consumos energéticos principales:

- Consumo eléctrico medio de 0,65 kW del baño termostático, para el sostenimiento de 140 °C como temperatura máxima de calentamiento.
- Consumo eléctrico medio del motor de accionamiento de la bomba de recirculación de aceite de 0,38 kW/h.

Estos datos corresponden a los valores medios obtenidos a partir del conjunto de ensayos realizados para el molde prototipo, de dimensiones interiores de 100 mm x 100 mm x 100 mm, temperaturas de proceso de calentamiento de 140 °C, y según las restantes características establecidas en el apartado 6.2 y sucesivos del capítulo VI.

### **7.5.2. Modelización y simulación numérica del proceso de rotomoldeo mediante molde prototipo**

El molde prototipo desarrollado ha quedado suficientemente caracterizado tanto mediante los procesos de simulación numérica como a partir de los resultados experimentales obtenidos en los ensayos realizados. Sin embargo, todas estas consideraciones quedan limitadas a las temperaturas máximas a las que ha sido posible exponer el proceso, así como a la geometría del molde. Parámetros ambos que no corresponden con los datos reales disponibles, por ejemplo, de los procesos convencionales de calentamiento mediante convección de aire en hornos.

Por otra parte, los ensayos experimentales del molde prototipo dispone de efectos reales de pérdidas de calor que no serán considerados o modelados en los otros procesos de rotomoldeo a estudiar dada su complejidad (pérdidas de calor en brazos soporte, partes externas del horno, fugas de aire caliente,...), por lo que estos procesos estarán en ventaja respecto a los resultados experimentales del prototipo.

Por todo ello, los procesos de modelización y simulación numéricos vuelven a jugar un papel fundamental al permitir extrapolar los datos obtenidos a otras condiciones diferentes, tales como mayores temperaturas de proceso o geometrías de molde diferentes, así como establecer en todos los casos las mismas condiciones iniciales y condiciones externas, concretamente condiciones adiabáticas, entre otras.

### **7.6. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS, PARA MOLDES CÚBICOS DE 100 MM DE LADO Y 140 °C DE TEMPERATURA MÁXIMA DE CALENTAMIENTO**

Tras la modelización y simulación numérica de todas las tecnologías que se pretende estudiar, y bajo las mismas condiciones básicas, se obtiene un conjunto de resultados que permiten el análisis comparativo entre sí. Así pues, las figuras 7.3 y 7.4 muestran las curvas de los parámetros principales de los 3 procesos establecidos, concretamente las temperaturas de la cara frontal del molde y las temperaturas interiores del molde, en cada caso estudiado.

Los resultados mostrados en la primera imagen identifican inicialmente una mayor velocidad de la fase de calentamiento del molde en el caso del molde prototipo desarrollado, a diferencia de los otros dos procesos de rotomoldeo. Este efecto resulta similar analizando la temperatura interior del aire de los moldes, aunque en menor medida.

En cuanto al proceso de enfriamiento, y sin considerar la pulverización de agua fácilmente realizado en los procesos de convección de aire, el molde prototipo continúa disponiendo de una mayor ventaja respecto al resto, así como del molde de canales exteriores respecto al de horno.

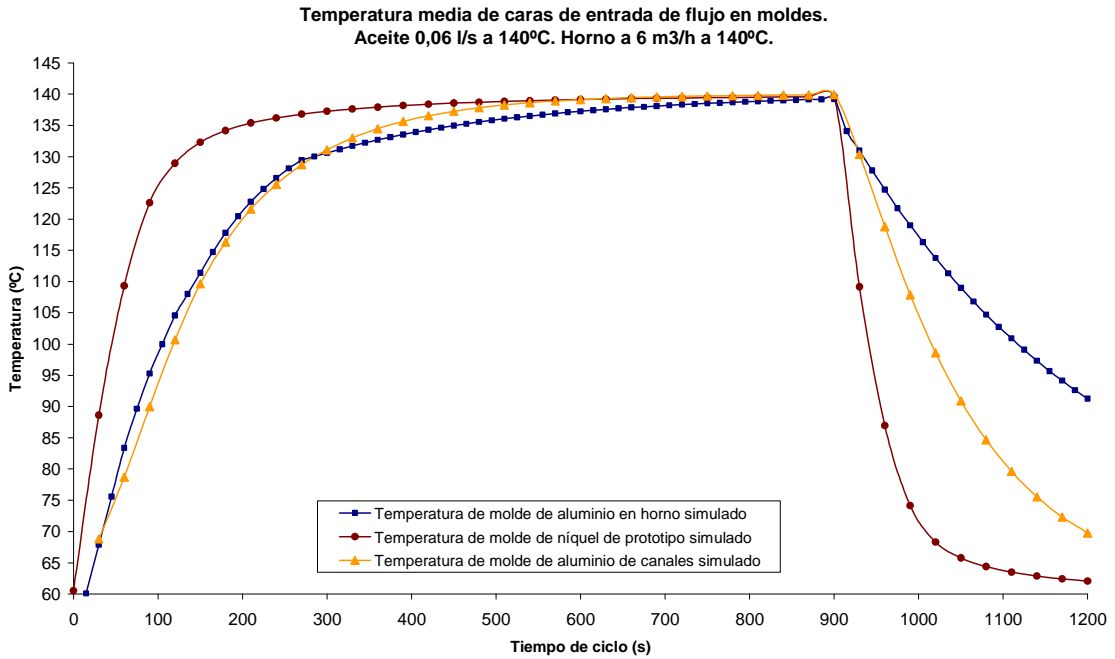


Figura 7.3. Curvas de temperatura media de la cara frontal del molde obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio.

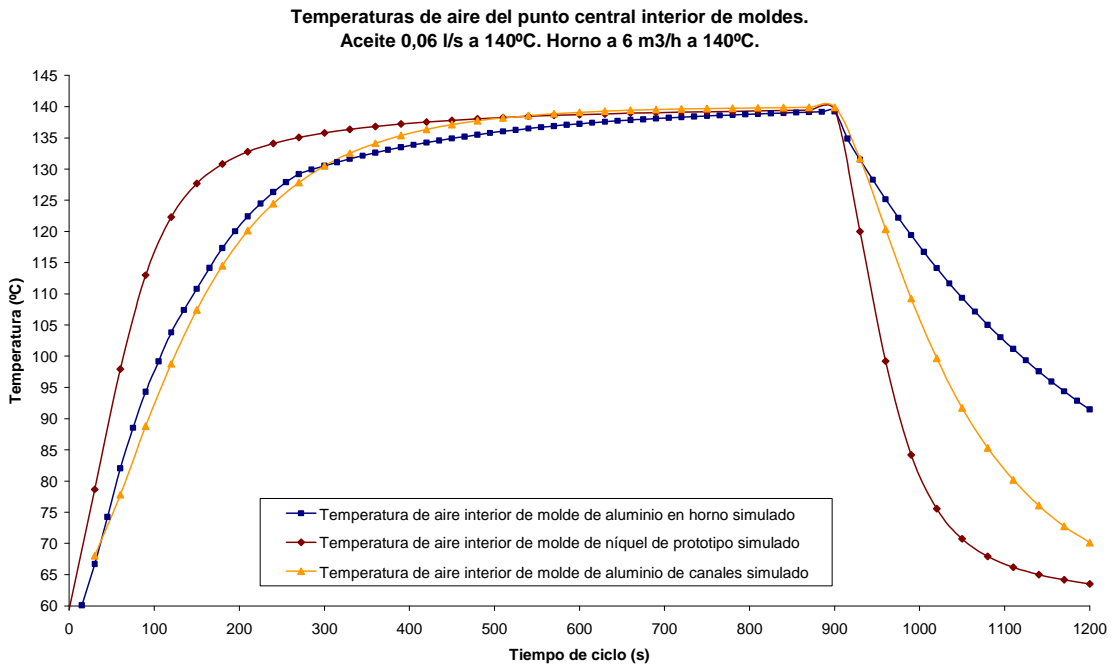


Figura 7.4. Curvas de temperatura de aire interior del molde obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio.

Desde una visión más real, es posible analizar las curvas anteriores considerando “truncado” el proceso de calentamiento al alcanzar una temperatura de consigna deseada. Considerando pues una temperatura máxima deseada de 130 °C en el interior de los moldes, es posible obtener un ciclo más ajustado, cuya etapa de enfriamiento se inicia al alcanzar la temperatura consignada. De esta manera las curvas de procesos quedan según las figuras 7.5 y 7.6.

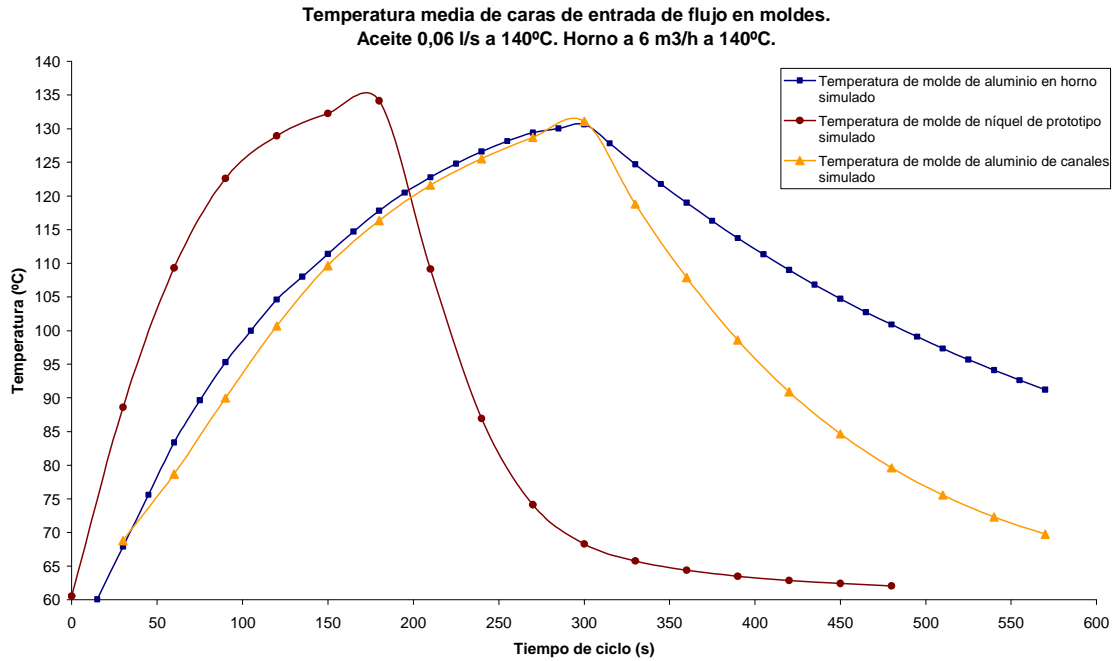


Figura 7.5. Curvas de temperatura media de la cara frontal del molde, limitadas a 130 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio.

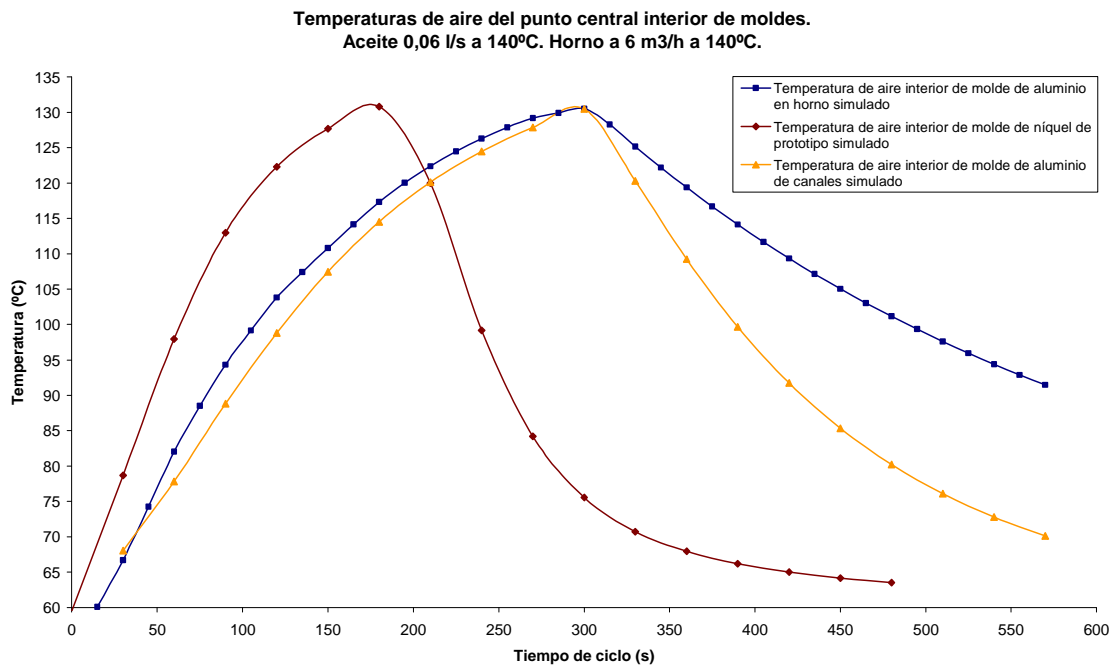


Figura 7.6. Curvas de temperatura de aire interior del molde, limitadas a 130 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio.

Las nuevas curvas obtenidas permiten analizar con mayor claridad las amplias diferencias de los procesos de rotomoldeo comparados, además de analizar de forma eficaz y ajustada a la realidad, la reducción del tiempo de ciclo que puede obtenerse. Respecto a estas reducciones, las tablas 7.2 y 7.3 muestran los tiempos de ciclo de la etapa de calentamiento de cada proceso en función de la temperatura máxima deseada:

| Temperatura de consigna (°C) | Tiempo de calentamiento requerido (s)  |  |   |
|------------------------------|--|--|---|
|                              | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
| 95                           | 92,11                                  | 55,40  | 108,62  |
| 100                          | 107,65                                 | 64,08  | 124,20  |
| 105                          | 124,87                                 | 74,05  | 141,51  |
| 110                          | 146,40                                 | 84,01  | 160,79  |
| 115                          | 168,97                                 | 96,44  | 182,51  |
| 120                          | 194,74                                 | 112,57                                       | 209,27  |
| 125                          | 229,32                                 | 135,07                                       | 244,61  |
| 130                          | 287,16                                 | 172,34                                       | 294,42  |

Tabla 7.2. Tiempos de calentamiento requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada para los 3 procesos de rotomoldeo en estudio.

De igual forma, la tabla 7.3 muestra el tiempo de ciclo completo, incluyendo la fase de enfriamiento, la cual se considera finalizada al alcanzar una temperatura de referencia de 91°C. Nótese que dicha temperatura corresponde a la mínima alcanzada en las simulaciones del proceso de rotomoldeo convencional por horno, sin considerar la pulverización de agua en estos procesos.

| Temperatura de consigna (°C) | Tiempo de ciclo completo requerido (s) |  |   |
|------------------------------|--|--|---|
|                              | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
| 95                           | 133,01                                 | 63,40  | 124,43  |
| 100                          | 192,87                                 | 81,61  | 158,72  |
| 105                          | 249,59                                 | 98,79  | 191,70  |
| 110                          | 305,54                                 | 115,97                                       | 226,34  |
| 115                          | 358,95                                 | 135,61                                       | 261,60  |
| 120                          | 412,87                                 | 158,95                                       | 301,90  |
| 125                          | 473,43                                 | 195,35                                       | 351,92  |
| 130                          | 574,95                                 | 246,51                                       | 416,48  |

Tabla 7.3. Tiempos de ciclo completo requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 91°C de enfriamiento, para los 3 procesos de rotomoldeo en estudio.

Con el objetivo de establecer un valor cuantitativo del ahorro en el tiempo de ciclo global que es posible alcanzar mediante el molde prototipo desarrollado y respecto a las otras dos tecnologías convencionales, se muestra en la tabla 7.4 los valores porcentuales

de reducción de tiempo de ciclo. Según estos, sería posible reducir el tiempo de ciclo en un máximo de 62,22%, en los procesos convencionales mediante horno, para alcanzar una temperatura de aire en el interior del molde de 115°C y enfriar el mismo hasta 91°C. En los moldes convencionales de aceite y en estas condiciones de temperaturas, la reducción del tiempo de ciclo alcanzaría valores superiores al 48%.

| Temperatura de consigna (°C) | Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado (%) |   |
|------------------------------|---|---|
|                              | Rotomoldeo convencional mediante horno                                      | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
| 95                           | 52,34%  | 49,05%  |
| 100                          | 57,68%  | 48,58%  |
| 105                          | 60,42%  | 48,47%  |
| 110                          | 62,04%  | 48,76%  |
| 115                          | 62,22%  | 48,16%  |
| 120                          | 61,50%  | 47,35%  |
| 125                          | 58,74%  | 44,49%  |
| 130                          | 57,13%  | 40,81%  |

Tabla 7.4. Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado respecto a los moldes convencionales, en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 91 °C de enfriamiento.

Considerando ahora una temperatura de enfriamiento de 70 °C, las tablas 7.5 y 7.6 muestran los tiempos de ciclo y porcentajes de reducción en los diferentes procesos, exceptuando los correspondientes al rotomoldeo convencional mediante hornos, los cuales dispondrían de valores enormemente superiores al no considerar los efectos del enfriamiento mediante agua pulverizada. En cualquier caso, los valores de este sistema son semejantes a los obtenidos en el molde convencional mediante fluido térmico (de canales). Las reducciones de ciclo son ligeramente inferiores aunque igualmente significativas.

| Temperatura de consigna (°C) | Tiempo de ciclo completo requerido (s)       |   |
|------------------------------|--|---|
|                              | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
| 95                           | 144,73                                       | 272,44  |
| 100                          | 162,95                                       | 306,73  |
| 105                          | 180,13                                       | 339,71  |
| 110                          | 197,31                                       | 374,35  |
| 115                          | 216,95                                       | 409,60  |
| 120                          | 240,28                                       | 449,91  |
| 125                          | 276,68                                       | 499,93  |
| 130                          | 327,84                                       | 564,49  |

Tabla 7.5. Tiempos de ciclo completo requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 70 °C de enfriamiento, para los procesos de rotomoldeo en molde prototipo y convencional, ambos mediante fluido térmico.

| Temperatura de consigna (°C) | Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado (%) |
|------------------------------|---|
|                              | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico                             |
| 95                           | 46,88%  |
| 100                          | 46,88%  |
| 105                          | 46,98%  |
| 110                          | 47,29%  |
| 115                          | 47,04%  |
| 120                          | 46,59%  |
| 125                          | 44,66%  |
| 130                          | 41,92%  |

Tabla 7.6. Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado respecto al molde convencional de fluido térmico, en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 70 °C de enfriamiento.

Finalmente, en la imagen 7.7 se muestran las curvas anteriormente expuestas, de los procesos de rotomoldeo estudiados y la reducción de tiempo de ciclo obtenida para calentamientos hasta 130 °C y enfriamientos hasta 70 °C.

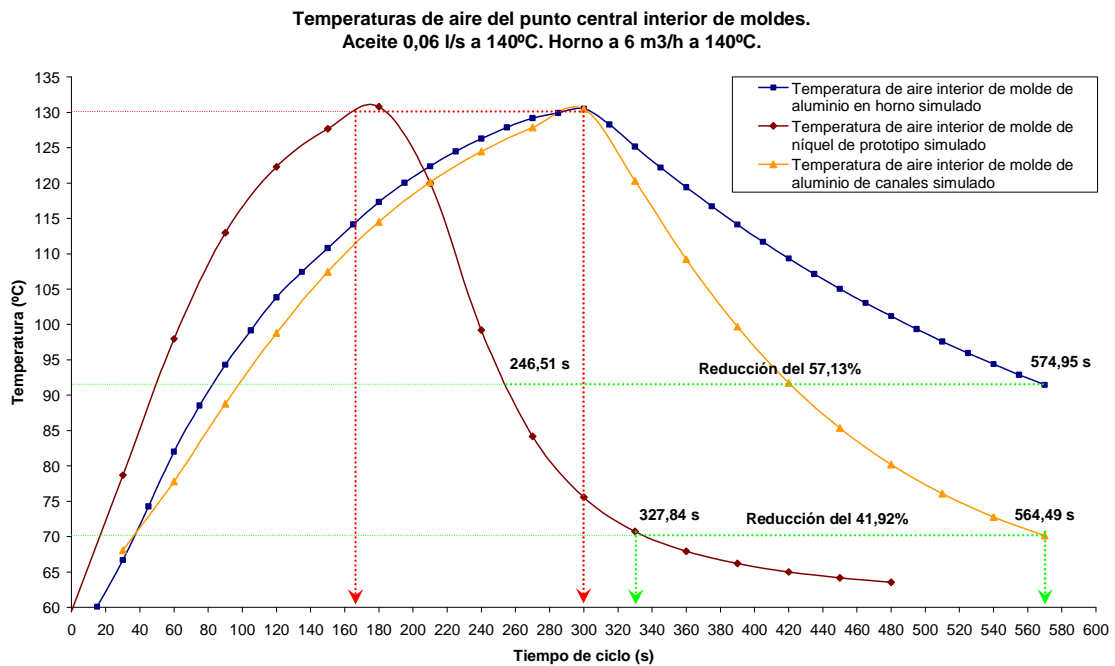


Figura 7.7. Curvas de temperatura de aire interior del molde, limitadas a 130 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio con marcas de referencia de tiempos de ciclo.

Es posible establecer como conclusión previa de este análisis comparativo a 140 °C, que la configuración del molde prototipo, el cual se encuentra basado en la incorporación de una cavidad electroconformada de níquel de tan solo 1 mm de espesor y en el calentamiento mediante aceite térmico de forma envolvente a las partes activas del molde (estas son toda la caras del molde que producirán pieza polimérica en su interior), permite

un ahorro muy considerable del tiempo de procesado, lo cual a su vez incide en una reducción energética de gran interés que será valorado en posteriores apartados.

### 7.7. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGÍAS, PARA MOLDES CÚBICOS DE 100 MM DE LADO Y 300°C DE TEMPERATURA MÁXIMA DE CALENTAMIENTO

Los análisis anteriormente expuestos resultan muy concluyentes, sin embargo, las consideraciones de temperatura máxima de calentamiento establecidas, de 140 °C, resultan lejanas a las realmente alcanzables en procesos industriales. Es por ello que resulta de interés realizar un análisis similar, aunque más breve, de los resultados que cabrían esperar de forma aproximada si se trabajase a una temperatura de calentamiento de 300°C, aunque las limitaciones reales de los fluidos térmicos solo permitan alcanzar temperaturas próximas a ésta, generalmente más que suficientes para los procesos de moldeo rotacional.

De forma general y tal como muestran las figuras 7.8 y 7.9, el aumento de temperatura de los procesos de moldeo rotacional simulados en las 3 configuraciones incrementan las diferencias del molde prototipo respecto a los dos convencionales. Las velocidades de calentamiento y enfriamiento siguen siendo muy superiores, lo que permite alcanzar mayores temperaturas en menores tiempos, y por tanto importantes reducciones en el tiempo de ciclo.

