

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA FABRICACIÓN DE  
SUPERFICIES DE CARPETAS ERGONÓMICAS UTILIZANDO  
TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS Y MADERA RECUPERADA**

Tesis para optar al Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

**CÉSAR AUGUSTO JESÚS BURGA PEREYRA**

**ASESOR:**     **Dr. Ing. Julio Acosta Sullcahuamán**  
                  **Mg. Walter Tupia Anticona**

**Lima, Setiembre del 2014**

## RESUMEN

En la actualidad, debido al constante crecimiento que está experimentando la economía nacional y en consecuencia el aumento de la producción industrial, se generan elevados volúmenes de residuos sólidos que son desechados sin ser reciclados, recuperados o reutilizados. Existen altos porcentajes de residuos de plástico y de madera, los cuales se producen en las casas, industrias, comercios y áreas públicas. Por lo general, la eliminación de estos residuos aún no se realiza de manera adecuada generándose una problemática ambiental complicada de solucionar.

En esta perspectiva, se viene desarrollando un proyecto de investigación en la PUCP, denominado QAUCHU KULLU, y entre sus objetivos se pretende diseñar y fabricar un sistema de moldeo para la fabricación de piezas de material compuesto utilizando residuos de plástico y madera. En el mismo sentido, se ha determinado que el rubro de la industria mobiliaria es un campo apropiado para la aplicación de este nuevo material.

El objetivo del presente trabajo fue realizar el diseño mecánico de un molde para la fabricación de superficies de carpetas ergonómicas (tablero, asiento y respaldo) utilizando termoplásticos reciclados y madera recuperada; así como el diseño térmico de sus sistemas de calentamiento y enfriamiento.

Para conseguir los objetivos planteados, se propuso el siguiente procedimiento metodológico: en primer lugar, la definición de los parámetros de diseño relacionados con las propiedades de los componentes del material compuesto y las variables de moldeo, asimismo, la evaluación de las alternativas de solución para cada función parcial del proceso; posteriormente, el diseño mecánico del molde y térmico de los sistemas complementarios (calentamiento y enfriamiento), realizando los cálculos mecánicos y térmicos correspondientes y, finalmente, la realización de los planos de fabricación y la determinación de los costos involucrados.

El trabajo concluye que el molde diseñado es capaz de producir superficies de carpetas ergonómicas que cumplen con los requisitos de dimensiones y tolerancias establecidos y que, a su vez, brindan la resistencia adecuada para garantizar la seguridad del usuario durante su empleo.

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO	: <b>DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA FABRICACIÓN DE SUPERFICIES DE CARPETAS ERGONÓMICAS UTILIZANDO TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS Y MADERA RECUPERADA</b>
ÁREA	: Diseño/Materiales
PROPUESTO POR	: Dr. Ing. Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán
ASESOR	: Dr. Ing. Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán Mg. Walter Mariano Tupia Anticona
TESISTA	: César Augusto Jesús Burga Pereyra
CÓDIGO	: 20074378
FECHA	: 25 de octubre del 2013

**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

En la actualidad, debido al constante crecimiento que está experimentando la economía nacional y en consecuencia el aumento de la producción industrial, se generan elevados volúmenes de residuos sólidos que son desechados sin ser reciclados, recuperados o reutilizados. Existen altos porcentajes de residuos de plástico y de madera, los cuales se producen en las casas, industrias, comercios y áreas públicas. Por lo general, la eliminación de estos residuos aún no se realiza de manera adecuada generándose una problemática ambiental complicada de solucionar.

En esta perspectiva, se viene desarrollando un proyecto de investigación en la PUCP, denominado QAUCHU KULLU, y entre sus objetivos se pretende diseñar un sistema de moldeo para la fabricación de piezas de material compuesto utilizando residuos de plástico y madera. En el mismo sentido, se ha determinado que el rubro de la industria mobiliaria sería un campo apropiado para la aplicación de este nuevo material.

El objetivo del presente trabajo es realizar el diseño mecánico de un molde para la fabricación de superficies de carpetas ergonómicas (tablero, asiento y respaldo) utilizando termoplásticos reciclados y madera recuperada; así como el diseño térmico de sus sistemas de calentamiento y enfriamiento.

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA FABRICACIÓN DE  
SUPERFICIES DE CARPETAS ERGONÓMICAS UTILIZANDO  
TERMOPLÁSTICOS RECICLADOS Y MADERA RECUPERADA**

Introducción

1. Parámetros de diseño
2. Diseño mecánico del molde
3. Diseño térmico del molde
4. Planos y costos de fabricación

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

---

Dr. Ing. Julio Acosta Sulcahuamán  
Asesor

---

Mg. Walter Tupia Anticona  
Asesor



## DEDICATORIA

A mis padres Víctor y Carmen, quienes siempre me alentaron a conseguir mis metas.

A mis hermanos Carol y Víctor Augusto, a mi abuela Estela y a toda mi familia por su apoyo incondicional.



## AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Ingeniero Julio Acosta Sullcahuamán y al Magister Walter Tupia Anticona por su paciencia y asesoría brindada.

A mis compañeros y amigos: Félix Flores, Luz Brañez, Alejandro Bazo, Rosa Tineo y Gustavo Del Castillo. Y a todas aquellas personas, que colaboraron en la elaboración de este trabajo.

## INDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>ii</b>
<b>TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>x</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1: PARÁMETROS DE DISEÑO.....</b>	<b>3</b>
1.1 PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO .....	3
1.2 SUPERFICIES DE CARPETAS.....	3
1.2.1 Formas: tablero, asiento y respaldo .....	4
1.2.2 Dimensiones y tolerancias.....	5
1.3 MATERIALES COMPUESTOS.....	7
1.4 COMPUESTOS DE PLASTICO RECICLADO Y MADERA RECUPERADA.....	8
1.4.1 Matriz termoplástica.....	9
a) Polipropileno .....	9
b) Propiedades de polipropileno .....	9
1.4.2 Refuerzo de fibras de origen vegetal.....	11
a) Madera.....	11
b) Componentes de la madera .....	11
c) Madera capirona.....	12
1.4.3 Compuesto Polipropileno - Capirona.....	12
a) Estudio experimental .....	12
b) Selección de muestra para superficies.....	16
c) Análisis de resistencia y rigidez.....	17
1.5 MOLDEO POR COMPRESIÓN DE COMPUESTOS MADERA-PLÁSTICO.....	21
1.5.1 Moldeo por compresión convencional .....	21
1.5.2 Variables de moldeo .....	22
1.5.3 Moldeo por compresión de termoplásticos.....	23
1.5.4 Metodología de fabricación .....	24
1.6 DETERMINACIÓN DEL PROYECTO ÓPTIMO DE DISEÑO.....	26
1.6.1 Planteamiento de la necesidad .....	26
1.6.2 Lista de exigencias .....	26
1.6.3 Estructura de funciones .....	27
1.6.4 Alternativas de solución.....	29
a) Moldes .....	29
b) Sistema de aplicación de presión.....	33
c) Análisis del sistema de calentamiento.....	34
d) Análisis del sistema de enfriamiento .....	35
e) Sistema de extracción de pieza moldeada.....	36
1.7 PARÁMETROS DEFINITIVOS DEL PROCESO .....	37
1.8 ESQUEMA DE PROYECTO ÓPTIMO.....	38