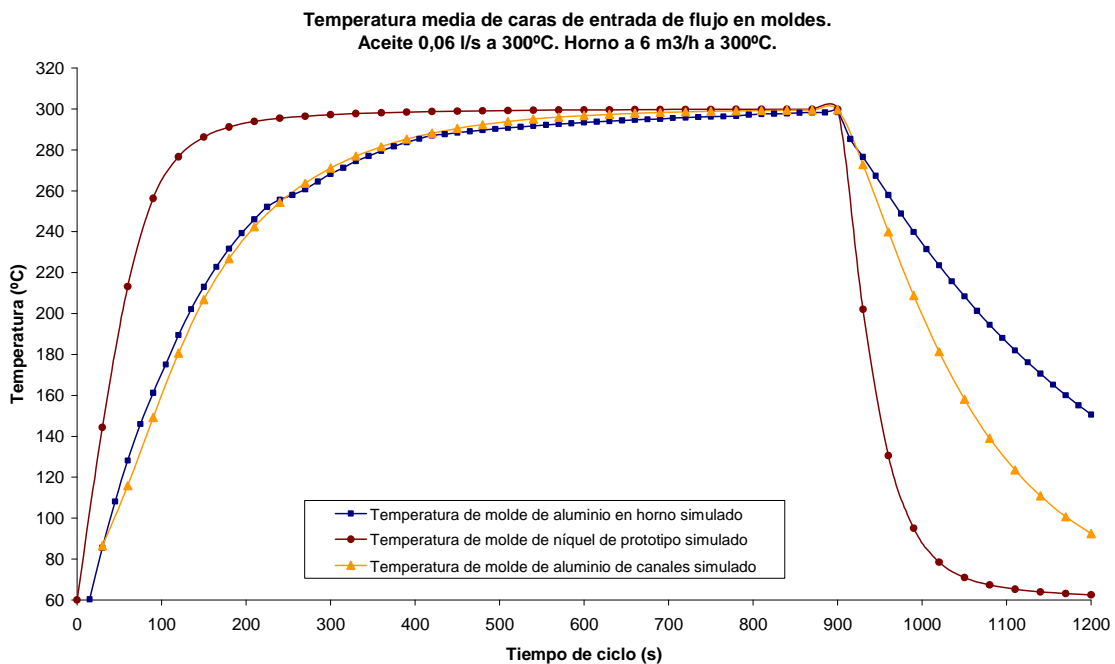


Figura 7.8. Curvas de temperatura media de la cara frontal del molde obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio, a 300 °C de calentamiento.



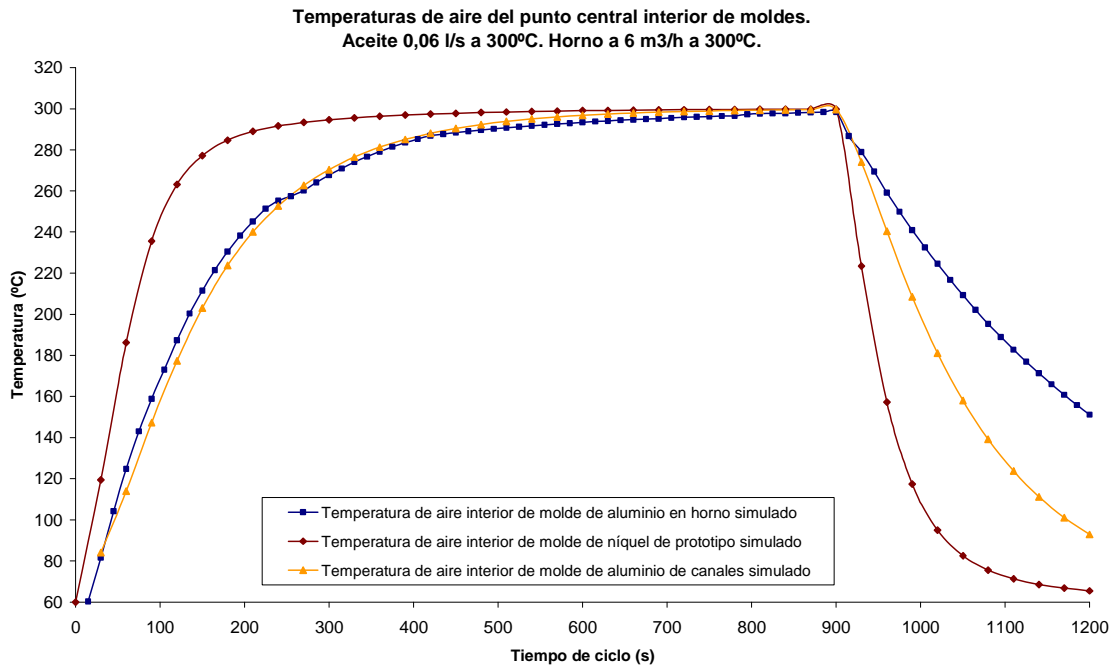


Figura 7.9. Curvas de temperatura de aire interior del molde obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo estudio, a 300 °C de calentamiento.

Al igual que en el análisis realizado a 140 °C, es posible establecer una temperatura máxima del aire interior del molde que permita finalizar el calentamiento y comenzar el enfriamiento. Estableciendo una temperatura máxima interior de aire aproximada de 275 °C, considerada a modo de ejemplo como óptima para un hipotético proceso de rotomoldeo, se dispondrían de las curvas de las figuras 7.10 y 7.11 correspondientes a las temperaturas medias de la cara frontal y del aire interior de los moldes, respectivamente.

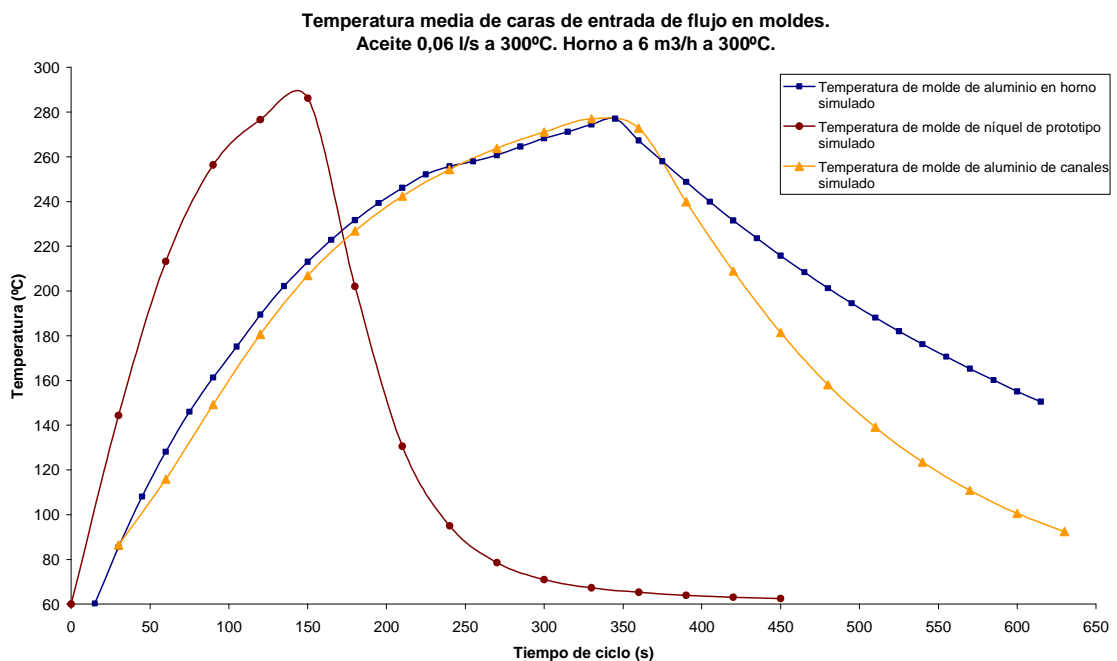


Figura 7.10. Curvas de temperatura media de la cara frontal del molde, limitadas a 275 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio.

Los efectos de la reducción del tiempo de ciclo que el molde prototipo permite alcanzar ahora resultan más evidenciados, donde queda optimizada fundamentalmente la fase de calentamiento respecto a los moldes convencionales.

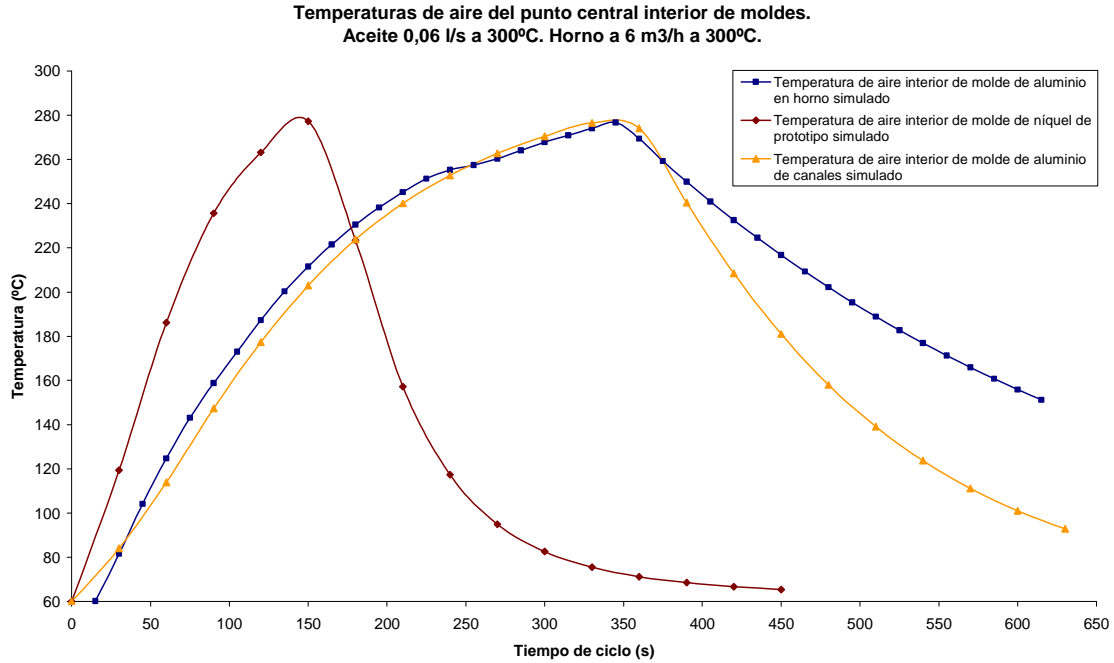


Figura 7.11. Curvas de temperatura de aire interior del molde, limitadas a 275 °C, obtenidas mediante simulación numérica de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio.

Las reducciones de ciclo posibles, en esta configuración de temperatura, resultan mayores, tal y como se muestran en las tablas de tiempos de ciclo de calentamiento y globales (tablas 7.7 y 7.8) así como en la tabla 7.9 de reducciones porcentuales.

Para la obtención de estos resultados se ha establecido como temperatura de enfriamiento la mínima obtenida para el tiempo máximo de ciclo de rotomoldeo simulado, de 1200 s, correspondiente a 150 °C aproximadamente.

| Temperatura de consigna (°C) | Tiempo de calentamiento requerido (s)  |  |   |
|------------------------------|--|--|---|
|                              | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
| 100                          | 42,22                                  | 20,19  | 46,02   |
| 150                          | 81,57                                  | 43,74  | 92,66   |
| 180                          | 112,34                                 | 57,22  | 123,20  |
| 200                          | 134,65                                 | 68,39  | 146,57  |
| 220                          | 162,82                                 | 68,39  | 174,62  |
| 240                          | 198,77                                 | 94,78  | 209,87  |
| 260                          | 268,42                                 | 116,58                                       | 261,95  |
| 275                          | 332,81                                 | 145,24                                       | 322,77  |

Tabla 7.7. Tiempos de calentamiento requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada para los 3 procesos de rotomoldeo en estudio.

| Temperatura de consigna (°C) | Tiempo de ciclo completo requerido (s) |  |   |
|------------------------------|--|--|---|
|                              | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
| 100                          | -                                      | -  | -   |
| 150                          | 81,57                                  | 43,74  | 92,66   |
| 180                          | 210,30                                 | 72,99  | 164,63  |
| 200                          | 279,90                                 | 93,22  | 210,09  |
| 220                          | 349,12                                 | 102,30                                       | 258,20  |
| 240                          | 422,09                                 | 139,48                                       | 312,20  |
| 260                          | 524,62                                 | 172,42                                       | 382,18  |
| 275                          | 612,15                                 | 209,42                                       | 467,77  |

Tabla 7.8. Tiempos de ciclo completo requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 150 °C de enfriamiento, para los 3 procesos de rotomoldeo en estudio.

El molde prototipo permite alcanzar temperaturas de aire interior de 220 °C y de posterior enfriamiento hasta 150 °C, aún no suficiente para la extracción de piezas, en términos de tiempo hasta un 70,70% inferior respecto a un proceso convencional mediante convección de aire en hornos. Desde otro punto de vista, el proceso podría reducirse hasta aproximadamente un 30% de su equivalente en moldes convencionales, pudiendo estos datos incluso ser superiores en caso de considerarse reducir la temperatura de enfriamiento hasta valores adecuados. Respecto a los moldes convencionales de aceite térmico con configuración de canales exteriores, las mejoras producidas resultan de igual importancia.

| Temperatura de consigna (°C) | Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado (%) |   |
|------------------------------|---|---|
|                              | Rotomoldeo convencional mediante horno                                      | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
| 100                          | -   | -   |
| 150                          | 46,38%  | 52,80%  |
| 180                          | 65,29%  | 55,66%  |
| 200                          | 66,69%  | 55,63%  |
| 220                          | 70,70%  | 60,38%  |
| 240                          | 66,95%  | 55,32%  |
| 260                          | 67,13%  | 54,89%  |
| 275                          | 65,79%  | 55,23%  |

Tabla 7.9. Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado respecto a los moldes convencionales, en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 150 °C de enfriamiento.

Sin embargo, considerando una temperatura aceptable de enfriamiento en torno a 93°C, aunque sería recomendable alcanzar valores inferiores a 60 °C, los tiempos de ciclo

globales para el molde prototipo y el convencional mediante fluidos térmicos corresponden a los de la tabla 7.10. Las reducciones porcentuales se muestran en la tabla 7.11.

| Temperatura de consigna (°C) | Tiempo de ciclo completo requerido (s)       |   |
|------------------------------|--|---|
|                              | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
| 100                          | 31,72  | 71,74   |
| 150                          | 103,11                                       | 229,56  |
| 180                          | 132,36                                       | 301,53  |
| 200                          | 152,60                                       | 346,99  |
| 220                          | 161,67                                       | 395,10  |
| 240                          | 198,85                                       | 449,10  |
| 260                          | 231,79                                       | 519,08  |
| 275                          | 268,80                                       | 604,67  |

Tabla 7.10. Tiempos de ciclo completo requeridos en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 93 °C de enfriamiento, para los procesos de rotomoldeo en molde prototipo y convencional, ambos mediante fluido térmico.

| Temperatura de consigna (°C) | Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado (%) |
|------------------------------|---|
|                              | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico                             |
| 100                          | 55,79%  |
| 150                          | 55,08%  |
| 180                          | 56,10%  |
| 200                          | 56,02%  |
| 220                          | 59,08%  |
| 240                          | 55,72%  |
| 260                          | 55,35%  |
| 275                          | 55,55%  |

Tabla 7.11. Reducción del tiempo de ciclo completo del molde prototipo desarrollado respecto al molde convencional de fluido térmico, en función de la temperatura de aire interior del molde deseada y hasta alcanzar 93 °C de enfriamiento.

Los valores de reducción entre ambos moldes de calentamiento y enfriamiento mediante fluidos térmicos siguen resultando de gran envergadura, probablemente similares a los obtenidos en máquinas de moldeo rotacional mediante convección de aire y hornos con pulverización de agua como método de mejora de los procesos de enfriamiento.

Por tanto, se confirman los significantes resultados obtenidos mediante la utilización del molde prototipo, en las diferentes configuraciones de temperaturas de calentamiento y enfriamiento, resultando una opción de gran validez y viabilidad en la reducción de los

tiempos de rotomoldeo así como en la consecuente reducción de costes asociados, tales como los energéticos, sin considerar aún los ahorros energéticos explícitos asociados a las diferencias de las tecnologías estudiadas.

## **7.8. UNIFORMIDAD TÉRMICA**

### **7.8.1. Consideraciones básicas de la uniformidad térmica**

En el capítulo III se expuso la definición del coeficiente de variación como parámetro definitorio de las condiciones de homogeneidad de los procesos térmicos entre las diferentes partes del molde. Asimismo, en dicho capítulo se estudió en profundidad la uniformidad térmica tanto en los procesos de calentamiento como en los de enfriamiento, de los moldes prototipo y convencionales de uso de fluidos térmicos.

El análisis de las velocidades de calentamiento y enfriamiento del proceso de moldeo rotacional, así como los tiempos de ciclo necesarios, han concentrado la atención y esfuerzos del presente capítulo, sin embargo la uniformidad térmica sigue resultando de gran interés, fundamentalmente desde la visión de la calidad estructural y de acabado de las piezas.

A continuación se retomará el análisis de este parámetro, analizado en capítulos anteriores, con la salvedad de la inclusión en esta ocasión de los datos aproximados obtenidos mediante simulación numérica para el caso de estudio del moldeo rotacional mediante convección de aire en hornos.

El coeficiente de variación de la uniformidad, se ha obtenido en todos los casos estudiados, seleccionando 25 puntos distribuidos uniformemente en cada cara del molde donde se produzca la transferencia térmica, y quedaría definido de la siguiente forma, tal y como se estableció en el capítulo III:

$$Cu_i = (\text{valor absoluto de desviación típica de temperaturas respecto al valor medio en instante } i) / (\text{valor medio de temperaturas instante } i)$$

De esta manera, para cada instante del proceso de rotomoldeo simulado numéricamente se obtienen un conjunto de datos que tratados de forma estadística permiten valorar de forma global la homogeneidad de las temperaturas en todo el molde.

### 7.8.2. Análisis comparativo de la uniformidad térmica entre tecnologías

El estudio de la uniformidad térmica de los moldes y los procesos de rotomoldeo estudiados, se ha basado en los resultados de las mismas simulaciones realizadas para los análisis anteriores, de temperaturas y tiempos de ciclo.

La figura 7.12 ilustra los coeficientes de variación de la uniformidad de los 3 procesos estudiados correspondiente a las simulaciones de rotomoldeo a 140 °C de temperatura máxima de calentamiento. Recuérdese que un coeficiente de variación elevado implica una mayor desviación de los diferentes puntos de temperaturas medidos respecto de la media, y por tanto, una menor homogeneidad o uniformidad de la temperatura del molde.

Según estos datos, los procesos convencionales mediante calentamiento por horno disponen de una gran homogeneidad térmica, alcanzando valores máximos del coeficiente adimensional de variación de  $8,7 \cdot 10^{-4}$  en la etapa de calentamiento y de  $5,06 \cdot 10^{-3}$  en la fase de enfriamiento, frente a los valores máximos alcanzados en el molde prototipo, de  $5,85 \cdot 10^{-2}$  y  $6,23 \cdot 10^{-2}$  en las etapas de calentamiento y enfriamiento respectivamente.

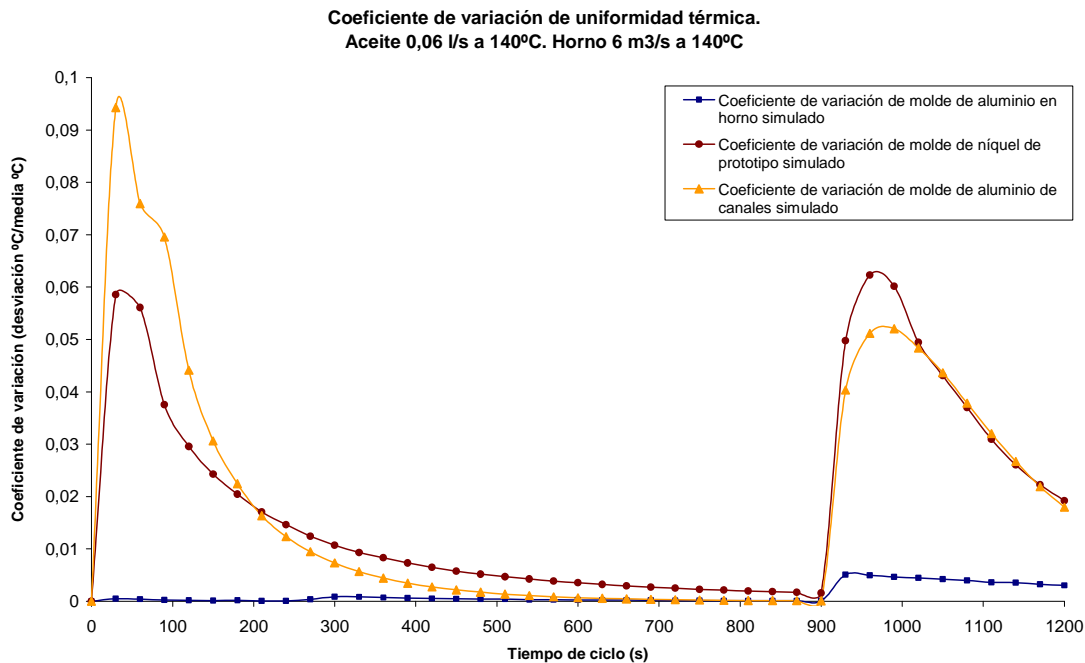


Figura 7.12. Curvas de coeficiente de variación de uniformidad térmica obtenidas en procesos de simulación numérica a 140 °C, de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio.

El molde prototipo dispone de una variación de la temperatura del molde muy superior a la obtenida en procesos mediante hornos, aunque inferior en la etapa de

calentamiento respecto al molde de canales exteriores. En la etapa de enfriamiento éste último molde alcanza mejores condiciones de uniformidad respecto del molde prototipo, probablemente debido a la mayor velocidad del enfriamiento producida en el molde prototipo.

Para una configuración simple de molde, como el caso en estudio, la uniformidad en los procesos de calentamiento y enfriamiento en hornos es elevada pues el molde se encuentra, al menos de forma teórica, expuesto a una temperatura envolvente y global muy similar en las diferentes partes próximas al horno. En los casos de calentamiento mediante aceite por canales, la configuración geométrica de dichos canales implica irremediablemente dos efectos característicos:

- a) El flujo calorífico se concentra en las paredes de los canales en contacto con el molde, lo que produce gradientes de temperaturas en el molde.
- b) Considerando la entrada del fluido térmico situada en una de las caras del molde y la salida en cualquier otra, existirá un gradiente de temperaturas entre la zona de entrada y la de salida, implicando nuevamente otra configuración de gradiente de temperaturas.

Si bien la existencia en el molde prototipo de una cavidad electroconformada en níquel con un espesor de 1 mm permite mejorar las velocidades de calentamiento, el hecho de disponer de una configuración envolvente sobre la que circula el fluido permite mejorar la consideración a) del párrafo anterior. De esta manera, el flujo circula por completo a través de las diferentes caras activas del molde, produciendo una homogeneidad de las temperaturas del molde mayor que las producidas en los moldes de canales exteriores.

Por otra parte, mientras se mantenga una configuración de entradas y salidas localizadas cada una de ellas en una sola cara del molde, se continuará produciendo los efectos de la consideración b). Los moldes de calentamiento mediante fluidos térmicos disponen, en los inicios de los procesos de calentamiento y enfriamiento, de elevados gradientes de temperaturas entre diversas partes del molde principalmente por dichos efectos de las entradas y salidas del flujo localizadas en diferentes partes del molde, según se ha descrito anteriormente. Este efecto se ve incrementado mientras mayor sea la temperatura del proceso de calentamiento o menor la de enfriamiento, así como a mayores diferencias de temperaturas iniciales del molde y del fluido térmico.