<b>CAPÍTULO 2: DISEÑO MECÁNICO DEL MOLDE.....</b>	<b>39</b>
2.1 TRANSMISIÓN DE PRESIÓN EN EL MOLDE.....	39
2.2 DEFORMACIÓN POR EFECTO DE LA PRESIÓN DEL COMPUESTO.....	40
2.3 DILATACIÓN POR INCREMENTO DE LA TEMPERATURA.....	49
2.4 DIMENSIONAMIENTO DE CAVIDAD .....	51
2.5 VERIFICACIÓN DE RESISTENCIA MECÁNICA.....	52
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO TÉRMICO DEL MOLDE.....</b>	<b>54</b>
3.1 SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	54
3.1.1 Análisis del proceso de calentamiento .....	55
3.1.2 Parámetros de operación del horno .....	56
3.1.3 Cálculo de potencia requerida.....	58
3.1.4 Dimensionamiento de espesor de aislante .....	65
3.1.5 Selección de resistencias eléctricas.....	67
3.2 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO .....	68
3.2.1 Análisis de la transferencia de calor durante el enfriamiento.....	69
3.2.2 Requerimiento térmico.....	70
3.2.3 Dimensionamiento de las plataformas de enfriamiento .....	71
3.2.4 Parámetros finales del sistema de enfriamiento .....	79
3.2.5 Verificación de la resistencia mecánica de las plataformas.....	80
3.2.6 Caída de presión del agua de enfriamiento .....	82
3.2.7 Dimensionamiento de la placa de acople.....	86
<b>CAPÍTULO 4: PLANOS Y COSTOS DE FABRICACIÓN.....</b>	<b>88</b>
4.1 PLANOS DE FABRICACIÓN .....	88
4.2 COMPONENTES DEL MOLDE .....	88
4.3 MODELO CAD DEL SISTEMA DE MOLDEO.....	91
4.4 COSTOS Y METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN .....	93
4.4.1 Costos de fabricación de los moldes.....	93
4.4.2 Costos de materia prima .....	94
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>96</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>98</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Dimensiones y tolerancias de las superficies de las carpetas.....	6
<b>Tabla 1.2:</b> Parámetros del proceso de fabricación de probetas de Caucho Kullu .....	13
<b>Tabla 1.3:</b> Muestras utilizadas en el tamizado .....	15
<b>Tabla 1.4:</b> Propiedades del material compuesto [PPR-C (60-40%) – MR3].....	16
<b>Tabla 1.5:</b> Metodología de fabricación.....	24
<b>Tabla 1.6:</b> Comparación de moldes según grado de automatización de proceso .....	30
<b>Tabla 1.7:</b> Análisis técnico-económico del tipo de molde según grado de automatización ....	30
<b>Tabla 1.8:</b> Comparación de moldes según configuración macho-hembra.....	32
<b>Tabla 1.9:</b> Análisis técnico-económico de moldes según configuración macho-hembra.....	33
<b>Tabla 1.10:</b> Comparación de métodos de calentamiento.....	34
<b>Tabla 1.11:</b> Análisis técnico-económico de métodos de calentamiento .....	35
<b>Tabla 2.1:</b> Deformación según espesor de la pared del molde (Tablero).....	46
<b>Tabla 2.2:</b> Deformación según espesor de la pared del molde (Asiento).....	47
<b>Tabla 2.3:</b> Deformación según espesor de la pared del molde (Respaldo).....	48
<b>Tabla 3.1:</b> Parámetros de operación del horno.....	56
<b>Tabla 3.2:</b> Parámetros del sistema de enfriamiento.....	79
<b>Tabla 3.3:</b> Longitudes equivalentes en cada tramo de tubería.....	84
<b>Tabla 3.4:</b> Pérdidas en tuberías y accesorios.....	85
<b>Tabla 3.5:</b> Altura manométrica total de tramos analizados .....	85
<b>Tabla 3.6:</b> Factor de deflexión ( $\alpha'$ ) para placa rectangular con carga centrada.....	87
<b>Tabla 4.1:</b> Listado de planos de fabricación de los moldes.....	88
<b>Tabla 4.2:</b> Costos de materiales de los moldes .....	93
<b>Tabla 4.3:</b> Costos de manufactura de los moldes.....	94
<b>Tabla 4.4:</b> Costos totales de fabricación.....	94
<b>Tabla 4.5:</b> Cantidad de materia prima requerida para el moldeo .....	95
<b>Tabla 4.6:</b> Costo de materia de prima .....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha'$	:	Factor de relación entre el largo y el ancho de las plataformas de enfriamiento
$\alpha_c$	:	Coeficiente de dilatación térmica del Alumold [ $1/^\circ\text{C}$ ]
$a$	:	Distancia entre canales de enfriamiento [mm]
$a'$	:	Ancho del canal de circulación de agua de la plataforma de enfriamiento [mm]
$A_T$	:	Área real de transferencia de calor [ $\text{m}^2$ ]
$A_s$	:	Área de superficie del canal de enfriamiento [ $\text{m}^2$ ]
$A_E$	:	Área del émbolo de la prensa [ $\text{mm}^2$ ]
$b'$	:	Altura del canal de circulación de agua de la plataforma de enfriamiento [mm]
$B_p$	:	Ancho de la placa de acople [mm]
$\beta$	:	Coeficiente de dilatación del aire
$cp_c$	:	Calor específico del Alumold [ $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ]
$cp_a$	:	Calor específico del aire [ $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ]
$cp_{ais}$	:	Calor específico del aislante del horno [ $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ]
$\delta_A$	:	Deformación por presión del compuesto en el plano X-Y [mm]
$\delta_B$	:	Deformación por presión del compuesto en el plano X-Z [mm]
$\delta_c$	:	Difusividad térmica del Alumold [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\delta_{MAX}$	:	Deformación total por presión del compuesto y dilatación térmica [mm]
$\delta_P$	:	Deformación total por presión del compuesto [mm]
$\delta_{pa}$	:	Deformación máxima permisible para el espesor de la placa de acople [mm]
$\delta_T$	:	Dilatación por temperatura [mm]
$\delta_{T-X}$	:	Dilatación por temperatura en el eje X [mm]
$\delta_{T-Y}$	:	Dilatación por temperatura en el eje Y [mm]
$\delta_{T-Z}$	:	Dilatación por temperatura en el eje Z [mm]
$d_H$	:	Diámetro hidráulico del canal de enfriamiento [mm]
$d_j$	:	Diámetro de la junta de jebe de las plataformas de enfriamiento [mm]
$d_T$	:	Diámetro de la tubería de salida de la bomba de agua [mm]
$\varepsilon_c$	:	Emisividad de la superficie del molde
$\varepsilon_s$	:	Emisividad de la superficie de lámina galvanizada
$e_{ais}$	:	Espesor de aislante del horno [mm]
$e_{pa}$	:	Espesor mínimo de la placa de acople [mm]
$e_s$	:	Longitud efectiva de contacto [mm]
$e_{se}$	:	Espesor de lámina galvanizada [mm]
$e_p$	:	Distancia entre la superficie del canal de enfriamiento y el molde [mm]
$E$	:	Módulo elástico del Alumold [ $\text{N/mm}^2$ ]
$E_p$	:	Módulo elástico del material de la placa de acople [ $\text{N/mm}^2$ ]