Las velocidades de calentamiento y enfriamiento influyen en la configuración de las uniformidades del molde. Velocidades elevadas producirán mayores picos de baja uniformidad aunque ligeramente menor intervalo de tiempo, más localizadas aún en las fases iniciales del proceso. Con velocidades inferiores se producen efectos prácticamente contrarios.

Los efectos producidos a una temperatura de calentamiento de 300 °C puede observarse en la figura 7.13. El incremento sustancial de la temperatura produce inequívocamente una mayor diferencia de temperaturas en el molde, fundamentalmente en los moldes mediante calentamiento por fluido térmico. Las uniformidades del proceso convencional mediante horno siguen siendo óptimas, así como la mejor uniformidad del molde prototipo respecto al molde convencional de canales exteriores.

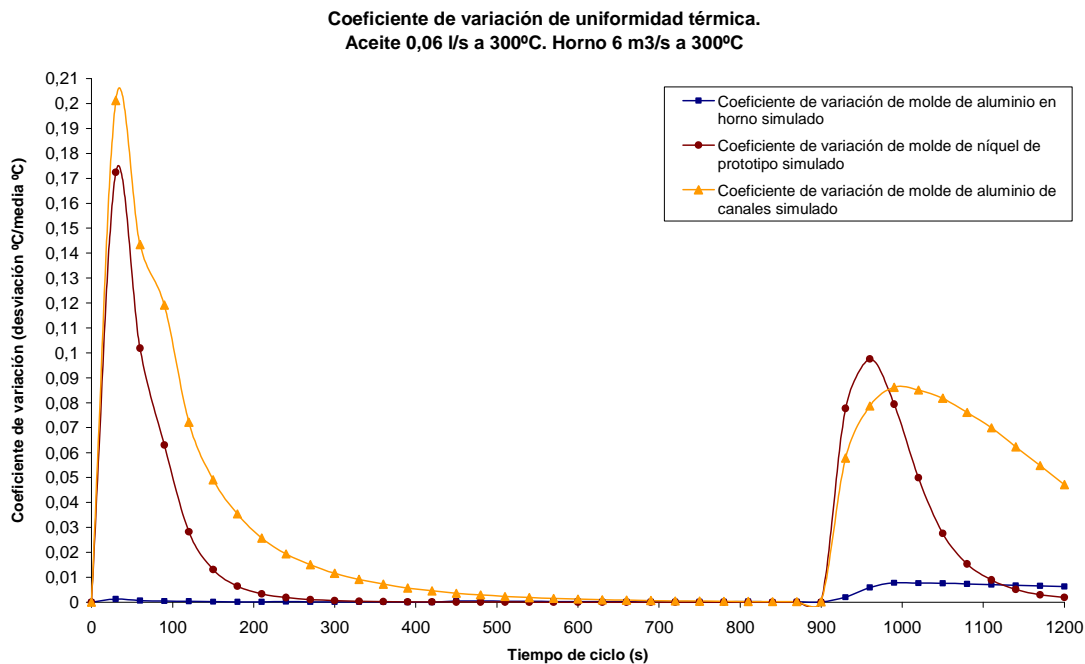


Figura 7.13. Curvas de coeficiente de variación de uniformidad térmica obtenidas en procesos de simulación numérica a 300 °C, de las 3 tecnologías de rotomoldeo en estudio.

A pesar de los resultados obtenidos, resulta necesario contextualizar las diferencias observadas en cuanto a uniformidad térmica. Según la definición establecida para el coeficiente de variación, para una temperatura media, en un instante dado del proceso, de 100 °C, un coeficiente de variación de 0,05 corresponde de forma teórica a una variación media de las diferentes temperaturas del molde de 5 °C, lo cual corresponde a un 5% de la temperatura en dicho instante. En el caso concreto de los resultados obtenidos en el molde prototipo, a los 120 segundos del inicio de la fase de calentamiento la temperatura media del molde superó los 280 °C, y con un coeficiente de variación de  $2,83 \cdot 10^{-2}$ , es decir, un



2,83% de la temperatura media. Esto implica una desviación media de la temperatura de 7,92 °C respecto a 280 °C. En el instante correspondiente a 150 s, el coeficiente de variación se situó en  $1,31 \cdot 10^{-2}$  respecto a una temperatura media próxima a 291 °C, lo que implica una menor desviación, de 3,81 °C.

Según lo expuesto anteriormente, sería necesario valorar qué desviaciones de temperaturas en el molde pueden considerarse aceptables durante las diferentes etapas del proceso de rotomoldeo, con el fin de evaluar la relevancia de estos efectos en la fabricación de las piezas, concretamente en la distribución de espesores de la misma. De esta forma, los resultados de uniformidad encontrados en el molde prototipo podría considerarse irrelevantes o secundarias, dada las mejoras en tiempo de ciclo, o por el contrario podrían ser de tal importancia que deba ser compensada en detrimento de otras mejoras conseguidas en el modelo.

### 7.8.3. Consideraciones finales de la uniformidad térmica entre tecnologías

Las geometrías simples de molde en el moldeo rotacional, como sería el caso del molde cúbico establecido en este trabajo de investigación, permiten obtener altas uniformidades en los procesos convencionales de convección de aire en interior de hornos, dado que el molde es fácilmente accesible al aire de calefacción y refrigeración. Sin embargo, en geometrías complejas, existe mayor dificultad para establecer el mismo aporte calorífico a todas las zonas del molde, dado que las zonas más salientes o protuberantes se encontrarán más expuestas y por tanto con mayor capacidad de transferencia térmica. De forma contraria, las menos accesibles dispondrán de una menor temperatura de molde, con la que la uniformidad del proceso se vería empeorada, y consecuentemente la distribución interior de espesores de la pieza (figura 7.14).

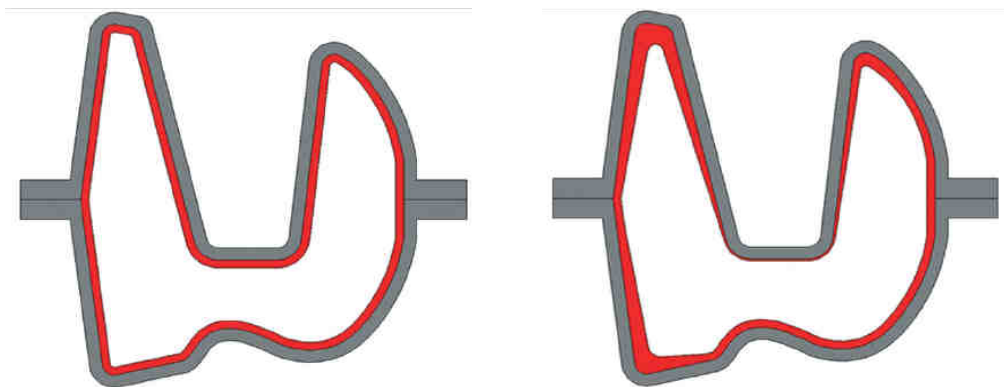


Figura 7.14. Distribución constante de espesor en el interior de un molde convencional (izquierda) y distribución variable de espesores (derecha) [6]

En dichas geometrías complejas, el calentamiento y/o enfriamiento mediante fluido térmico y de forma envolvente permitiría alcanzar mayores cotas de uniformidades con independencia de la geometría del molde.

Finalmente, es posible mejorar sustancialmente la uniformidad del proceso en el molde prototipo desarrollado. Retomando los análisis realizados en el capítulo III, las configuraciones de mayores uniformidades correspondían a aquellas que disponían de entradas y salidas en varias caras activas del molde, aunque para el desarrollo del presente trabajo de investigación se tomase un modelo más simple, con entradas y salidas en caras únicas y opuestas, que permitieran una rápida y simple fabricación, y posterior experimentación. Por tanto, y en continuación a los desarrollos aquí expuestos, sería posible mejorar, en caso necesario, las uniformidades del molde prototipo, incorporando nuevas entradas y salidas de fluido térmico en otras zonas del molde, aunque deberían estudiarse en tal caso las velocidades de calentamiento y enfriamiento así como las nuevas condiciones de tiempo de ciclo que se podrían alcanzar.

## **7.9. ESTUDIO BÁSICO DE PRODUCCIÓN Y GASTOS ENERGÉTICOS**

Uno de los retos pendientes del moldeo rotacional radica en la optimización de la eficiencia energética, la cual dista en gran medida de las eficiencias de otros procesos de conformación de polímeros.

Tomando como base las tecnologías convencionales de rotomoldeo mediante convección forzada de aire en hornos, es posible optimizar el gasto energético fundamentalmente mediante dos métodos interrelacionados:

- Optimización del tiempo de ciclo
- Optimización de la transferencia térmica del proceso

Respecto a la primera opción, en igualdad de condiciones de gasto energético específico y condiciones de acabado de pieza, una reducción del tiempo de ciclo reduce de forma evidente el gasto energético global, y por tanto mejora la eficiencia.

Por otra parte, la optimización de la transferencia térmica, permitiría la reducción del gasto energético obteniendo el mismo producto. Dicha optimización puede establecerse mediante la reducción de las pérdidas energéticas (focalización de los flujos caloríficos, mejoras en los aislamientos térmicos,...), la mejora de los factores que intervienen en dicha

transferencia térmica (materiales de mayor conductividad, geometrías más eficientes, menores espesores de molde,...) o mediante la incorporación de nuevos elementos que produzcan efectos simultáneos de mejora, entre otros.

### **7.9.1. Cálculo de producción y gastos energéticos de las tecnologías estudiadas**

Los procesos de rotomoldeo analizados disponen de diferentes fuentes energéticas y procesos de transferencia térmica. Mientras que en un molde de convección por aire forzado se requiere principalmente de un quemador para elevar la temperatura del aire y de potentes soplantes para producir velocidades elevadas para los procesos convectivos, el molde prototipo, al igual que los convencionales de fluido térmico mediante canales, requieren de calefactores, baños termostáticos o elementos similares que eleven y mantengan, en este caso, la temperatura del aceite térmico, además de las bombas que recirculen el fluido.

Respecto al molde convencional de convección por aire, el consumo de gas propano específico se ha estimado a partir de los datos disponibles según M.J. Wright, A.G. Spence, y R.J. Crawford [1] y las especificaciones técnicas del fabricante de la máquina RS-160. El gasto medio del gas propano utilizado para el mantenimiento constante de la temperatura del horno en 300 °C, considerando las pérdidas producidas en el brazo soporte del molde y el propio calentamiento de este pueden considerarse próximas a 4,52 m<sup>3</sup>/h. Esta consideración, muy próxima a los datos experimentales disponibles, supone un 10% del gasto máximo posible según las especificaciones de la máquina de rotomoldeo.

Considerando los flujos volumétricos de aire forzado en la etapas de calentamiento y enfriamiento en valores usuales de 6 m<sup>3</sup>/h (360 m<sup>3</sup>/min) y 5 m<sup>3</sup>/h (300 m<sup>3</sup>/min) respectivamente, se obtienen consumos energéticos medios aproximados de 7,16 kW y 1,08 kW. Las soplantes de los procesos de escape requieren de consumos energéticos de 0,373 y 1,12 kW.

En el proceso de rotomoldeo mediante el molde prototipo y la máquina de ensayos experimental desarrollada se produjo un consumo energético medio del baño termostático de 0,65 kW en la etapa de calentamiento, para mantener una temperatura constante del aceite de 140 °C. El consumo energético aproximado de la bomba de circulación de aceite en todo el proceso asciende a 0,38 kW.

A partir de los datos experimentales obtenidos en el molde prototipo, y a modo de extrapolación de los datos disponibles para una temperatura de proceso de 300 °C, resulta aceptable y conservador considerar un consumo medio de 1,95 kW/h (3 veces superior al consumo correspondiente a 140 °C) del baño termostático correspondiente a dicha temperatura. El consumo energético de la recirculación del flujo mediante la bomba de aceite puede considerarse independiente de la temperatura del proceso.

Considerando los consumos energéticos anteriores como los principales en cada proceso expuesto, así como utilizando los mismos consumos del molde prototipo en el caso del molde convencional de canales exteriores, los resultados de los consumos totales de cada tecnología de rotomoldeo pueden considerarse como los expuestos en las tablas 7.12 y 7.13. En la tabla 7.12 se ha establecido la equivalencia del gas propano en términos de potencia eléctrica, considerando 1 kg de gas propano equivalente a 12,83 kWh en términos energéticos.

| Parámetro  | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
|--|--|--|---|
| Consumo específico de combustible/gas propano (kg/h) | 4,52                                   | 0,00   | 0,00  |
| Consumo eléctrico equivalente (kW)                   | 57,74                                  | 0,00   | 0,00  |

Tabla 7.12. Consumos específicos de combustibles y consumos eléctrico equivalente para ciclo de rotomoldeo simulado a 300 °C de temperatura, según tecnologías estudiadas.

El consumo de combustible queda limitado a las tecnologías convencionales mediante horno, aunque para procesos industriales podrían combinarse con sistemas eléctricos también para los casos de uso de aceite térmico. En cualquier caso, es de resaltar la posibilidad de no requerir combustibles fósiles para el proceso de rotomoldeo desarrollado.

Los datos expuestos en la tabla 7.13 permiten evaluar el gasto energético necesario para cada ciclo completo de rotomoldeo en cada tecnología estudiada y según las temperaturas anteriormente detalladas. De esta manera, el ciclo completo de rotomoldeo prototipo requiere de un total de 0,101 kWh, respecto a los 6,228 kWh del proceso convencional mediante horno, lo que supone un 98,38% de ahorro energético. El proceso convencional de canales permite un ahorro del 96,40% respecto al proceso en hornos, mientras que entre procesos de aceite térmico, el molde prototipo reduciría el consumo

energético en un 55,05%. Queda de esta manera definida la mayor eficiencia energética, para un ciclo completo de rotomoldeo, del molde prototipo respecto a los procesos convencionales.

Los tiempos de ciclo corresponden a los detallados en las tablas 7.7 y 7.8 para una temperatura máxima del aire interior del molde de 275 °C y una temperatura de enfriamiento de 150 °C.

| Parámetro   | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
|---|--|--|---|
| Potencia eléctrica en calentamiento (kW)                    | 7,53                                   | 2,33   | 2,33  |
| Potencia eléctrica en enfriamiento (kW)                     | 2,20                                   | 0,38   | 0,38  |
| Potencia eléctrica equivalente de gas en calentamiento (kW) | 57,74                                  | 0,00   | 0,00  |
| Duración calentamiento (s)                                  | 332,81                                 | 145,24                                       | 322,77  |
| Duración enfriamiento (s)                                   | 279,34                                 | 64,18  | 145,00  |
| Consumo eléctrico total 1 (kWs)                             | 22.421,79                              | 362,80                                       | 807,15  |
| Consumo eléctrico total 2 (kWh)                             | 6,228                                  | 0,101  | 0,224   |
| Ahorro energético   | -                                      | 98,38%                                       | 96,40%  |

Tabla 7.13. Consumos específicos eléctricos y consumos totales para ciclo de rotomoldeo simulado a 300 °C de temperatura, según tecnologías estudiadas.

Los resultados anteriores se encuentran referenciados al tiempo del ciclo necesario en cada proceso, en una única etapa de procesado o fabricación. Analizando de forma teórica y básica la productividad global de los diferentes procesos estudiados, según los tiempos de ciclo de cada uno de ellos, puede determinarse el ahorro energético global, por ejemplo de forma anual (tabla 7.14). Para ello se han evaluado los ciclos completos de fabricación posibles para una producción diaria de 10 horas de funcionamiento, considerando un aprovechamiento útil de dicha jornada del 80% (deben considerarse los tiempos “improductivos” de apertura y cierre del molde, extracción de piezas, carga de material, etc.)

| Parámetro                            | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
|--------------------------------------|--|--|---|
| Ciclos por hora                      | 5,88                                   | 17,19  | 7,70  |
| Ciclos por hora ajustados (80%)      | 5                                      | 14   | 6   |
| Producción diaria (10 horas)         | 50                                     | 140  | 60  |
| Producción anual (230 días)          | 11.500                                 | 32.200                                       | 13.800  |
| Incremento de producción             | -                                      | 180%   | 20%   |
| Consumos eléctrico anual total (kWh) | 71.625,16                              | 3.245,02                                     | 3.094,09  |
| Ahorro energético eléctrico          | -                                      | 95,47%                                       | 95,68%  |

Tabla 7.14. Estimación teórica de producción en procesos de rotomoldeo y parámetros productivos anuales según datos disponibles.

Considerando además una producción anual limitada a 230 días útiles y la fabricación de una sola unidad de producto en cada ciclo de rotomoldeo, la producción estimada de piezas rotomoldeadas podría situarse en 11.500, 32.200 y 13.800 unidades para los procesos convencionales en hornos, molde prototipo y convencional de canales respectivamente. Según estos valores estimados, el proceso desarrollado permitiría incrementar la producción, respecto al sistema convencional mediante hornos, en un 180%, desde 50 unidades diarias hasta 140, o de forma anual desde 11.500 hasta 32.300 unidades. En términos energéticos anuales y aún con una producción incrementada en un 180%, el proceso desarrollado mediante el molde prototipo permitiría alcanzar ahorros eléctricos superiores a un 95% respecto a los procesos convencionales de convección forzada en hornos.

Las características del horno analizado en la tecnología de rotomoldeo convencional mediante convección de aire permite la interpretación de los datos expuesto de diversas formas, pues en cualquier caso, se está analizando el proceso de rotomoldeo de un molde cúbico con dimensiones interiores de 100 mm en un horno con unas dimensiones útiles superiores a los 1.500 mm en cualquiera de sus ejes. Por tanto, sería posible reducir las dimensiones útiles de dicho horno para dicho molde base, aminorándose consecuentemente los costes energéticos asociados.

Para realizar un análisis aún más preciso y real, se establece en la tabla 7.15 los resultados expuestos anteriormente en las tablas 7.13, considerando en este nuevo

supuesto una mayor productividad de piezas en el molde convencional mediante horno, en el cual podrían producirse fácilmente 4 piezas simultáneamente según el molde base de 100 mm de longitud interior y sin alterar significativamente las necesidades energéticas calculadas. Cabe destacarse que en este caso los gastos energéticos de los movimientos giratorios de los moldes se incrementarían, los cuales no están siendo valorados.

| Parámetro   | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
|---|--|--|---|
| Potencia eléctrica en calentamiento (kW)                    | 1,88 *                                 | 2,33   | 2,33  |
| Potencia eléctrica en enfriamiento (kW)                     | 0,55 *                                 | 0,38   | 0,38  |
| Potencia eléctrica equivalente de gas en calentamiento (kW) | 14,50 *                                | 0,00   | 0,00  |
| Duración calentamiento (s)                                  | 332,81                                 | 145,24                                       | 322,77  |
| Duración enfriamiento (s)                                   | 279,34                                 | 64,18  | 145,00  |
| Consumo eléctrico total 1 (kWs)                             | 5.605,45 *                             | 362,80                                       | 807,15  |
| Consumo eléctrico total 2 (kWh)                             | <b>1,557 *</b>                         | <b>0,101</b>                                 | <b>0,224</b>                                    |
| Ahorro energético   | -                                      | <b>93,53%</b>                                | <b>85,60%</b>                                   |

Tabla 7.15. Consumos específicos eléctricos y consumos totales para ciclo de rotomoldeo simulado a 300 °C.  
\* Parámetros unitarios por pieza rotomoldeada, considerando una producción simultánea de 4 unidades.

Considerando la simultaneidad de producción de hasta 4 unidades en el rotomoldeo convencional, el consumo energético unitario del molde desarrollado permitiría un ahorro del 93,53% respecto al coste unitario del proceso convencional mediante hornos, lo que continúa siendo una enorme reducción del gasto eléctrico del proceso. En el caso de considerar una producción de hasta 8 piezas rotomoldeadas en el mismo ciclo de rotomoldeo convencional mediante horno, manteniendo los mismos términos de energía consumidos, aún así se obtendría un **ahorro energético superior al 87%** con el nuevo modelo prototipo de rotomoldeo.

### 7.9.2. Conclusiones básicas

Las tecnologías convencionales de moldeo rotacional estudiadas, fundamentalmente las que recurren a la convección por aire forzado en hornos, requieren

de tiempos de ciclo muy superiores al molde prototipo desarrollado, así como mayores necesidades energéticas.

La incorporación de fluidos térmicos, como el aceite térmico, de forma envolvente al molde prototipo, así como la fabricación de cavidades del molde mediante tecnologías de electroconformado (produciendo moldes de 1 mm de espesor), permiten obtener significativas mejoras energéticas y productivas, siendo una alternativa eficiente y viable desde un punto de vista industrial, sin menoscabo de las necesidades de desarrollo y mejora que aún son necesarias para tal aplicación.

Los ahorros energéticos eléctricos alcanzados superan, en el menor de los casos estudiados, valores superiores al 87%, además de la eliminación de consumos de combustibles, sin considerar los gastos energéticos extras implícitos únicamente en las tecnologías de rotomoldeo mediante hornos tales como los consumos adicionales de inyección aire en los quemadores de gas, o los gastos energéticos de los brazos de accionamiento de los moldes, superiores a los requeridos en los moldes desarrollados de menor peso. Estos y otros aspectos, como los derivados de la fabricación de moldes, costes operativos, de mantenimiento, aislamientos térmicos o servicios auxiliares, deben ser valorados en mayor medida para un completo y preciso análisis de la eficiencia y productividad de estos procesos, que de forma general deben beneficiar comparativamente al molde prototipo desarrollado.

#### **7.10. ESTUDIO BÁSICO DE EMISIONES CONTAMINANTES**

Prácticamente cualquier proceso productivo moderno lleva asociado consumos energéticos que producen un impacto medioambiental determinado. De esta forma, el consumo de combustibles fósiles produce gases contaminantes de forma directa en su combustión, o de forma indirecta en las centrales convencionales eléctricas cuando el consumo es puramente eléctrico. En el caso de las energías renovables, el impacto ambiental se reduce significativamente hasta incluso la eliminación completa de los gases contaminantes, aunque dichas tecnologías, actualmente en auge, no suplen aún la totalidad de las necesidades energéticas de la sociedad.

De forma concreta, las industrias del rotomoldeo, así como cualquier otra similar, requiere de energía para la transformación del material plástico, tal y como se ha evaluado en el apartado anterior, por lo que la reducción del consumo eléctrico o de gas propano, por ejemplo, no solo produce una reducción de los costes de fabricación, mayor competitividad



de los productos o eficiencia energética en general, sino que produce una menor cantidad de gases contaminantes directos o indirectos, como el CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, entre otros.