$FS$	:	Factor de seguridad
$h_c$	:	Coeficiente convectivo del aire quieto [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]
$h_r$	:	Coeficiente de radiación en la cámara interna del horno [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]
$h_w$	:	Coeficiente convectivo del agua en los canales [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]
$Ht$	:	Altura manométrica total [m.c.a.]
$I_A$	:	Momento de inercia de la sección de la pared del molde en plano Y-Z [ $mm^4$ ]
$I_B$	:	Momento de inercia de la sección de la pared del molde en plano X-Y [ $mm^4$ ]
$I_p$	:	Momento de inercia de la sección de la placa de acople [ $mm^4$ ]
$k_a$	:	Conductividad del aire [ $kW/m \cdot ^\circ C$ ]
$k_{ais}$	:	Conductividad térmica del aislante del horno [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
$k_c$	:	Conductividad térmica del Alumold [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
$k_p$	:	Conductividad térmica del material de plataformas de enfriamiento [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
$k_s$	:	Conductividad térmica de lámina galvanizada [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]
$L_0$	:	Longitud inicial de la pared del molde [mm]
$L_A$	:	Longitud de la pared del molde [mm]
$L_B$	:	Altura de la pared del molde [mm]
$L_p$	:	Longitud de la placa de acople [mm]
$LP_{MAX}$	:	Altura máxima de los platos inferior y superior [mm]
$\dot{m}_{agua/C}$	:	Flujo másico de agua por canal de enfriamiento [kg/s]
$\dot{m}_{agua/P}$	:	Flujo másico de agua por plataforma de enfriamiento [kg/s]
$\dot{m}_{agua/T}$	:	Flujo másico de agua total [kg/s]
$m_c$	:	Masa del molde [kg]
$N_p$	:	Número de canales de enfriamiento por placa
$\sigma_{Eq}$	:	Esfuerzo equivalente según criterio de Von Mises [ $N/mm^2$ ]
$\sigma_{F_{2024}}$	:	Esfuerzo de fluencia del Aluminio 2024 [ $N/mm^2$ ]
$\sigma_{F_{Alumold}}$	:	Esfuerzo de fluencia del Alumold [ $N/mm^2$ ]
$\sigma_X$	:	Esfuerzo sobre la pared del molde en el eje X [ $N/mm^2$ ]
$\sigma_Z$	:	Esfuerzo sobre la pared del molde en el eje Z [ $N/mm^2$ ]
$\rho_a$	:	Densidad del aire [ $kg/m^3$ ]
$\rho_{ais}$	:	Densidad del aislante del horno [ $kg/m^3$ ]
$\rho_c$	:	Densidad del Alumold [ $kg/m^3$ ]
$P_C$	:	Potencia absorbida por la carga (molde) [kW]
$P_{COND}$	:	Pérdidas por conducción del horno [kW]
$P_{CONV}$	:	Pérdidas por convección del horno [kW]
$P_M$	:	Presión de moldeo [ $N/mm^2$ ]
$P_{MC}$	:	Presión del material compuesto [ $N/mm^2$ ]