En la tabla 7.17 se muestra el cálculo simple de las emisiones teóricas producidas por los diferentes procesos de rotomoldeo estudiados, considerando las emisiones de los gases contaminantes principales según el mix eléctrico español (tabla 7.16) en función de la energía consumida, así como estableciendo una producción de 2,94 kg de CO<sub>2</sub> por kg de propano consumido.

| kg/kWh de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) | g/kWh de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) | g/kWh de óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) |
|---|---|---|
| <b>0,166</b>                                    | <b>0,254</b>                                  | <b>0,217</b>                                    |

Tabla 7.16. Emisiones específicas medias anuales del sistema eléctrico peninsular español durante el año 2010 según el informe anual del Observatorio de la Electricidad de la WWF. [7]

| Parámetro                                   | Rotomoldeo convencional mediante horno | Rotomoldeo prototipo mediante fluido térmico | Rotomoldeo convencional mediante fluido térmico |
|---|--|--|---|
| Producción anual (230 días)                 | 46.000 *                               | 32.200                                       | 13.800  |
| Consumos eléctrico anual total (kWh)        | 9.971,80                               | 3.245,02                                     | 3.094,09  |
| Consumo de propano anual (kg)               | 4.805,41                               | 0,00   | 0,00  |
| Producción de CO <sub>2</sub> anual (kg)    | 15.783,21                              | 538,67                                       | 513,62  |
| Producción de SO <sub>2</sub> anual (g)     | 2.532,84                               | 824,24                                       | 785,90  |
| Producción de NO <sub>x</sub> anual (g)     | 2.163,88                               | 704,17                                       | 671,42  |
| Producción de CO <sub>2</sub> unitaria (kg) | 0,343 *                                | 0,017  | 0,037   |
| Producción de SO <sub>2</sub> unitaria (g)  | 0,055 *                                | 0,026  | 0,057   |
| Producción de NO <sub>x</sub> unitaria (g)  | 0,047 *                                | 0,022  | 0,049   |
| Reducción unitaria CO <sub>2</sub>          | -                                      | <b>95,12%</b>                                | <b>89,15%</b>                                   |
| Reducción unitaria SO <sub>2</sub>          | -                                      | <b>53,51%</b>                                | <b>-3,43%</b>                                   |
| Reducción unitaria NO <sub>x</sub>          | -                                      | <b>53,51%</b>                                | <b>-3,43%</b>                                   |

Tabla 7.17. Producción de gases contaminantes según tecnología de rotomoldeo en términos totales anuales y en términos unitarios por pieza fabricada. \*Considerando una producción simultánea de 4 unidades por ciclo.

Los resultados expuestos muestran la diferencia de producción de gases, fundamentalmente de CO<sub>2</sub> entre las diferentes tecnologías de rotomoldeo estudiadas,

donde los moldes de calentamiento por aceite reducen significativamente las emisiones de dicho gas, principalmente por el innecesidad de consumo de combustibles fósiles.

Considerando una producción de 4 piezas por ciclo en los moldes convencionales de rotomoldeo, cada pieza rotomoldeada produciría una emisión total de CO<sub>2</sub> de 343 g, a diferencia de los 17 g producidos en las piezas rotomoldeadas mediante el molde prototipo. Queda de manifiesto pues la favorable repercusión medioambiental alcanzada con el molde desarrollado, permitiendo una reducción significativa de las toneladas de CO<sub>2</sub> susceptibles de ser emitidas en los procesos de rotomoldeo.

## *Capítulo VIII*

### **CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**



## 8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

### 8.1. CONCLUSIONES

Es posible establecer un conjunto de conclusiones parciales y globales, en orden cronológico según se ha ido desarrollando la presente Tesis Doctoral, desde las primeras fases de “desarrollos y análisis teóricos”, hasta los definitivos “análisis comparativos entre las tecnologías estudiadas”.

Por tanto, las principales conclusiones que pueden ser extraídas tras el proceso completo de investigación corresponden a las siguientes:

- I. Según los estudios básicos iniciales de desarrollo del molde prototipo de calentamiento por aceite térmico de forma envolvente, esta configuración, así como el diseño de la cavidad interior del molde de níquel con tan sólo 1 mm de espesor, permite obtener importantes mejoras de reducción del tiempo de ciclo superiores al 64% en términos medios, y de la uniformidad térmica respecto a los moldes más modernos de calentamiento por aceite, basados en canales exteriores a través de los cuales fluye el fluido térmico.
- II. Ha sido posible la optimización del proceso de entrada y salida del fluido térmico en moldes cerrados mediante una configuración de distribuidor tipo “octopus”, que permite homogeneizar los parámetros hidráulicos de las entradas y salidas del flujo del molde, y consecuentemente los procesos térmicos del rotomoldeo. Sin embargo, la uniformidad en los moldes de calentamiento mediante aceite térmico, ya sean mediante canales o envolvente completa, es inferior al proceso de convección por aire, considerando geometrías de molde simples y según las configuraciones de entrada y salidas de flujo establecidas. Sin embargo, el molde prototipo dispone de una mejor uniformidad térmica global respecto al molde de canales exteriores.
- III. Se ha corroborado la idoneidad y eficacia de las tecnologías de “dinámica de fluidos computacional” tanto en el desarrollo del molde de rotomoldeo prototipo como en el estudio del análisis térmico e hidráulico del proceso, existiendo una gran correlación entre los resultados numéricos iniciales y los resultados experimentales obtenidos.
- IV. Como parte fundamental del molde de rotomoldeo desarrollado, se ha diseñado y fabricado de forma completa y adecuada la cavidad interior del molde, mediante el

proceso de “electroconformado”, así como el manifold mediante otras herramientas, englobadas ambas dentro de las tecnologías Rapid Tooling, y apoyadas en otras tecnologías de Fabricación Aditiva. Los resultados experimentales y las piezas rotomoldeadas muestran inequívocamente la eficacia tanto del diseño experimental del molde desarrollado como el uso de estas tecnologías, englobadas en las denominadas tecnologías de Rapid Manufacturing, aplicadas al moldeo rotacional, concretamente en la fabricación de moldes.

- V. Como parte secundaria del trabajo de investigación se ha fabricado una máquina de ensayos experimentales de rotomoldeo, apropiada y compatible con el molde desarrollado, permitiendo un completo desarrollo del proceso de moldeo rotacional así como la posibilidad de la regulación de los parámetros básicos del proceso. De esta forma se han obtenido correctamente los parámetros deseados para la caracterización del molde prototipo y del proceso desarrollado.
- VI. A partir de los resultados obtenidos en el moldeo prototipo desarrollado y los datos reales disponibles de los procesos convencionales de convección de aire en hornos, se determina que la incorporación de aceite térmico, de forma envolvente al molde prototipo, así como la fabricación de cavidades del molde mediante tecnologías de electroconformado (produciendo moldes de 1 mm de espesor), permiten obtener significativas mejoras energéticas y productivas respecto del resto de tecnologías de rotomoldeo. Los ahorros energéticos de electricidad superan, en el menor de los casos, valores superiores al 87%, además de la eliminación de consumos de combustibles y sin considerar los gastos energéticos extras implícitos únicamente en las tecnologías de rotomoldeo mediante hornos (inyección de aire en los quemadores de gas, brazos soportes del molde de mayores dimensiones, aperturas de puertas y cerramientos del horno, etc.)
- VII. El molde desarrollado permite un aumento significativo de la producción de piezas rotomoldeadas respecto a las tecnologías convencionales, en similares condiciones básicas de consumos energéticos. Por otra parte, mediante el escalado del molde es posible reproducir los procesos de rotomoldeo a mayores dimensiones así como la fabricación de piezas de diferentes geometrías, en este último caso mediante la modificación únicamente de la cavidad electroconformada de níquel.
- VIII. El molde desarrollado y su proceso de rotomoldeo operativo permite reducir las emisiones contaminantes en términos superiores al 95% en el caso del CO<sub>2</sub> y en

valores superiores al 53% para los gases SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Este hecho supone un gran avance desde el punto de vista medioambiental, permitiendo minimizar las emisiones y los efectos adversos que estas producen en el medio ambiente.

- IX. Se ha adquirido una importante experiencia en el estudio, desarrollo y control del proceso de moldeo rotacional, experimentando el mismo en un nuevo molde utilizando como medio de transferencia de calor aceite térmico, tanto en la fase de calentamiento como de enfriamiento, y de forma envolvente a todas las caras activas del molde.

## 8.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de las conclusiones obtenidas así como de las diferentes limitaciones y condicionantes establecidos originalmente en el desarrollo del este trabajo de investigación, emergen gran cantidad de posibles estudios posteriores o líneas de investigación que complementen y continúen en trabajo presentado.

Dentro del abanico de posibilidades existentes, a continuación se enumeran aquellas líneas futuras de investigación que pueden considerarse de elevado interés en el desarrollo del moldeo rotacional:

- I. *Estudio del molde prototipo con nuevos materiales poliméricos.* Resulta de interés analizar en el molde desarrollado el comportamiento de materiales utilizados más extensivamente en el rotomoldeo, tales como el polietileno, PVC, ABS, u otros.
- II. *Nuevos diseños de molde con geometrías complejas y mayores tamaños.* La geometría del molde desarrollada puede considerarse como de las más simples posibles. El estudio de geometrías más complejas puedan incrementar las mejoras térmicas, y fundamentalmente de uniformidad térmica del proceso del molde prototipo desarrollado respecto a los moldes convencionales.
- III. *Molde con múltiples caras de entradas y salidas de flujo.* El desarrollo y experimentación de nuevos moldes de rotomoldeo con múltiples entradas y salidas de aceite térmico en todas o la mayoría de las caras del molde suscita también un gran interés desde el punto de vista de la uniformidad, reducción del tiempo de ciclo y cualidades físicas de las piezas rotomoldeadas.
- IV. *Desarrollo de cavidades interiores del molde mediante electroconformado con combinación de materiales.* El níquel ha sido el material utilizado para el

electroconformado de la cavidad interior del molde. Sin embargo múltiples son las posibilidades de materiales utilizables, tales como el cromo o cobre, o combinaciones níquel-cobre, cobre-cromo o cromo-níquel, que pueden mejorar las cualidades mecánicas y/o térmicas del molde.

- V. *Estudio de las características de las piezas rotomoldeadas.* El presente trabajo de investigación podría complementarse con el estudio detallado de las piezas rotomoldeadas obtenidas, analizando todos los aspectos físicos característicos de las piezas rotomoldeadas, así como las afecciones de los diferentes variables del proceso a las cualidades de las piezas, tales como las temperaturas de calentamiento y enfriamiento, granulometría del material, tiempos del proceso, etc.
- VI. *Mejora del método de enfriamiento.* El proceso de enfriamiento dispone de gran importancia, fundamentalmente en las cualidades finales de las piezas rotomoldeadas, por lo que resulta de interés analizar los posibles sistemas de refrigeración del molde prototipo desarrollado que permitan minimizar aún más los tiempos de enfriamiento sin afectar las propiedades de las piezas rotomoldeadas.
- VII. *Desarrollo de nuevas tecnologías de calentamiento del molde.* Aún suponiendo un alejamiento de la propia filosofía del rotomoldeo, el desarrollo de técnicas más eficientes de calentamiento del molde, como los procesos de inducción, podrían reducir aún más drásticamente las necesidades energéticas así como simplificar las máquinas y procesos de rotomoldeo. Otras mejoras podrían establecerse desde calentadores de aceite de mayor eficiencia hasta el desarrollo de moldes inteligentes que produzcan el balanceo térmico necesario entre las diferentes partes del molde mediante el uso de microsensores de temperatura integrados en el mismo y sistemas avanzados de apertura o cierre de entradas y salidas de aceite térmico.
- VIII. *Software de diseño de moldes de rotomoldeo mediante aceite térmico envolvente.* La creación de softwares específicos de fácil y rápido manejo, que optimicen la configuración de entradas-salidas del aceite en el interior del molde en función de la uniformidad térmica o la reducción del tiempo de ciclo, mejoraría la competitividad de la tecnología y la reducción de costes de fabricación de moldes y utillajes.
- IX. *Desarrollo industrial de la tecnología.* Finalmente, se requeriría de la mejora continua en el desarrollo del moldeo rotacional mediante aceite térmico, tanto de los moldes como de los utillajes y elementos auxiliares, con el fin afianzar la tecnología y desarrollarla a nivel industrial, incluso con la incorporación de nuevos fluidos como los líquidos iónicos y compuestos similares.



## *Referencias*



## REFERENCIAS

## CAPÍTULO II

- [1] *R. J. Crawford*, "Rotational Moulding of Plastics". John Wiley & Sons Inc. New York, 1996.
- [2] *A Marcilla, J.C. García, R. Ruiz, S.Sanchez, C. Vargas and M.I.Beltrán*, "Rotational Moulding of PVC Plastics", Intern. Polym.Process.
- [3] *Glenn L. Bell*, "Rotational Molding. Design, Materials, Tooling and Processing" Hanser, Munich, 1998.
- [4] *Jim Lesko*. Industrial design: materials and manufacturing guide. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2008.
- [5] *M. Kontopoulou and J. Vlachopoulos*, "Melting and Densification of Thermoplastic Powders", Polym. Eng. Sci., Vol. 41, (2), 2001.
- [6] *Roy J. Crawford and Mark P. Kearns*. Practical Guide to Rotational Moulding. Rapra Technology Limited, 2003.
- [7] *Abdullah, M.Z.; Bickerton, S.; Bhattacharyya*. Rotational Molding Cycle Time Reduction Through Surface Enhanced Molds: Part A – Theoretical Study. Polymer Engineering & Science, 2007.
- [8] *Callan, N., Kearns, M.P., Spencer, M. And Crawford, R.J*. Effects of Cooling Rate on the Mechanical Properties of Rotationally Moulded Polyethylene Parts. Proc. ANTEC 2003. Plastics Annual Technical.
- [9] *Daly, C., Kearns, M.P., and Crawford R.J*. "The Effect of Direct Electrical Heating on the Cycle Time and Mechanical Properties of Rotationally Moulded Polyethylene Parts". Proc. ANTEC, 2003. Plastics Annual Technical.
- [10] *Michael J Wright, Roy Crawford*. Oil Heating and Cooling Machines for the Rotational Moulding of Plastic. ANTEC, 2003. Plastics Annual Technical.
- [11] *Jared A. Sunday*. "Development of a rotational molding machine with integral heating and cooling passages within the mold". Proc. ANTEC 2000. Plastics Annual Technical. Pennsylvania State University, The Behrend College, Erie, PA
- [12] *Monzón, M., Benítez Vega, Benítez, A.N, Hernández, P.M, Marrero, M.D., Álvarez M.A., Kearns, M.*, "An innovative electroforming process for oil heated rotational moulding tools", Proceedings of the 9<sup>th</sup> Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA 2008, Israel.

**CAPÍTULO III**

- [1] *Robert L. Mott*. Mecánica de Fluidos. Sexta Edición. Pearson Educación. México, 2006.
- [2] *J.J. Chattot*. Computational Aerodynamics and Fluids Dynamics. Springer, 2002.
- [3] *P. Wesseling*. Principles of Computacional Fluid Dynamics. Springer, 2001.
- [4] *Miguel Cerrolaza*. El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Venezuela, 2007.
- [5] *O.C. Zienkiewicz*. The Finite Element Method. McGraw-Hill Book Company. UK, 2007.
- [6] *Glenn. L. Beall*. Rotacional Molding. Desing, Material, Tooling, and Processing. Hanser/Gardner Publications, Inc. Munich, 1998.
- [7] FERRY RotoSpeed Product Especification. Ferry Industries. Ohio, UUEE. 2011
- [8] *Michael J. Wright, Alvin G. Spence and Roy J.Crawford*. An Analysis of Heating Efficiency in Rotational Moulding. Antec 1997.
- [9] Material Database EFD.lab. 8.1. NIKA GMBH. 2009
- [10] *A. N. Benítez*. Definición del proceso y estudio del comportamiento de los electrodos para EDM fabricados mediante técnicas de Prototipado Rápido (RP) y procedimientos de Electroconformado (EF). Tesis Doctoral. ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, 2005.

**CAPÍTULO IV**

- [1] *A. N. Benítez*. Definición del proceso y estudio del comportamiento de los electrodos para EDM fabricados mediante técnicas de Prototipado Rápido (RP) y procedimientos de Electroconformado (EF). Tesis Doctoral. ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, 2005.
- [2] *R.J. Crawford and J.L. Throne*. Rotational Molding Technology. Plastics design Library. William Andrew Publishing. Páginas 156 – 158. 2002 Norwich, New York
- [3] *M. Monzón, P. M. Hernández, A. N. Benítez y M. D. Alemán*. Fabricación de Prototipos mediante técnicas FDM. Plast' 21. Vol. 96. Octubre 2001.
- [4] *Hernández Castellano, Pedro M*. Simulación y ensayo de moldes rápidos utilizando técnicas de prototipado rápido y electroconformado. Aplicación a la inyección de termoplásticos. Tesis doctoral. ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, 2003.
- [5] *Marrero Alemán, M<sup>a</sup> Dolores*. Estudio del proceso de electroconformado para la fabricación de moldes rápidos (RT). Caracterización mecánica de los insertos de níquel para su aplicación a la inyección de termoplásticos. Tesis doctoral. ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, 2003.

- [6] *Ángel Fernández Cuello, Mario Monzón Verona*. Guía de tecnologías de rapid manufacturing. Asociación Española de Rapid Manufacturing. Documenta Universitaria, 2006
- [7] *Bordón Pérez, Pablo R.* Rediseño, análisis, fabricación y ensayo de los. Componentes de una bomba para la extracción de agua de pozo. Proyecto Fin de Carrera. ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, 2007.
- [8] *T. Hart, A. Watson*. Electroforming. Nickel Development Institute. Toronto, 2000.
- [9] *Paradis, R.*, A cost/benefit análisis of aluminum and Direct Aim stereolithography tooling. University of Massachusetts Lowell, 1998.
- [10] MTT Technologies Group. Further MTT Vacuum Casting. [www.mtt-group.com](http://www.mtt-group.com)
- [11] Stratasy INC. Material Data Sheet P400 (ABS)
- [12] Ferro RC-PS. Material Data Sheet 62000007 Ag Leitsilber 200.
- [13] Protojewel. Techjewel Servicio de impresión tridimensional 2007. Part report fabrication F-900448
- [14] EOS GmbH - Electro Optical Systems. Partr eport fabrication EOSIN P 42195

## CAPÍTULO V

- [1] *Anthony J. Wheeler, Ahmad R. Ganji*. Introduction to Engineering Experimentation. Third Edition. Pearson Higher Education. New Yersey, 2010.
- [2] *Hilbert Schenck*. Theories Of Engineering Experimentation. McGraw-Hill, Inc. EEUU, 1979.
- [3] *Glenn. L. Beall*. Rotacional Molding. Desing, Material, Tooling, and Processing. Hanser/Gardner Publications, Inc. Munich, 1998.
- [4] *Jim Lesko*. Industrial design: materials and manufacturing guide. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2008.
- [5] *Michael J Wright, Roy Crawford*. Oil Heating and Cooling Machines for the Rotational Moulding of Plastic. ANTEC, 2003
- [6] *R.J. Crawford and J.L. Throne*. Rotacional Molding Technology. Plastics design Library. William Andrew Publishing. 2002 Norwich, New York.
- [7] *Roy J. Crawford and Mark P. Kearns*. Practical Guide to Rotacional Moulding. Rapra Technology Limited, 2003.
- [8] Thermocouple EL-UDB-TC Data Sheet. Lascar Electronics Ltd. United Kingdons, 2010
- [9] RS Digital Thermometre and thermocouples Data Sheet. Amidata S.A. España, 2010
- [10] Hoja de propiedades SM-OIL TEMPLE. SMYTH-MORRIS. KALON, S.A. España, 2010.
- [11] Nota técnica ALCUDIA® PA-538. Repsol YPF, 2003.

**CAPÍTULO VI**

- [1] *Kalyanjit Ghosh*. Thesis: Thermal models and energy saving strategies for rotational molding operations. Georgia Institute of Technology, 2004.
- [2] *R.J. Crawford and J.L. Throne*. Rotational Molding Technology. Plastics design Library. William Andrew Publishing. 2002 Norwich, New York.
- [3] *Glenn. L. Beall*. Rotacional Molding. Desing, Material, Tooling, and Processing. Hanser/Gardner Publications, Inc. Munich, 1998.
- [4] Rotosim®. Queen's University. Belfast, 2003.

**CAPÍTULO VII**

- [1] *M.J. Wright, A.G. Spence, y R.J. Crawford*. An Analysis of Heating Efficiency in Rotational Moulding,. SPE ANTEC Tech. Papers, (1997)
- [2] Ferry Industries, INC. Stow, Ohio.
- [3] *Mark Kearns*. Rotational Moulding Manager. Queen's University Belfast. N. Ireland.
- [4] *Wright, M.J., y Crawford R.J.*, 2003, "Oil Heating and Cooling Machines for the Rotational Moulding of Plastics." Proc. ANTEC 2003 Plastics Annual Technical Conference, Nashville, USA. 1, pp. 1216-1221.
- [5] *Jared A. Sunday*. "Development of a rotational molding machine with integral heating and cooling passages within the mold". Proc. ANTEC 2000 Plastics Annual Technical. Pennsylvania State University, The Behrend College, Erie, PA
- [6] Persico spA. 2008. Nembro (BG), Italia.
- [7] Informe Anual 2010 del Observatorio de la Electricidad. WWF España

*Anexo*

**GRÁFICAS DE TEMPERATURAS Y UNIFORMIDADES DE CONFIGURACIONES DE ENTRADA Y SALIDA DE ACEITE DEL MOLDE PROTOTIPO.**

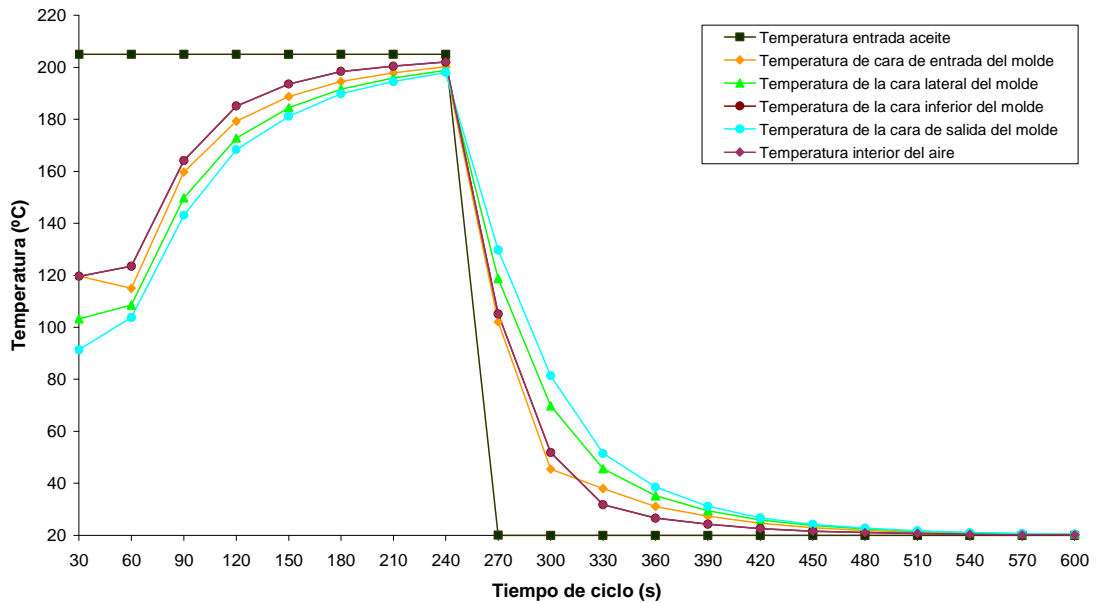




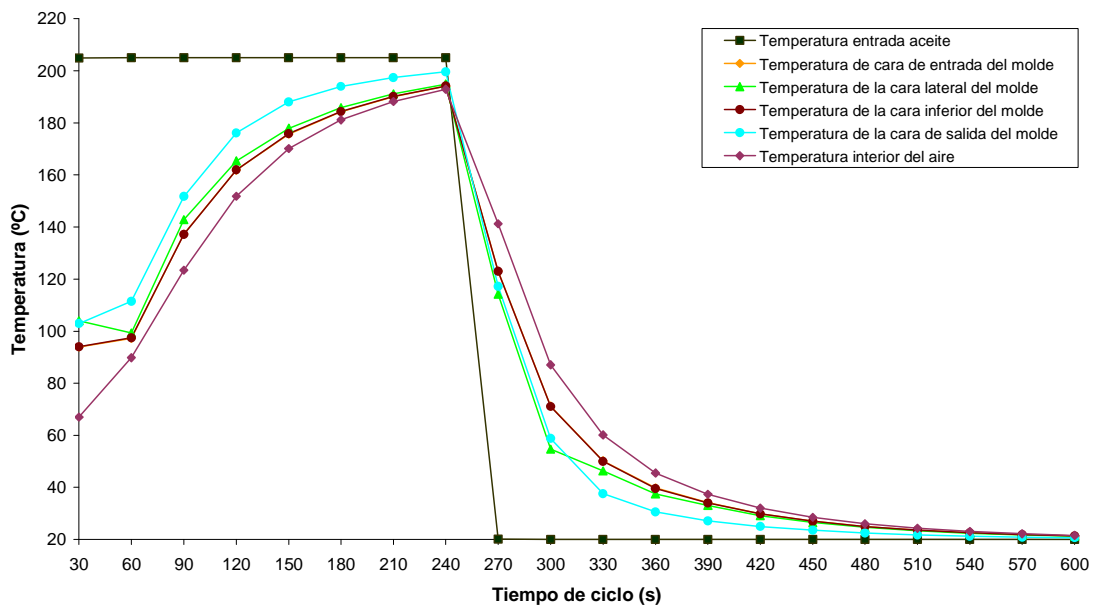
## ANEXO. GRÁFICAS DE TEMPERATURAS Y UNIFORMIDADES DE CONFIGURACIONES DE ENTRADA Y SALIDA DE ACEITE DEL MOLDE PROTOTIPO.

### 1. GRÁFICAS DE TEMPERATURAS DE CONFIGURACIONES DE ENTRADA Y SALIDA DE ACEITE DEL MOLDE PROTOTIPO.

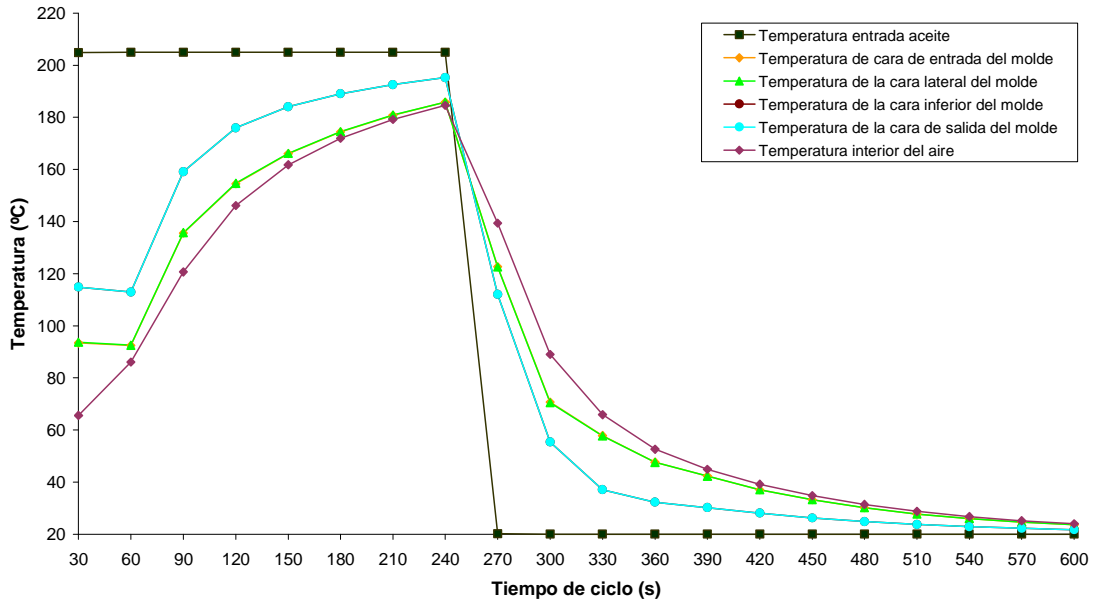
Configuración de 1 entrada y 1 salida en caras opuestas



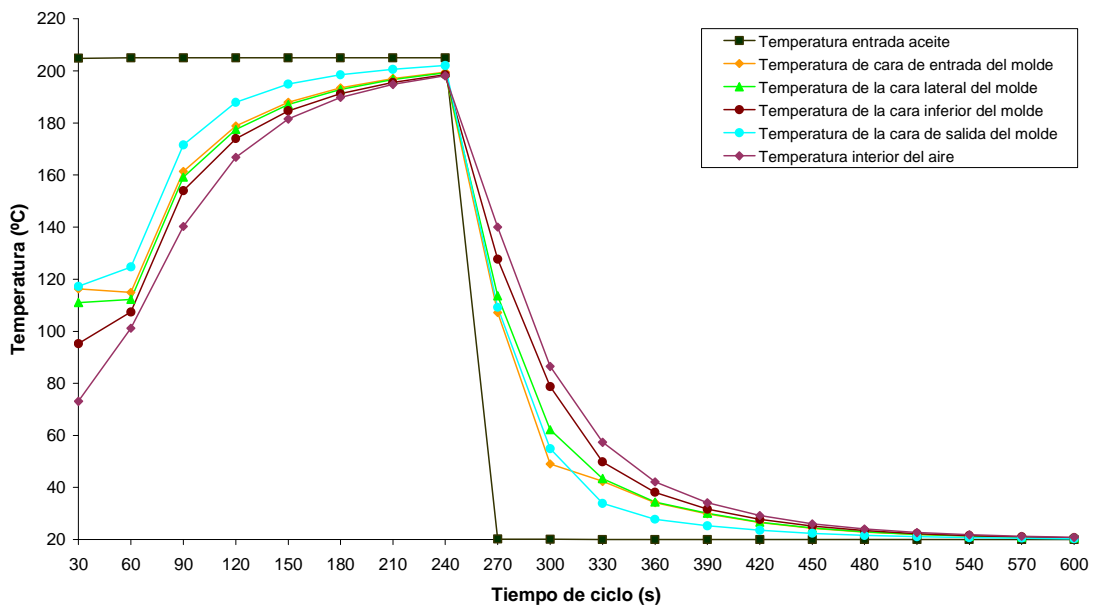
Configuración de 2 entradas en caras enfrentadas y 2 salidas en caras enfrentadas y opuestas



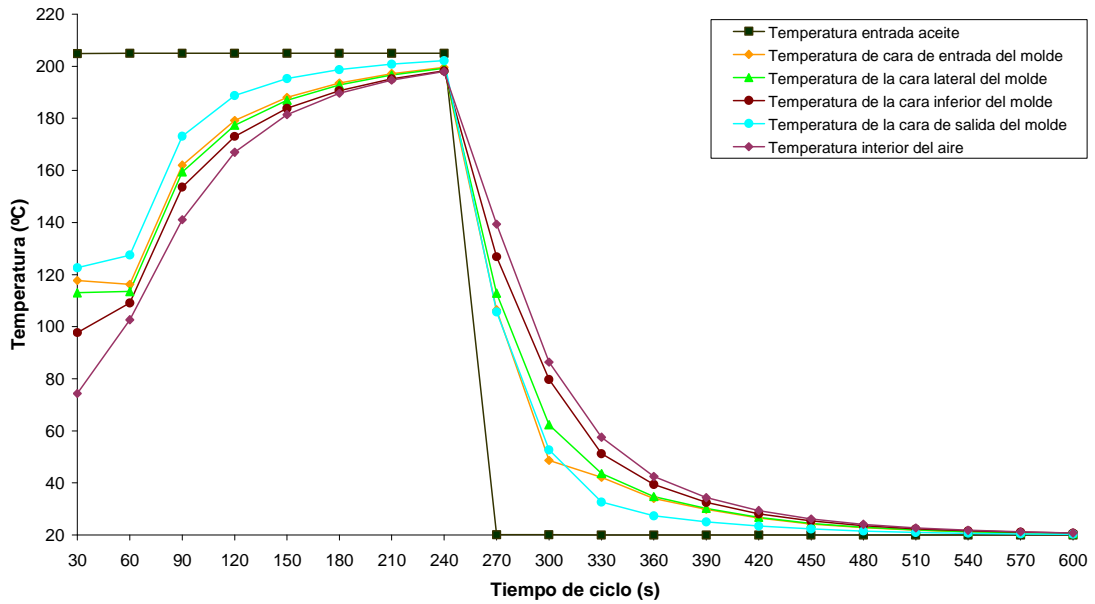
**Configuración de 4 entradas en caras enfrentadas y 1 salida en cara inferior**



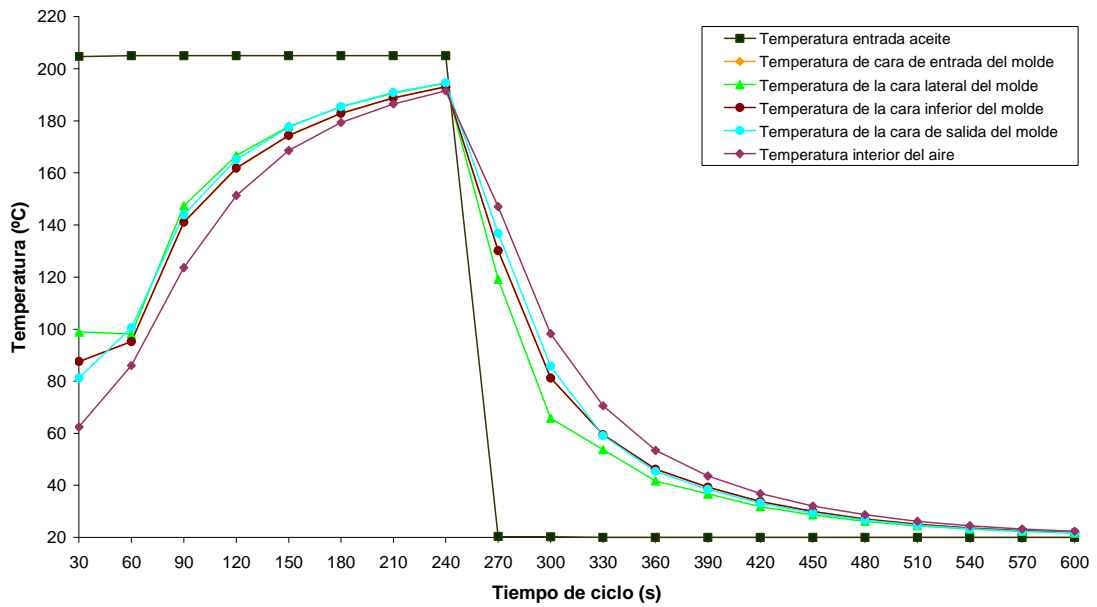
**Configuración de 7 entradas superiores y 15 salidas superiores en cara opuesta**



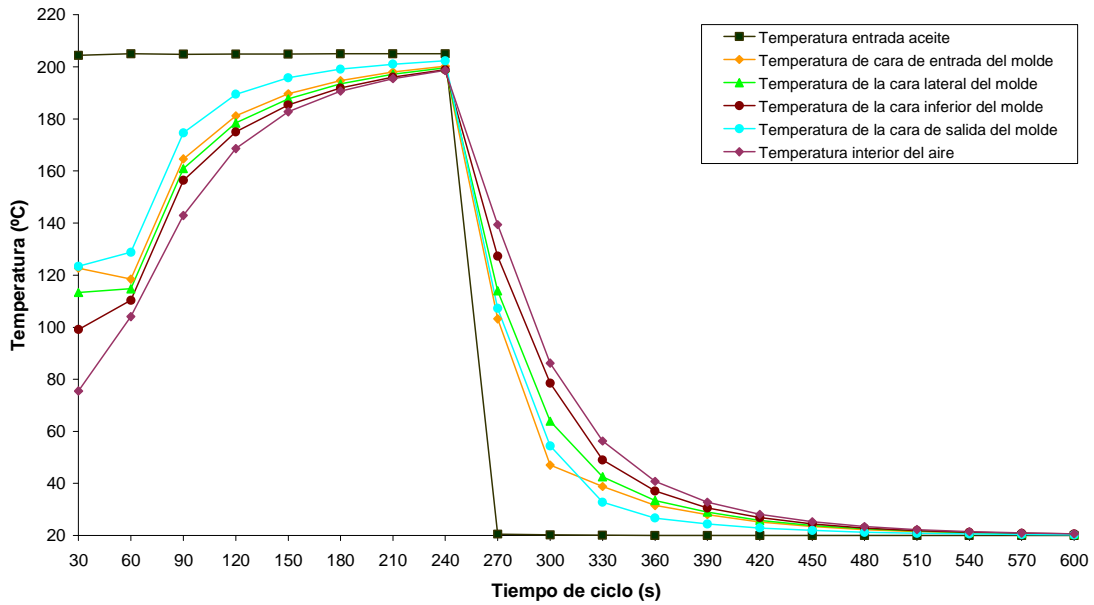
**Configuración de 7 entradas superiores y 15 salidas inferiores en cara opuesta**



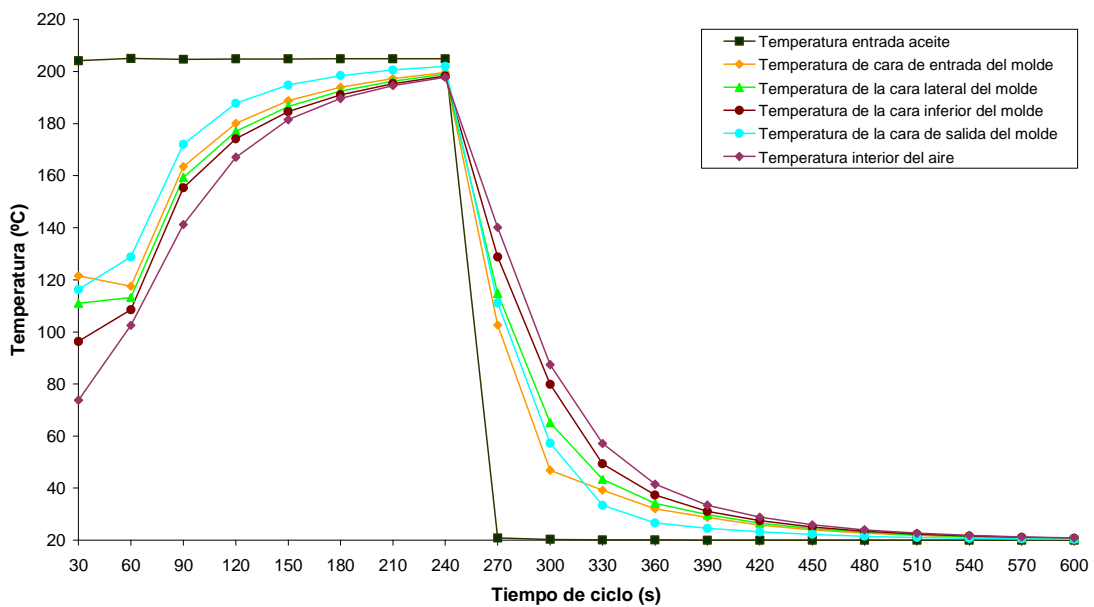
**Configuración de 14 entradas en caras enfrentadas y 14 salidas en caras enfrentadas y opuestas**



**Configuración de 15 entradas superiores y 15 salidas superiores en caras opuestas**

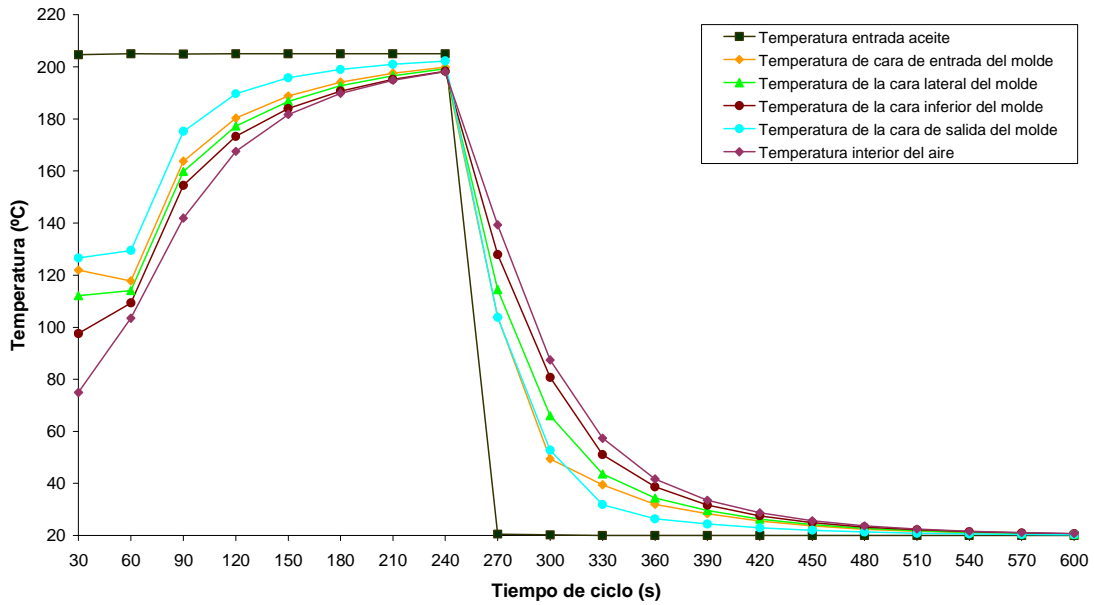


**Configuración de 15 entradas superiores y 15 salidas superiores en caras opuestas canal inferior 10 mm**

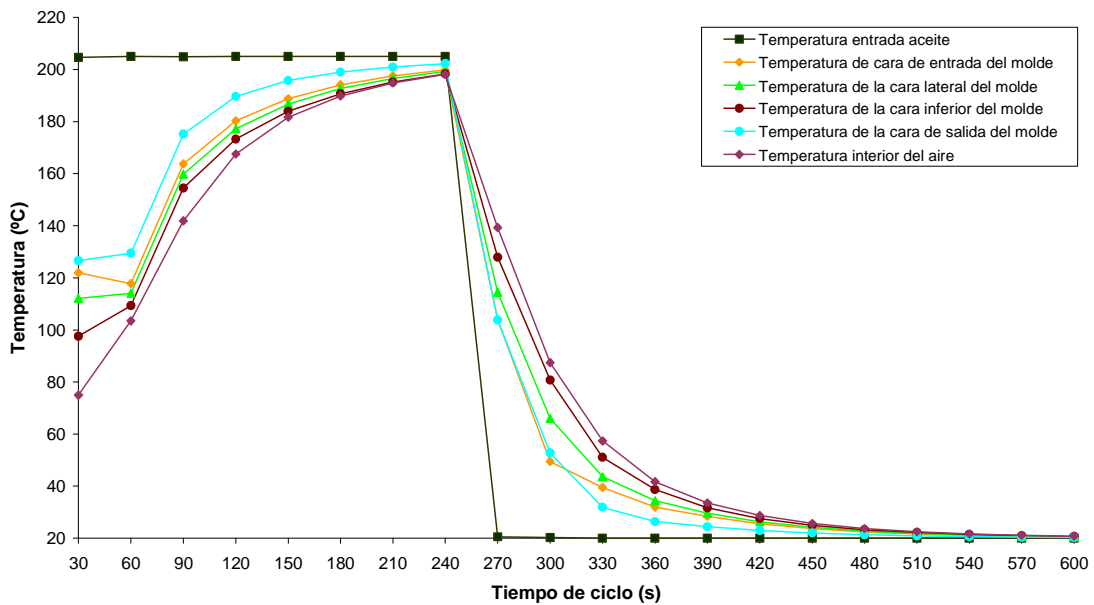




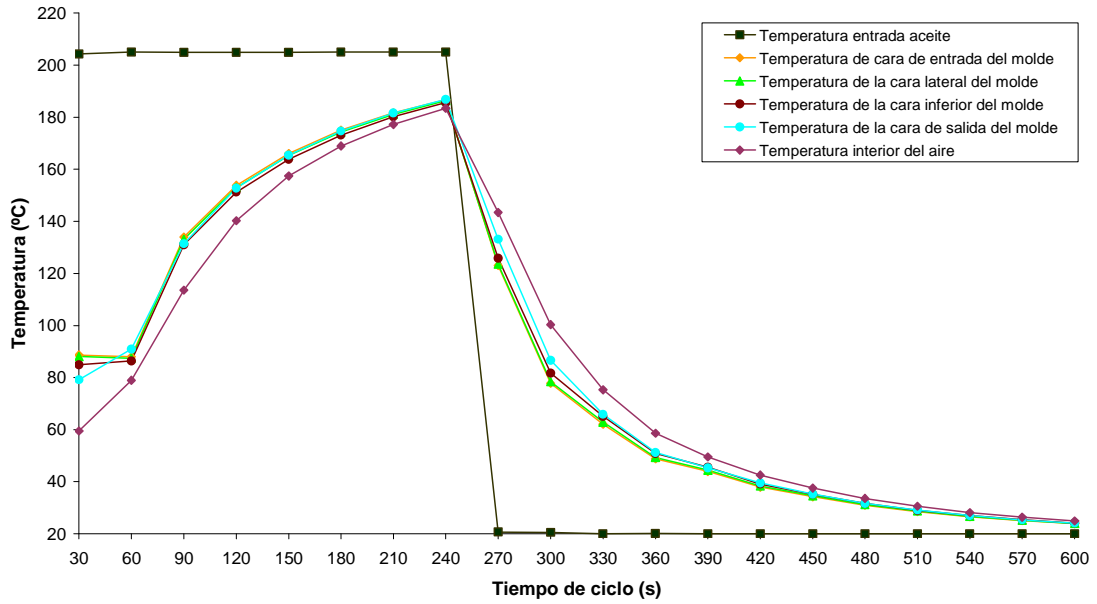
**Configuración de 20 entradas superiores y 15 salidas superiores en caras opuestas**