$P_{pc}$	:	Flujo neto de calor por radiación entre pared - carga (molde) [kW]
$P_{PER}$	:	Pérdidas totales del horno [kW]
$P_{RAD}$	:	Pérdidas por radiación del horno [kW]
$P_T$	:	Potencia total del horno [kW]
$\dot{Q}_P$	:	Flujo de calor removido por cada plataforma de enfriamiento [kW]
$\dot{Q}_T$	:	Flujo de calor total removido por las plataformas de enfriamiento [kW]
$t_{cal}$	:	Tiempo de calentamiento [s]
$t_{enf}$	:	Tiempo de enfriamiento [s]
$T_a$	:	Temperatura ambiente [°C]
$T_b$	:	Temperatura de masa [°C]
$T_c$	:	Temperatura de molde (variable en el tiempo) [°C]
$T_e$	:	Temperatura de entrada del agua a los canales de enfriamiento [°C]
$T_f$	:	Temperatura final del molde en el calentamiento [°C]
$T_f'$	:	Temperatura final del molde en el enfriamiento [°C]
$T_h$	:	Temperatura de la superficie externa del horno [°C]
$T_i$	:	Temperatura inicial del molde en el calentamiento [°C]
$T_i'$	:	Temperatura inicial del molde en el enfriamiento [°C]
$T_o'$	:	Temperatura en la superficie del molde en el enfriamiento [°C]
$T_p$	:	Temperatura de la cámara interna del horno [°C]
$T_s$	:	Temperatura de salida del agua de los canales de enfriamiento [°C]
$T_w$	:	Temperatura de superficie de los canales de enfriamiento [°C]
$T(x, t_{enf})$	:	Temperatura en el centro del molde luego del enfriamiento [°C]
$\mu_a$	:	Viscosidad del aire [N.s/m <sup>2</sup> ]
$v_{agua}$	:	Velocidad del agua en las tuberías del sistema de enfriamiento [m/s]
$\dot{V}_{agua}$	:	Flujo de agua en las tuberías del sistema de enfriamiento [m <sup>3</sup> /s]
$V_c$	:	Volumen de la carga (molde) [m <sup>3</sup> ]
$W_A$	:	Carga lineal por presión del compuesto en el plano X-Y [N/mm]
$W_B$	:	Carga lineal por presión del compuesto en el plano X-Z [N/mm]