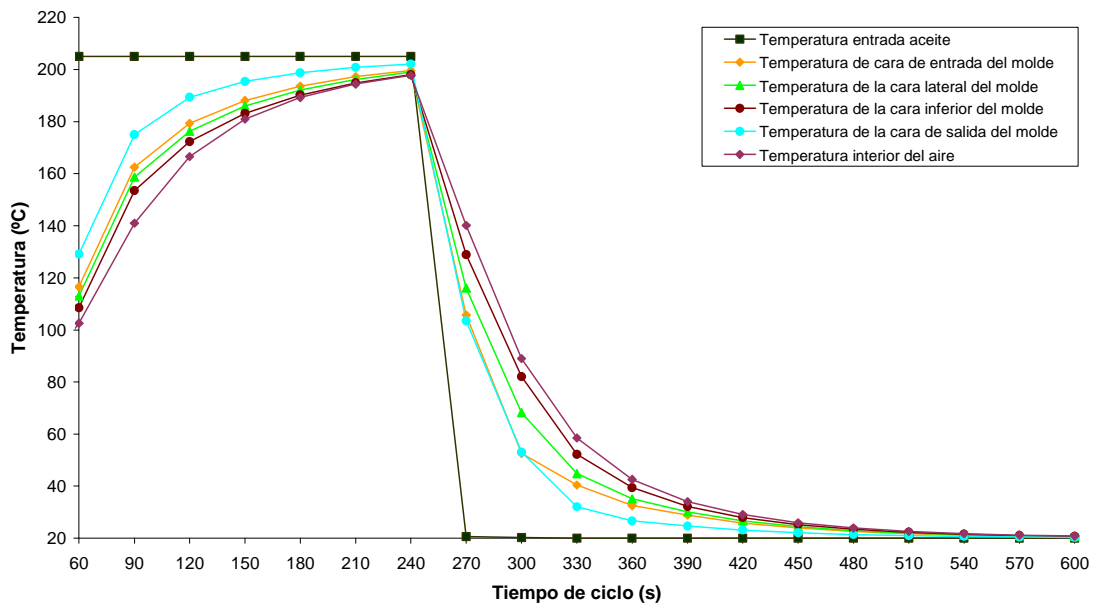
**Configuración de 20 entradas superiores y 25 salidas en caras opuestas**



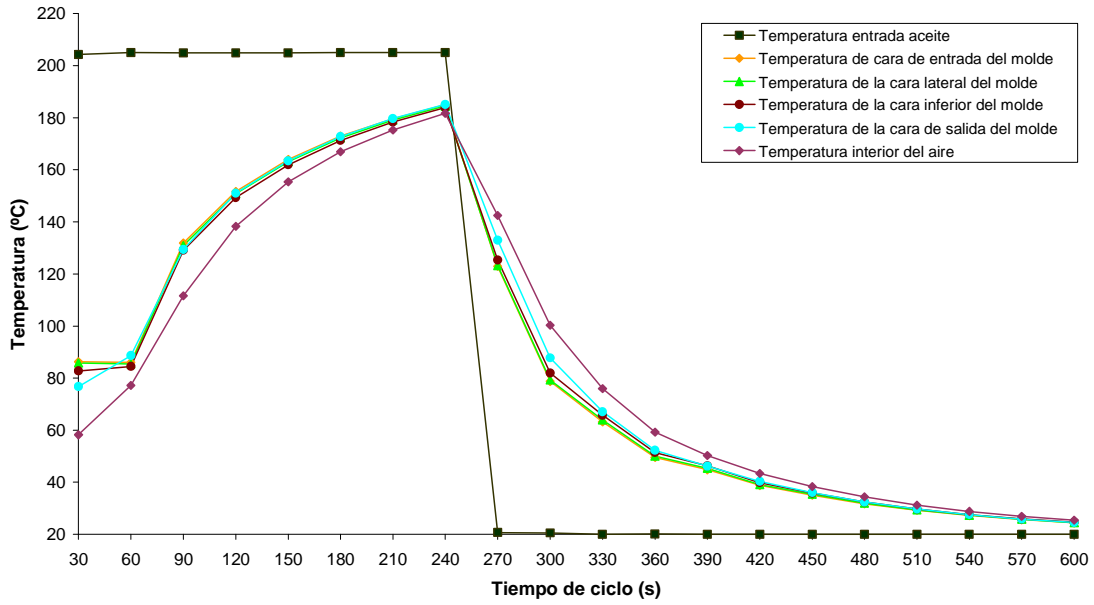
### Configuración de 32 entradas en 4 caras y 4 salidas en 4 caras



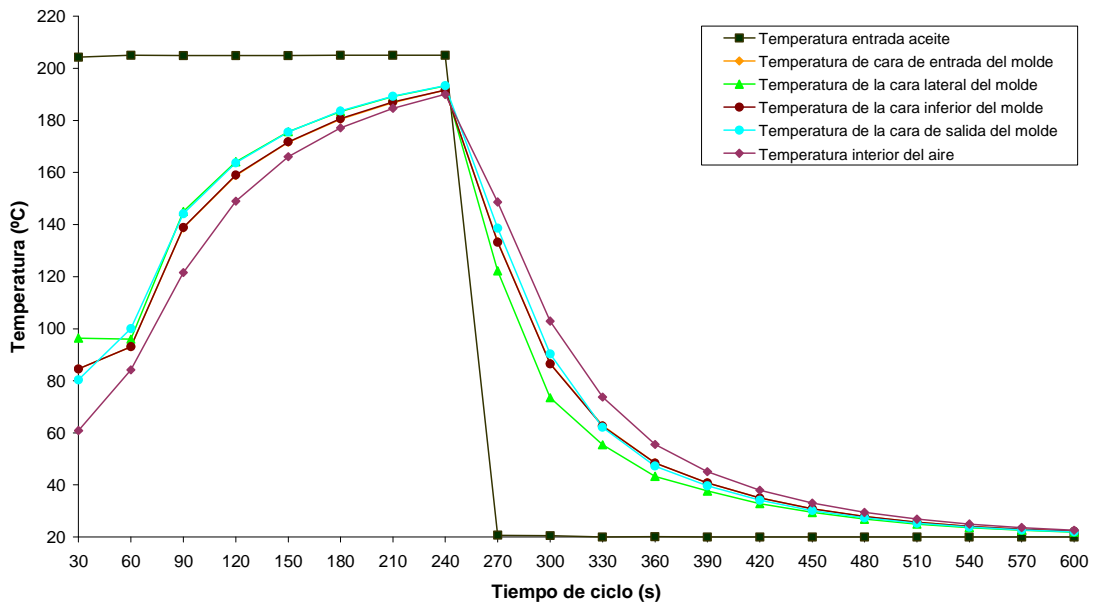
### Configuración de 25 entradas y 25 salidas en caras opuestas



**Configuración de 36 entradas en 4 caras y 16 salidas en 4 caras**

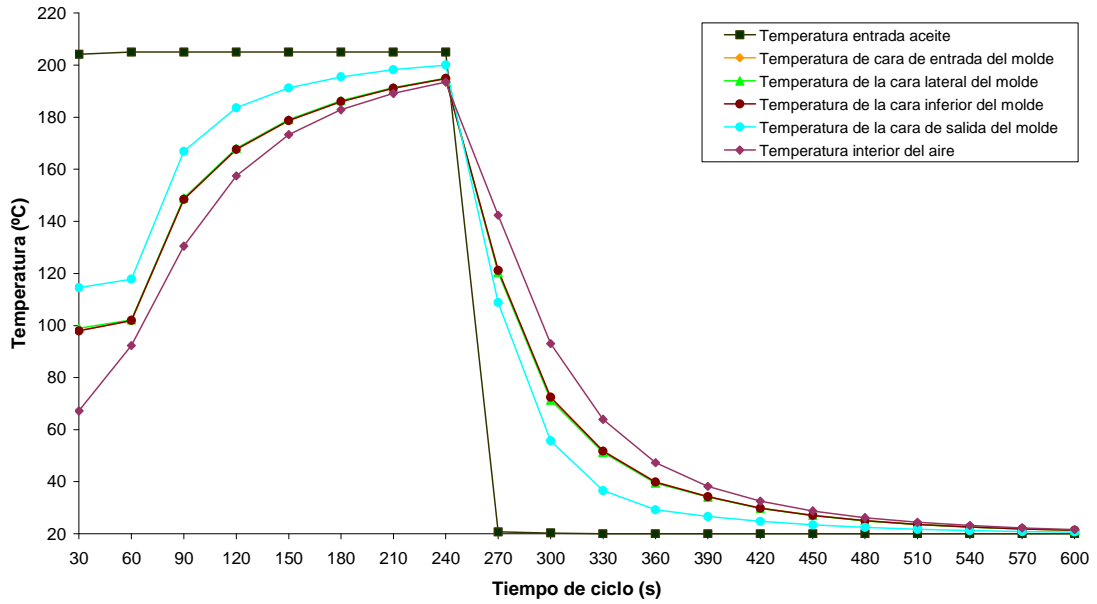


**Configuración de 30 entradas superiores en caras enfrentadas y 30 salidas superiores en caras enfrentadas y opuestas**

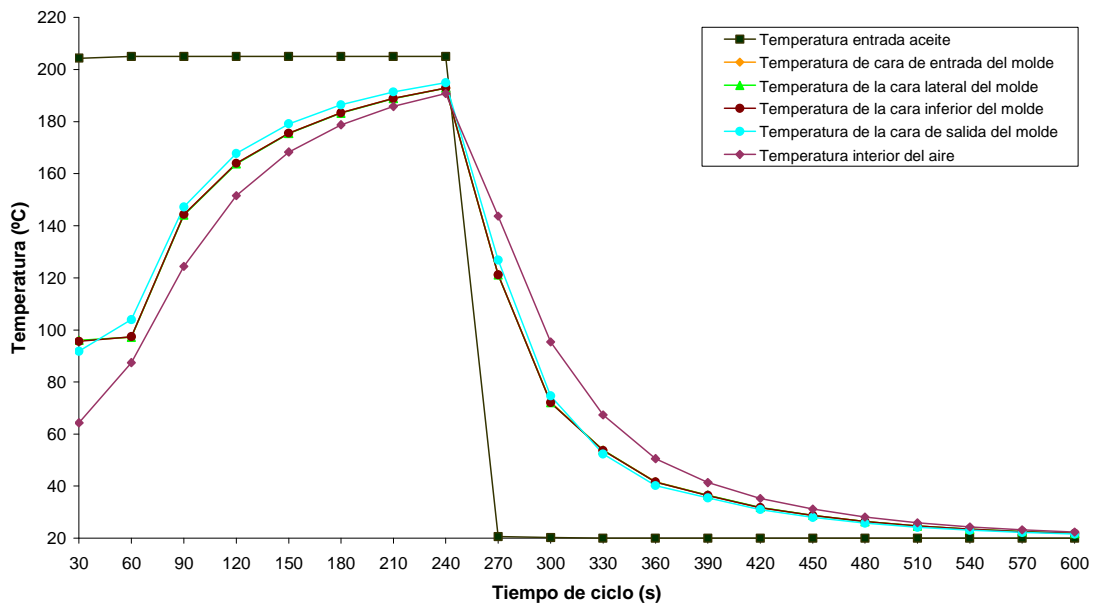




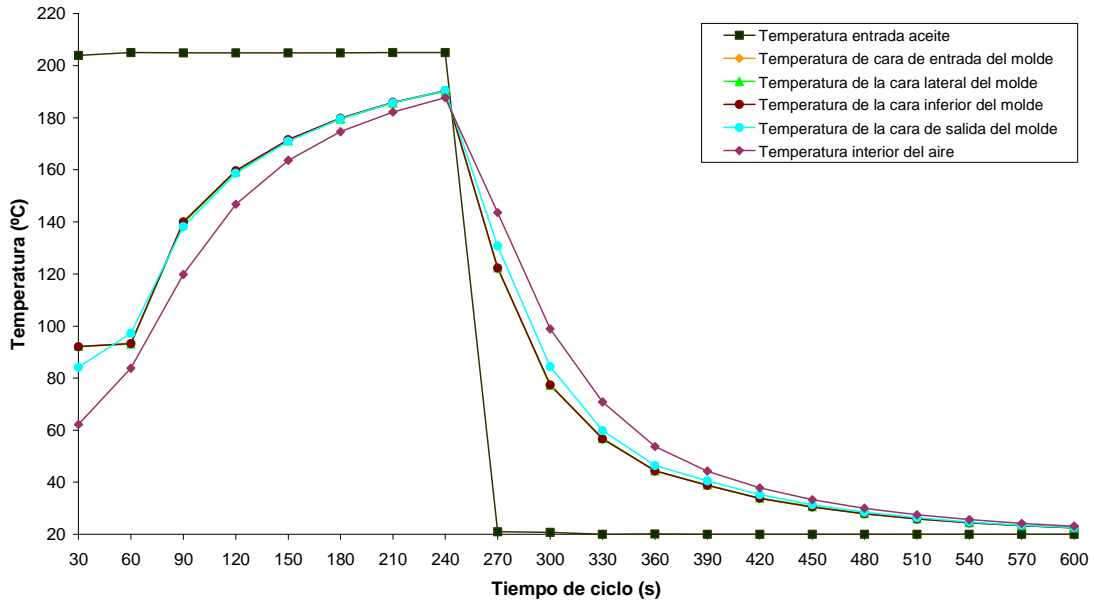
### Configuración de 40 entradas en 5 caras y 40 salidas en 5 caras



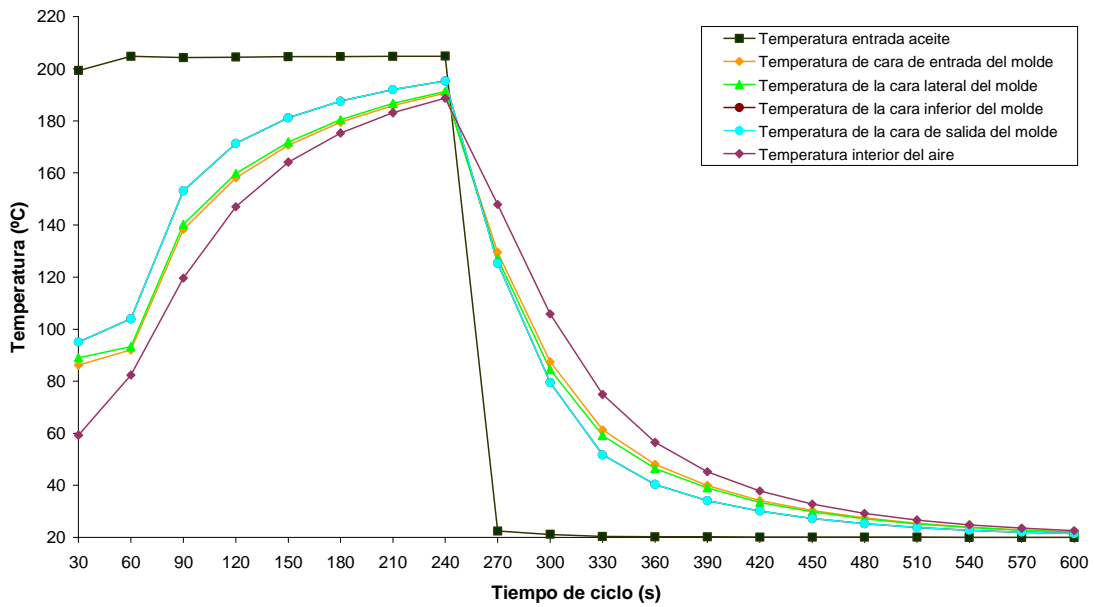
### Configuración de 32 entradas en 4 caras y 32 salidas en 4 caras



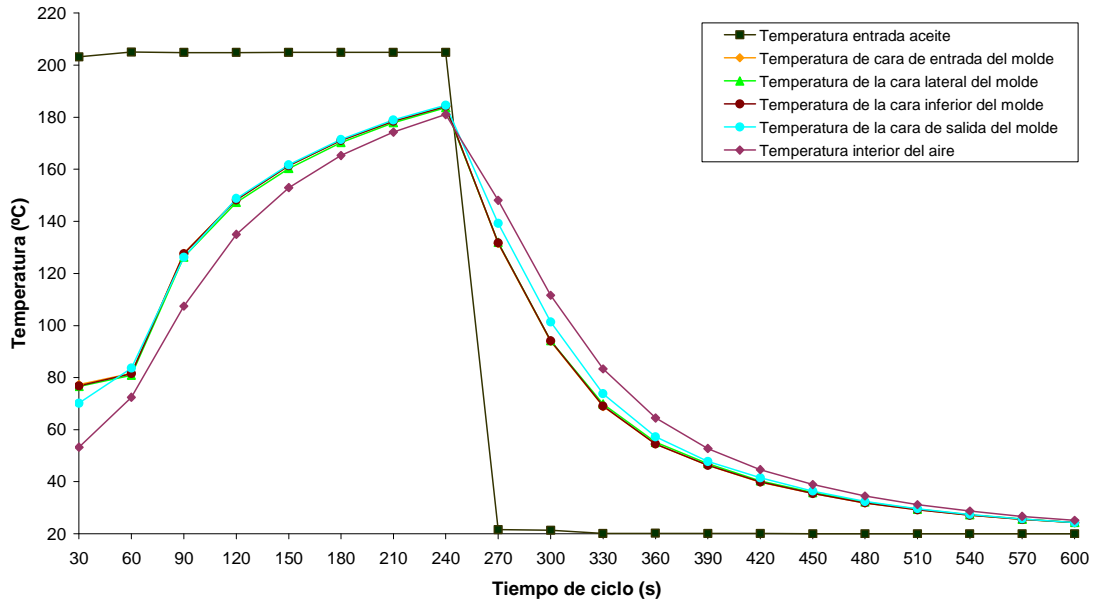
**Configuración de 50 entradas en 4 caras y 50 salidas en 4 caras**



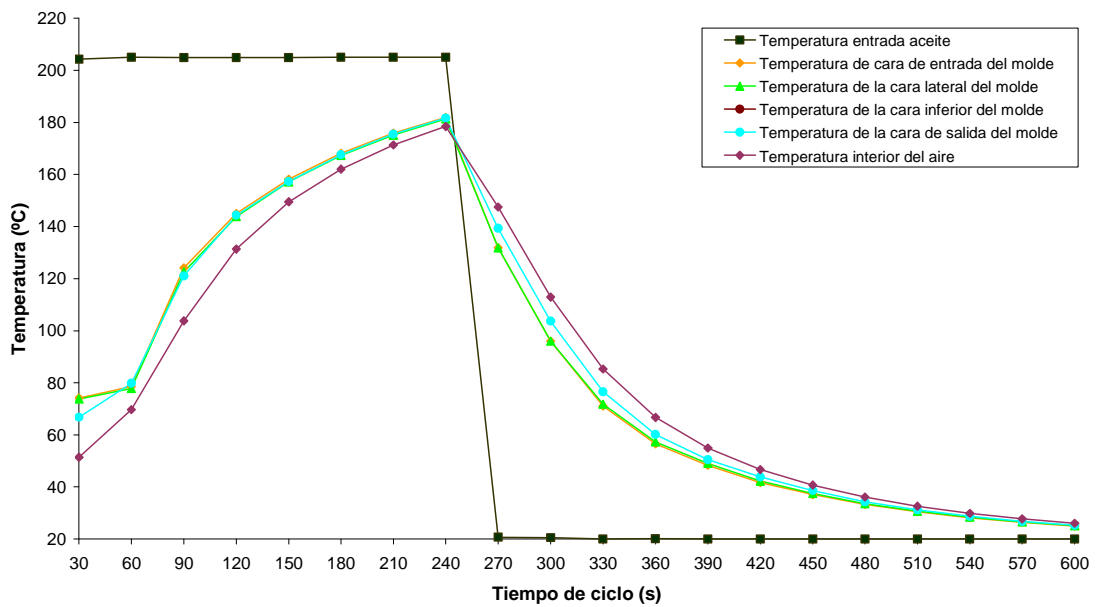
**Configuración de 64 entradas en 4 caras y 16 salidas en cara inferior**



### Configuración de 84 entradas en 4 caras y 16 salidas en 4 caras

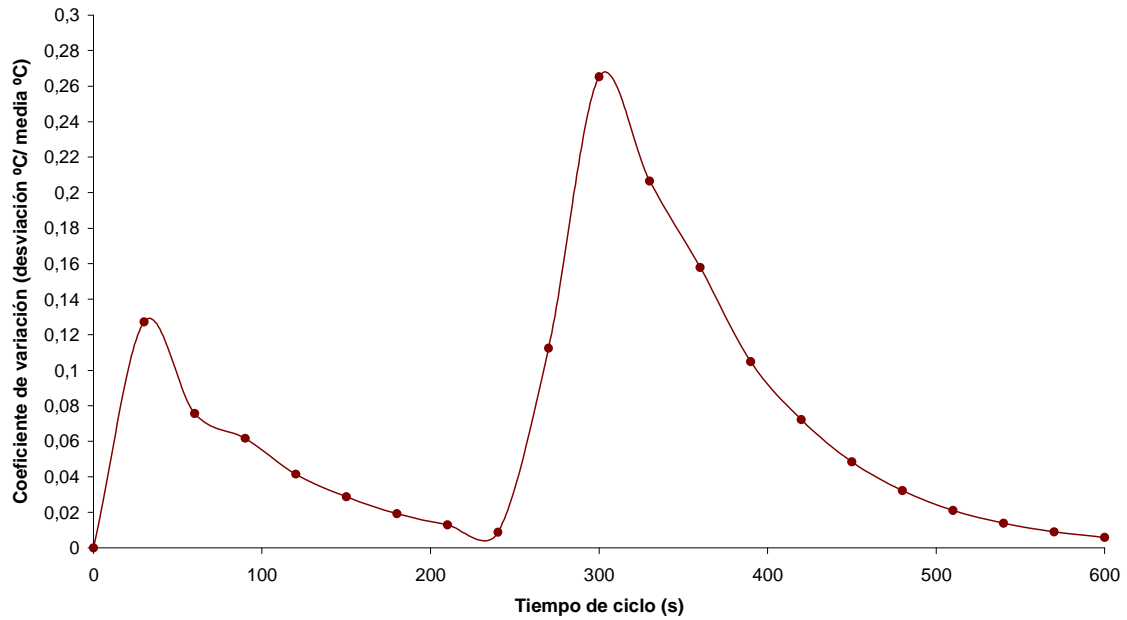


### Configuración de 96 entradas en 4 caras y 4 salidas en 4 caras

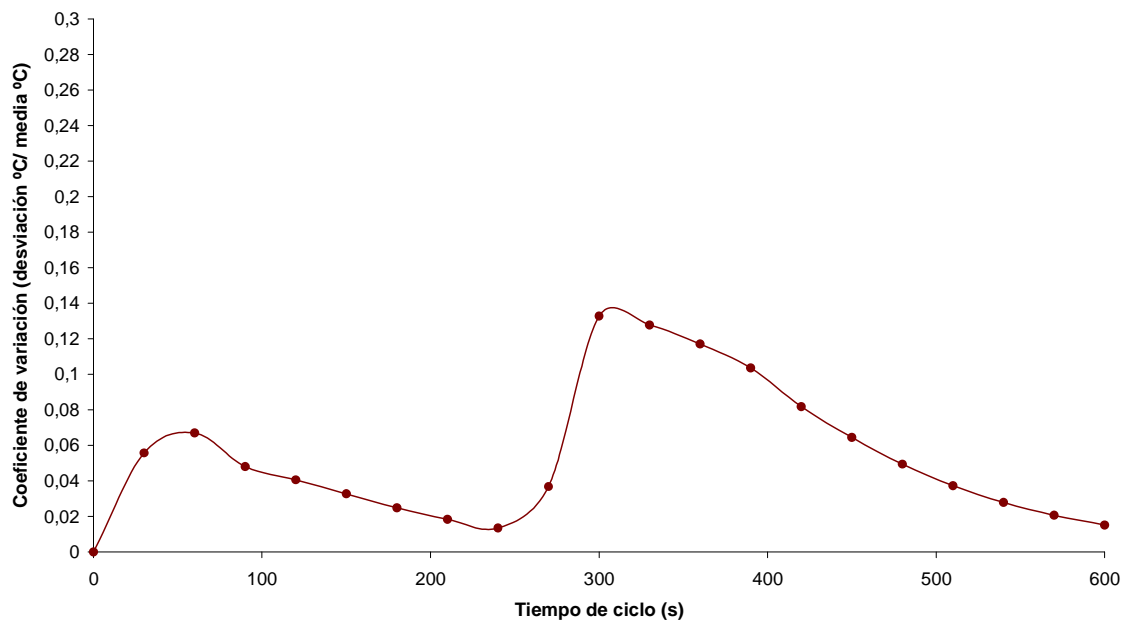


**2. GRÁFICAS DE UNIFORMIDADES DE CONFIGURACIONES DE ENTRADA Y SALIDA DE ACEITE DEL MOLDE PROTOTIPO.**

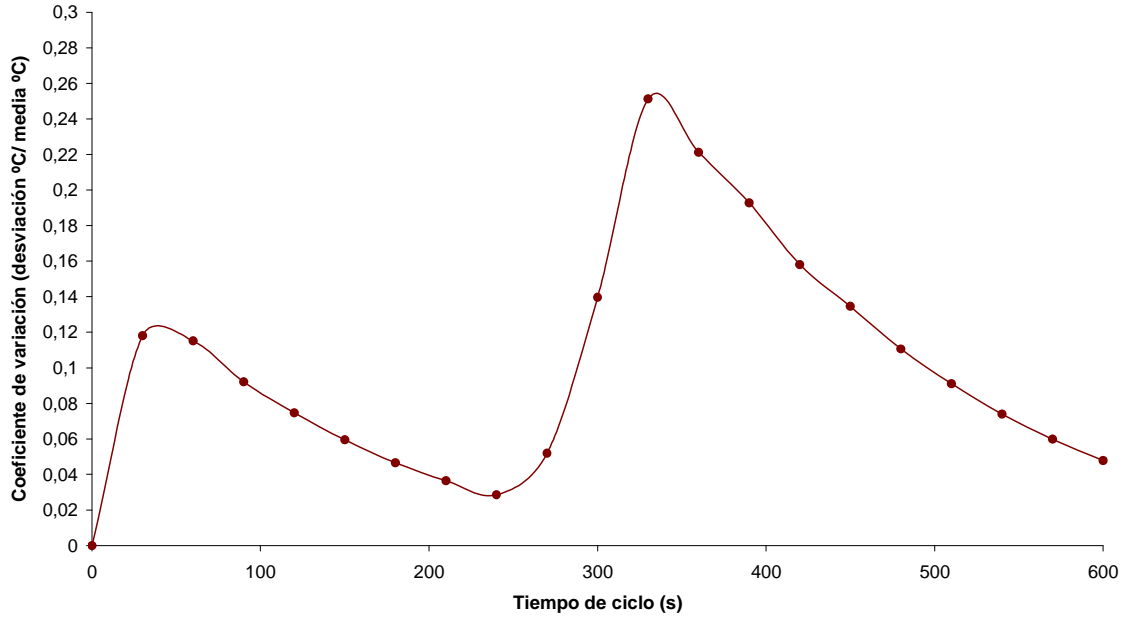
**Configuración de 1 entrada y 1 salida en caras opuestas**