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha incrementado considerablemente el desarrollo e investigación de nuevos materiales. Esto se debe a la fomentación de una nueva cultura global en la cual se demanda a las grandes industrias manufactureras productos de mayor calidad y la implementación de tecnología que reduzca la contaminación del ambiente.

En nuestro país, debido al constante crecimiento que está experimentando la economía nacional, y en consecuencia el aumento de la producción industrial, se generan elevados volúmenes de residuos. Existen altos porcentajes de residuos de plástico y de madera procedentes de los procesos de transformación secundaria, los cuales se producen en casas, industrias, comercios y áreas públicas. La eliminación de estos residuos no se realiza de manera adecuada generándose una problemática ambiental complicada de solucionar.

Por ese motivo, es importante que se investigue con mayor auge los materiales compuestos conformados por residuos plásticos y restos de madera, de tal manera, que puedan emplearse como materia prima para nuevos productos. Con ello, se generarían impactos sobre la sociedad. En primer lugar, existiría un impacto ambiental debido al reciclaje de residuos brindando una solución parcial a la problemática de la eliminación de residuos no degradables. Además, habría un impacto económico al entrar al mercado un producto de bajo costo en comparación con los materiales tradicionales, lo cual impulsaría la industria nacional al proveerse tecnologías de bajo costo para su utilización. Así también, existiría un impacto social, ya que podrían fabricarse productos económicos que puedan ser utilizados por personas de bajos recursos.

En ese contexto, se viene desarrollando un proyecto de investigación en la PUCP, denominado QAUCHU KULLU, y entre sus objetivos se pretende diseñar un sistema de moldeo para la fabricación de piezas de material compuesto utilizando residuos de plástico y madera. En el mismo sentido, se ha determinado que el rubro de la industria mobiliaria sería un campo apropiado para la aplicación de este nuevo material.

El objetivo de este trabajo es diseñar un molde que permita la fabricación de superficies de carpetas ergonómicas (tablero, asiento y respaldo), las cuales deben brindar comodidad y seguridad al usuario y cumplir con los requisitos de dimensiones y tolerancias establecidos.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en el primer capítulo se exponen las propiedades de los elementos constituyentes del material compuesto y las variables involucradas en el proceso de compresión térmica. Del mismo modo, se evalúan las alternativas de solución de cada función parcial del proceso. En base a lo descrito anteriormente, se determinan los parámetros de diseño. En el segundo capítulo, se muestran los cálculos de dimensionamiento del molde teniendo en consideración las deformaciones producidas durante el proceso de moldeo debido a la presión ejercida por el compuesto y el aumento de la temperatura. En el tercer capítulo, se analizan las variables de los procesos de calentamiento y enfriamiento para el dimensionamiento y selección de los componentes que formarán parte de estos sistemas complementarios. Finalmente, en el cuarto capítulo se enumeran los planos de fabricación y se muestran los costos involucrados.

## CAPÍTULO 1

### PARÁMETROS DE DISEÑO

En el este capítulo se definen los parámetros de diseño que serán utilizados en el diseño del molde, los cuales están relacionados con las propiedades de los constituyentes del material y las variables del proceso. De igual manera, se realiza la evaluación de las alternativas de solución para cada función parcial del proceso. Finalmente, se muestra el esquema de proyecto óptimo de diseño.