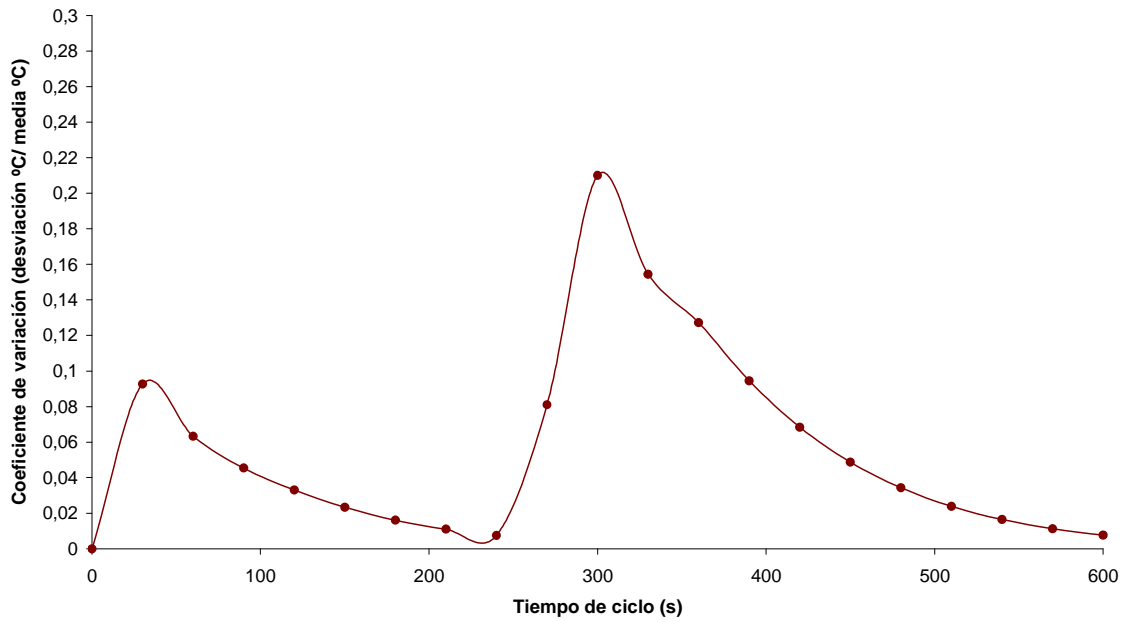
**Configuración de 2 entradas en caras enfrentadas y 2 salidas en caras enfrentadas y opuestas**



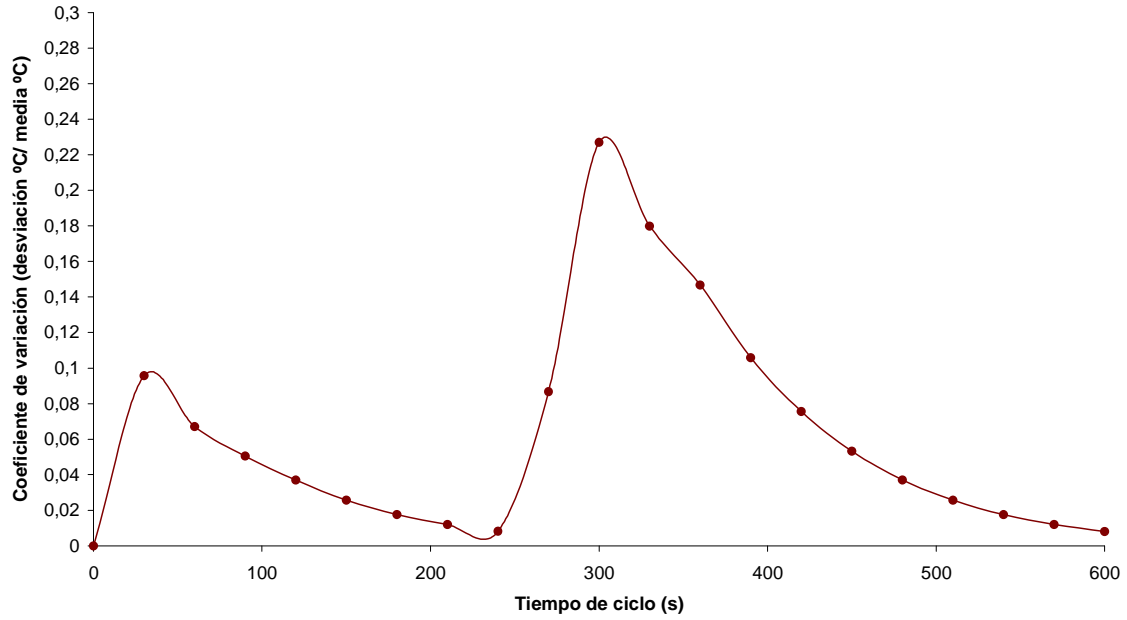
**Configuración de 4 entradas en caras enfrentadas y 1 salida en cara inferior**



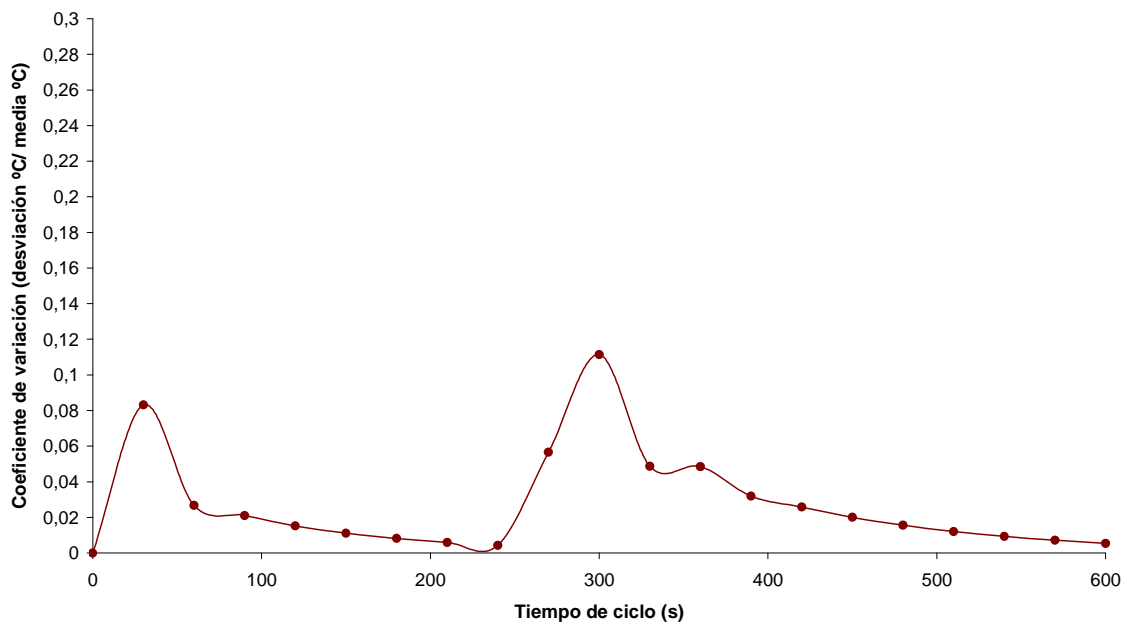
**Configuración de 7 entradas superiores y 15 salidas superiores en cara opuesta**



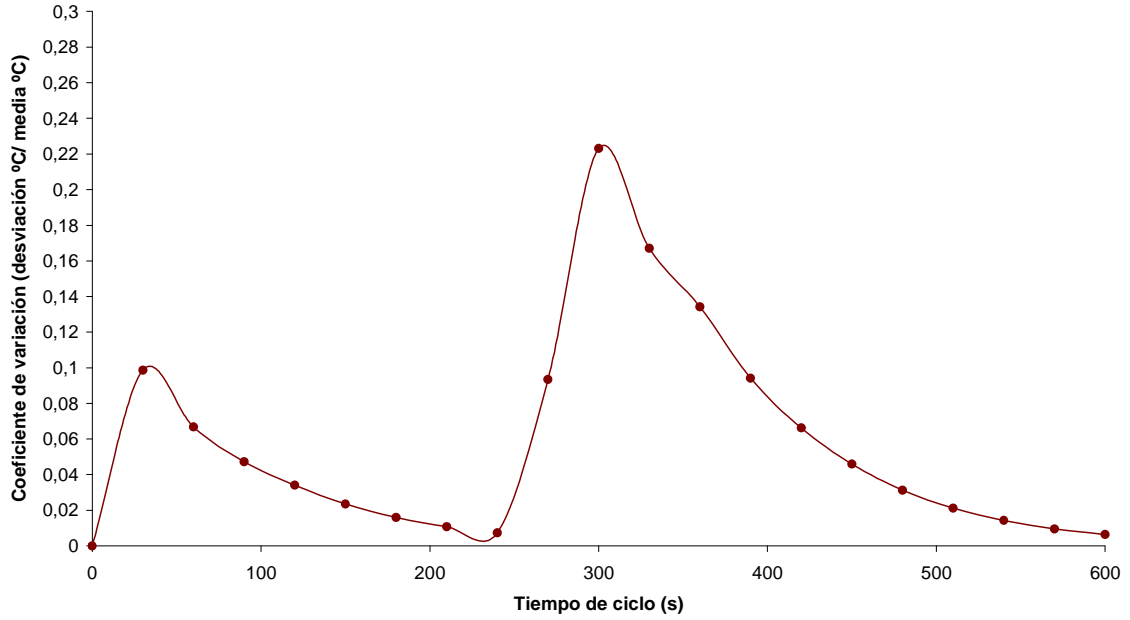
**Configuración de 7 entradas superiores y 15 salidas inferiores en cara opuesta**



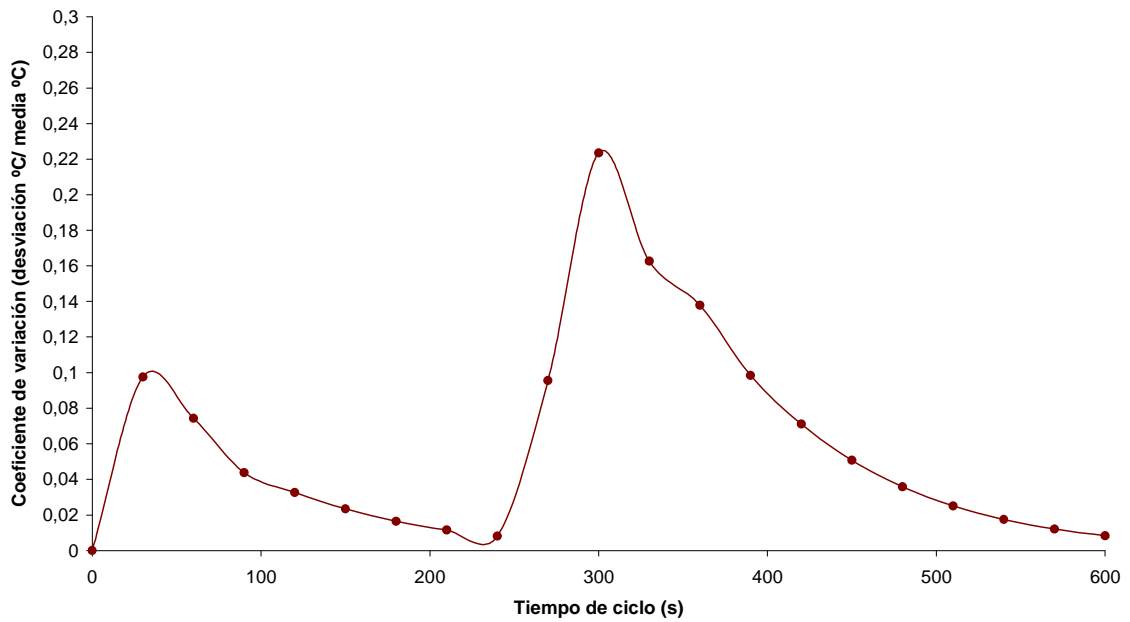
**Configuración de 14 entradas en caras enfrentadas y 14 salidas en caras enfrentadas y opuestas**



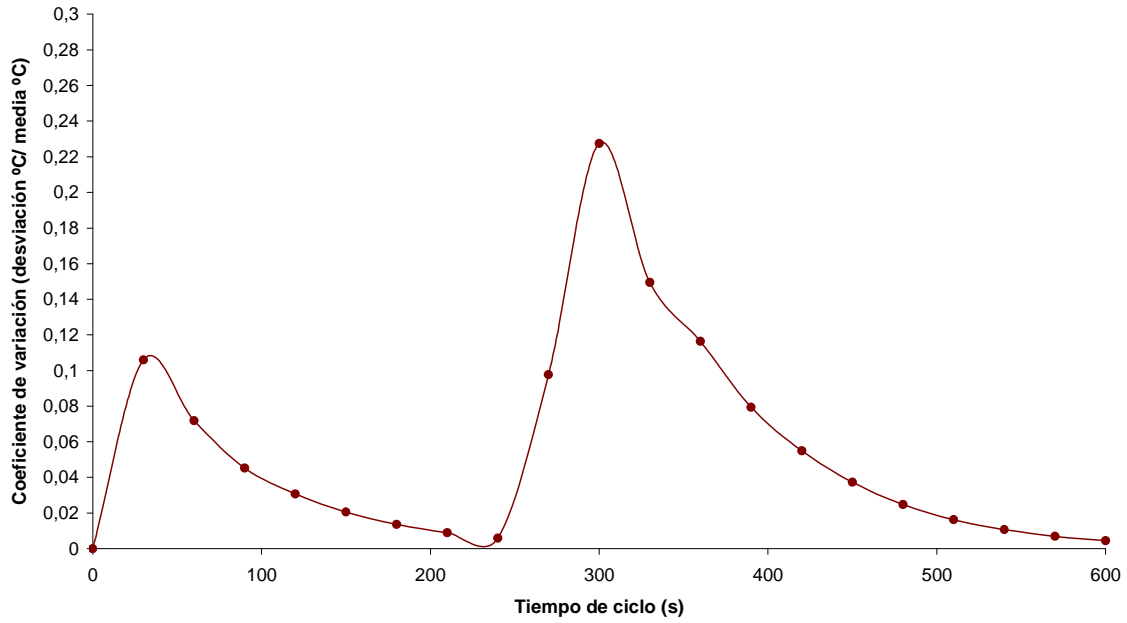
**Configuración de 15 entradas superiores y 15 salidas superiores en caras opuestas**



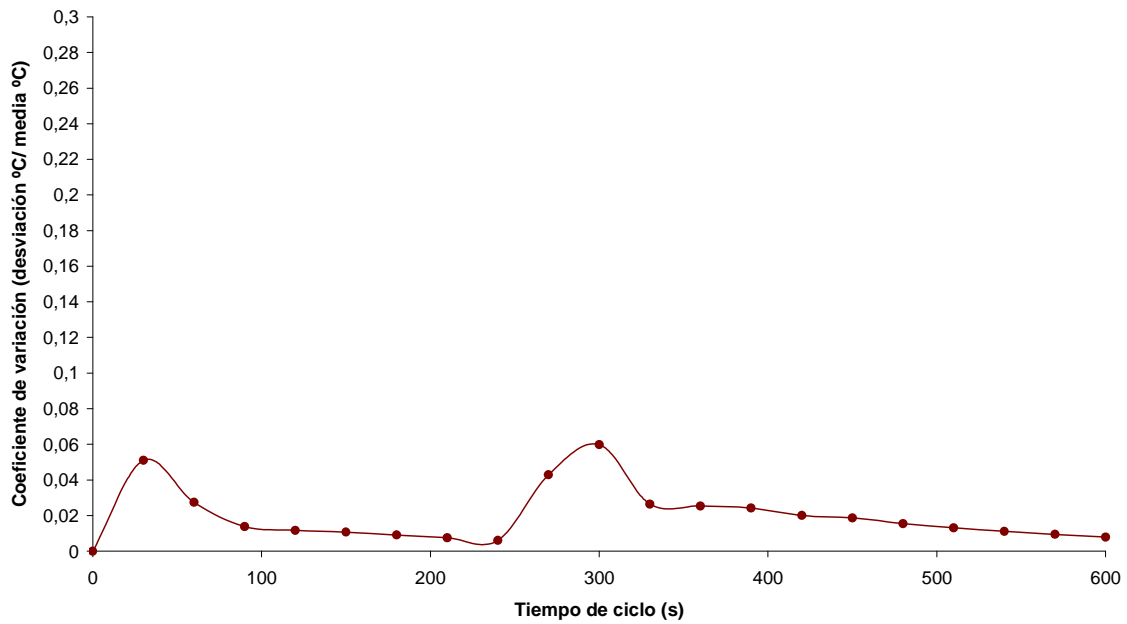
**Configuración de 15 entradas superiores y 15 salidas superiores en caras opuestas canal inferior 10 mm**



**Configuración de 15 entradas superiores y 15 salidas superiores en caras opuestas canal inferior 2,5 mm**

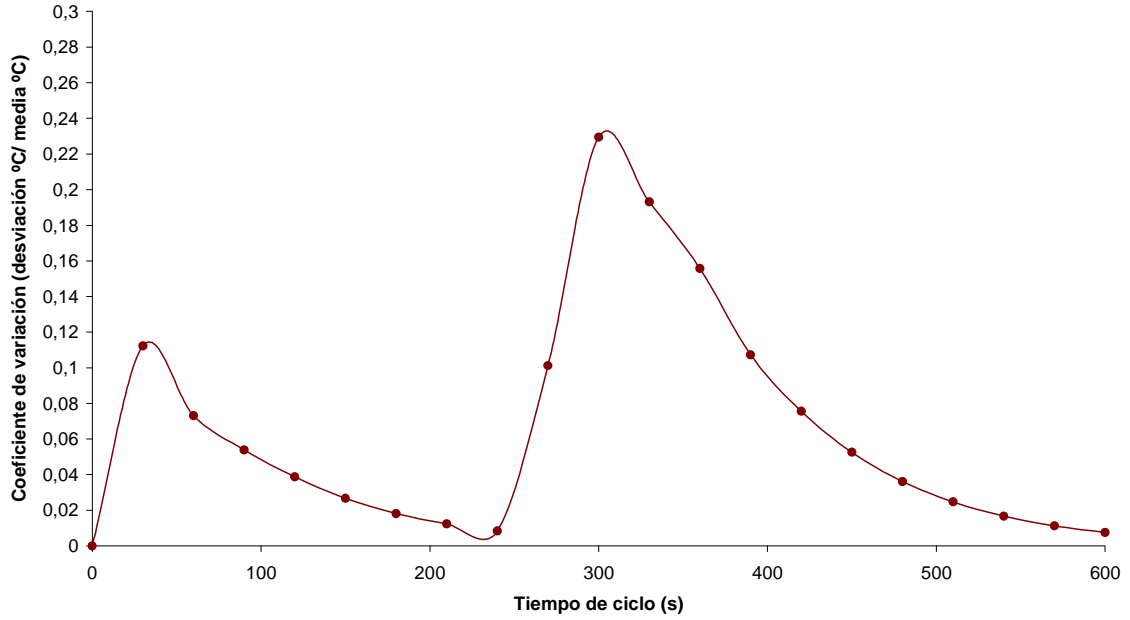


**Configuración de 18 entradas en 4 caras y 18 salidas en 4 caras**

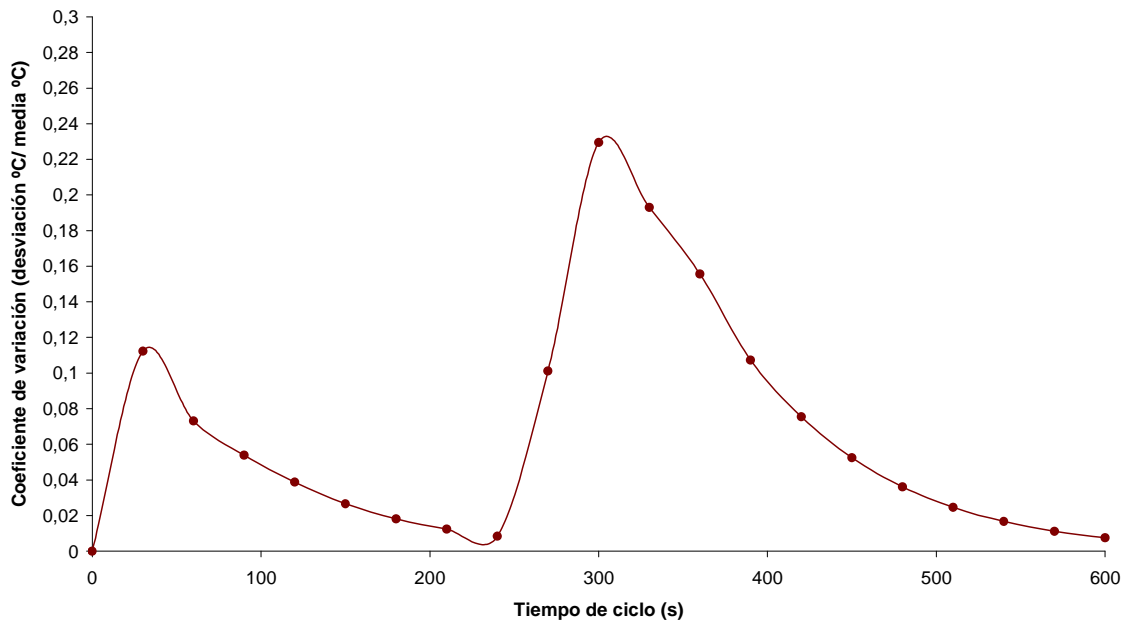




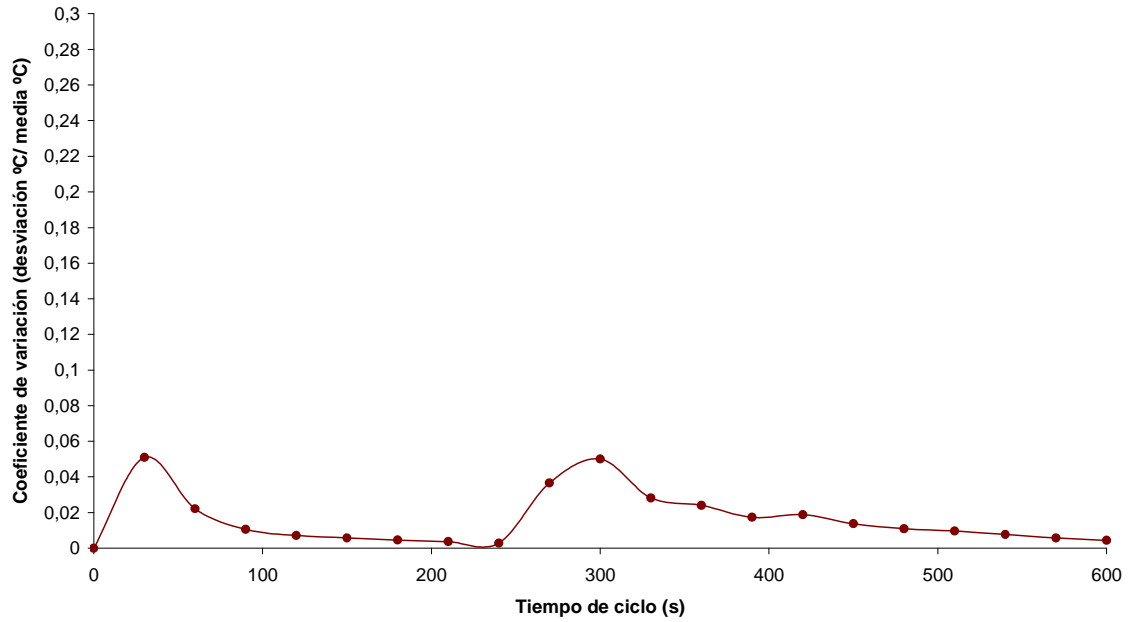
**Configuración de 20 entradas superiores y 15 salidas superiores en caras opuestas**



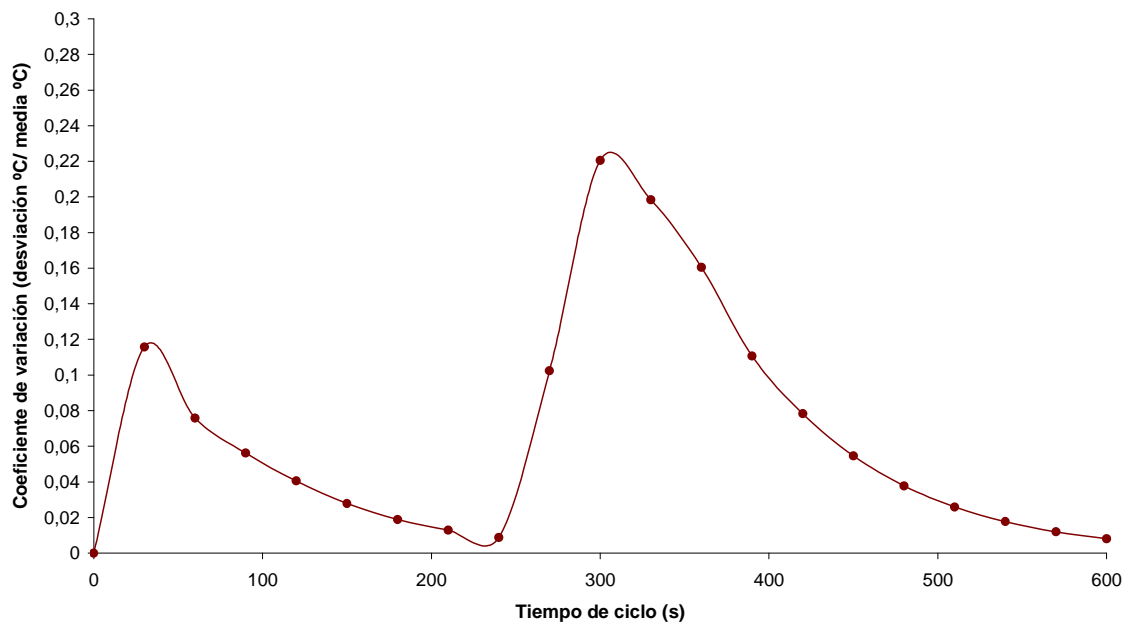
**Configuración de 20 entradas superiores y 25 salidas en caras opuestas**



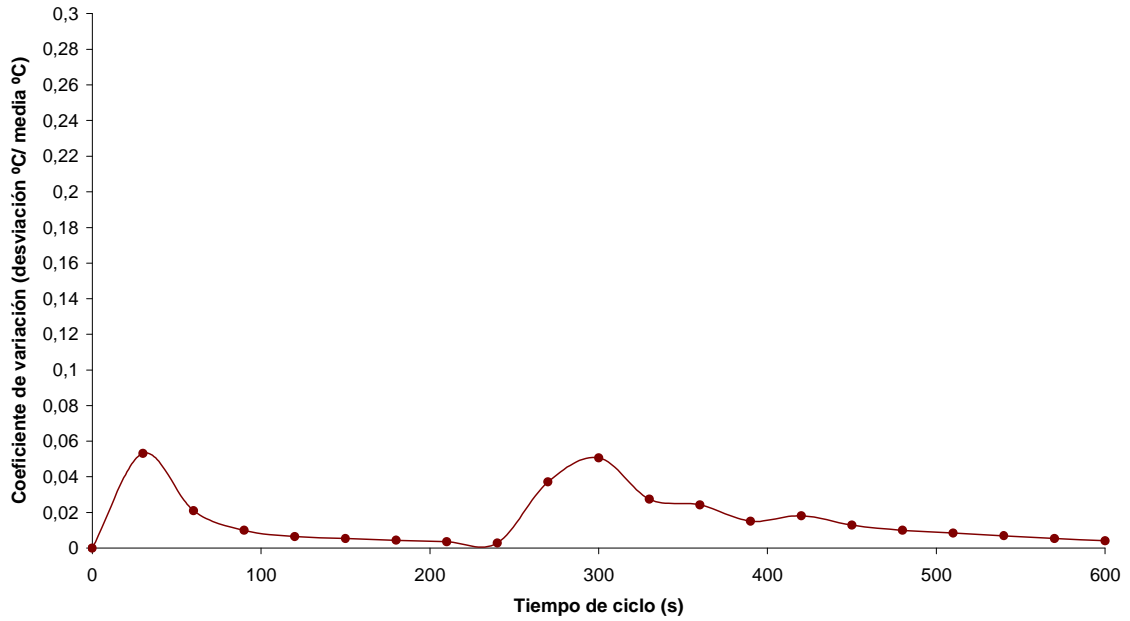
**Configuración de 32 entradas en 4 caras y 4 salidas en 4 caras**



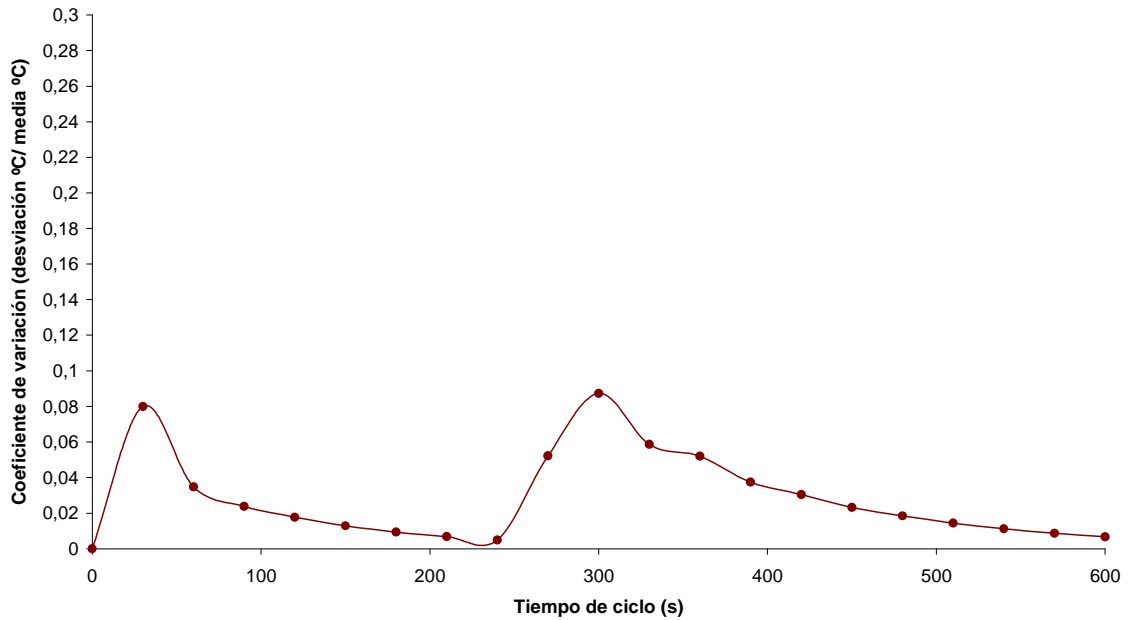
**Configuración de 25 entradas y 25 salidas en caras opuestas**



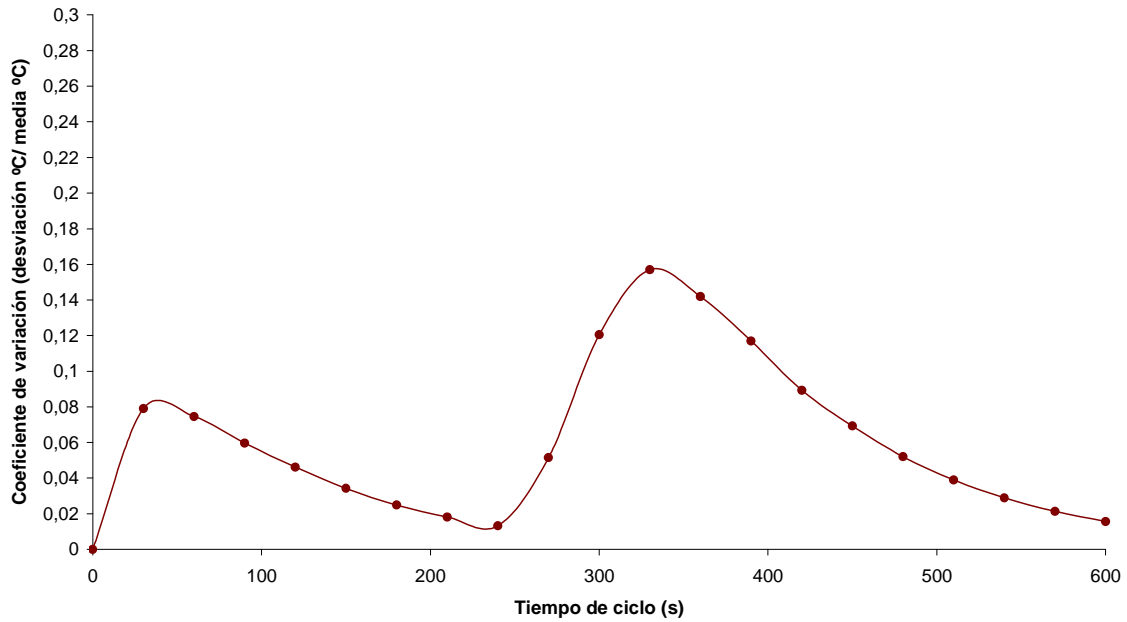
**Configuración de 36 entradas en 4 caras y 16 salidas en 4 caras**



**Configuración de 30 entradas superiores en caras enfrentadas y 30 salidas superiores en caras enfrentadas y opuestas**

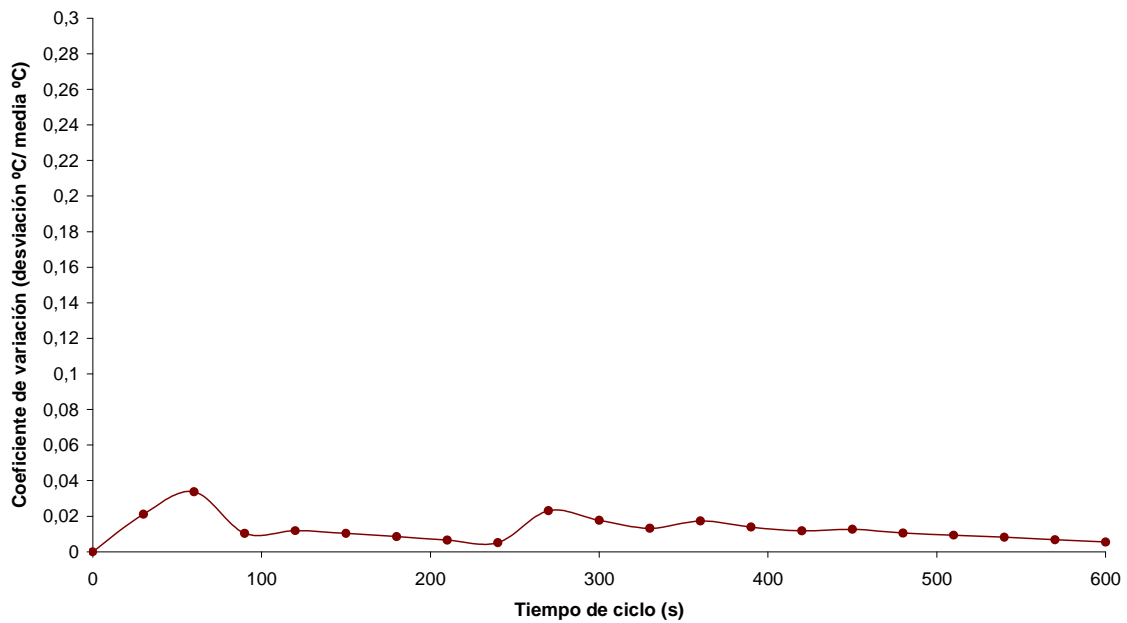


**Configuración de 40 entradas en 5 caras y 40 salidas en 5 caras**

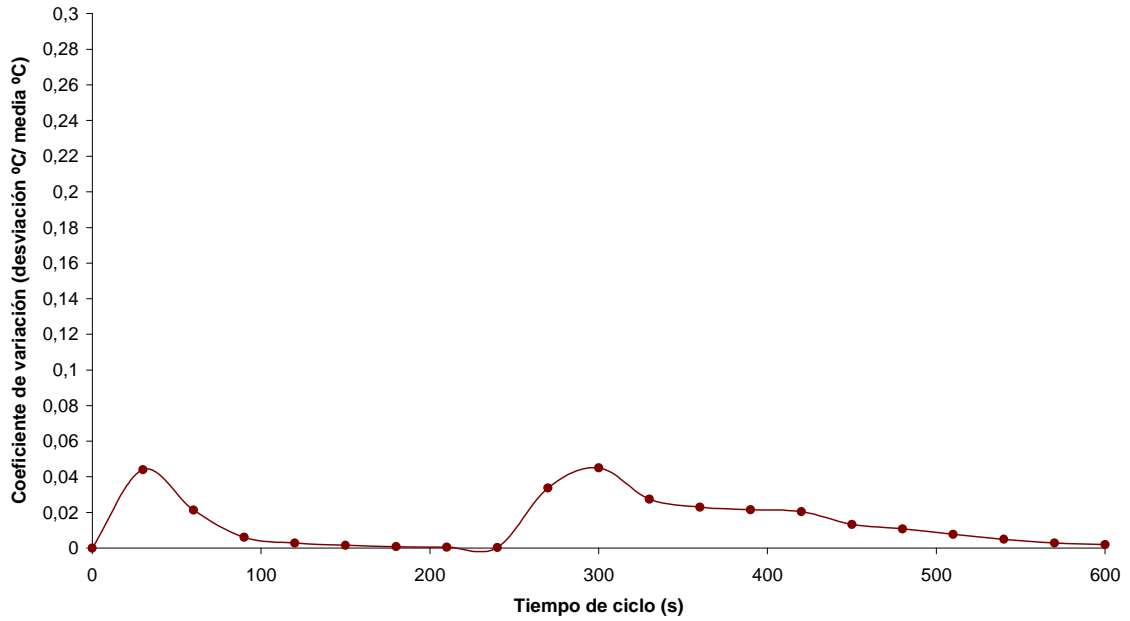


**Configuración de 32 entradas en 4 caras y 32 salidas en 4 caras**

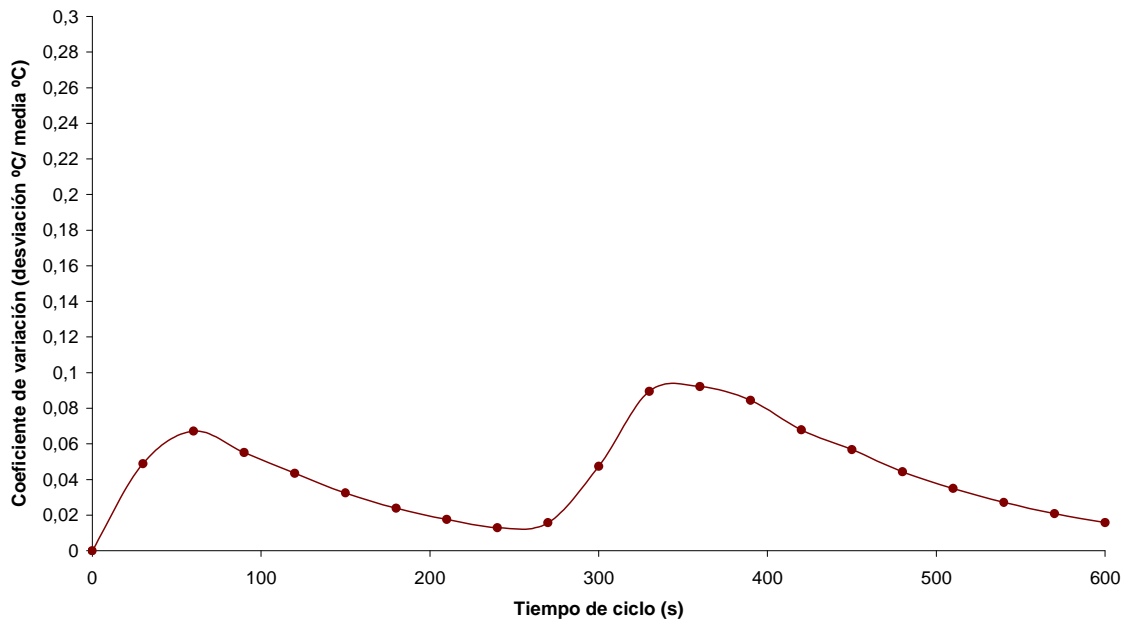
**Coefficiente de variación de la uniformidad térmica**



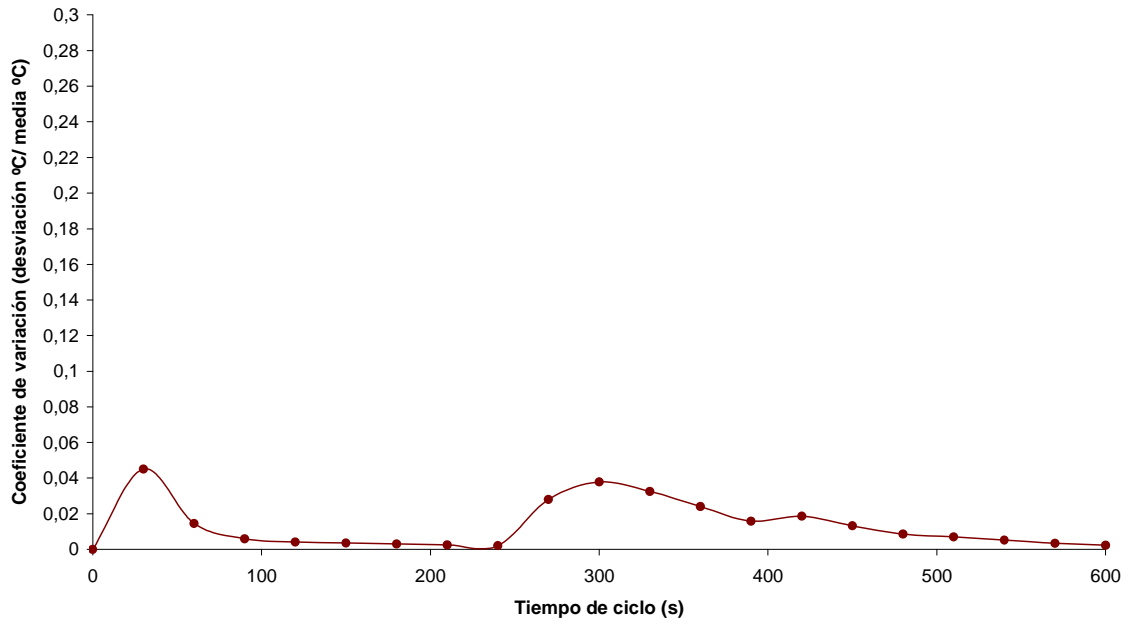
**Configuración de 50 entradas en 4 caras y 50 salidas en 4 caras**



**Configuración de 64 entradas en 4 caras y 16 salidas en cara inferior**



**Configuración de 84 entradas en 4 caras y 16 salidas en 4 caras**



**Configuración de 96 entradas en 4 caras y 4 salidas en 4 caras**