#### 1.1 PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO

El producto que se desea obtener mediante la utilización del molde es una superficie ergonómica fabricada con un material compuesto conformado por plástico y madera, la cual debe formar parte de un ensamble de carpeta.

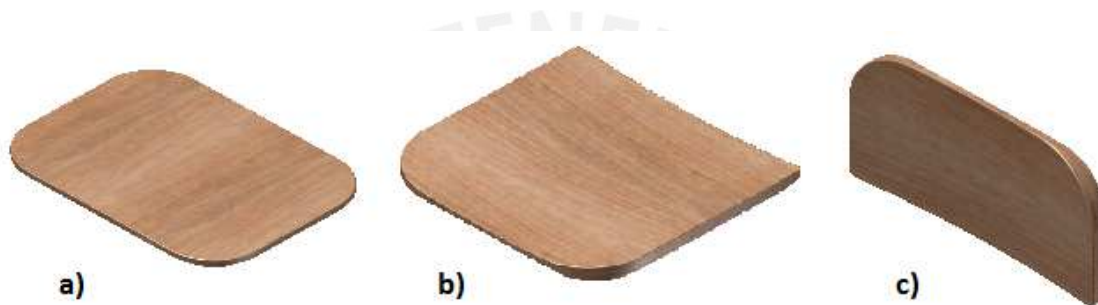
El uso de estos materiales compuestos de plástico y madera se sustenta debido al incremento considerable en su aplicación para una amplia gama de productos para el sector construcción (tableros, vallas, entre otros) [Clemons 2002]. Esta clase particular de materiales se denomina WPC (Wood Plastic Composites), cuyas siglas en inglés significan compuestos madera-plástico. Estos fueron resultado de una investigación profunda, iniciada a finales de los ochentas, acerca de las características de las fibras y de sustancias que permitieran mejorar la interacción entre la madera y los componentes de los termoplásticos, y de esa manera, conseguir mejores propiedades [Wolcott 2002]. El auge de estos materiales para el rubro de la construcción es propiciado por una favorable valoración del producto en términos del costo del ciclo de vida (comparación entre la calidad y precio de un producto en relación con otras ofertas del mercado) [Smith 2006]. Además, presentan buenas propiedades mecánicas y bajo nivel de mantenimiento. Por estos motivos, la aplicación de estos materiales en la industria del mueble se presenta como una excelente opción.

#### 1.2 SUPERFICIES DE CARPETAS

El diseño del molde implica conocer las características geométricas de las partes que serán moldeadas. En este caso, se deben establecer las formas y dimensiones de las superficies de las carpetas: tablero, asiento y respaldo. De igual manera, es necesario establecer las deformaciones máximas permisibles para poder realizar los cálculos de verificación respectivos.

### 1.2.1 Formas: tablero, asiento y respaldo

La fabricación de las carpetas está destinada para su utilización en centros de enseñanza universitarios, por lo cual, sus dimensiones están referidas para usuarios con estatura promedio de 166 cm. Sin embargo, el diseño de los moldes puede ser adaptado para moldear piezas más pequeñas para su empleo en carpetas destinadas a centros de enseñanza de educación primaria e inicial. El análisis mecánico y térmico de los molde tendrá una estructura definida, pero variarán los resultados de acuerdo a las dimensiones de las superficies moldeadas. Es decir, se plantea un procedimiento de cálculo, el cual podrá ser aplicado para distintas configuraciones geométricas. A continuación, se muestran las superficies moldeadas y el ensamble final.



**Figura 1.1.** Superficies de la carpeta: a) tablero, b) asiento y c) respaldo.



**Figura 1.2.** Ensamble de carpeta.



### 1.2.2 Dimensiones y tolerancias

El modelado de las superficies de la carpeta fue encargado a un diseñador industrial con experiencia en diseño ergonómico. De esta manera, se asegura que el ensamble de la carpeta brinde comodidad al usuario por un prolongado periodo de tiempo. A continuación, se muestran las vistas lateral y superior del ensamble y las principales dimensiones.

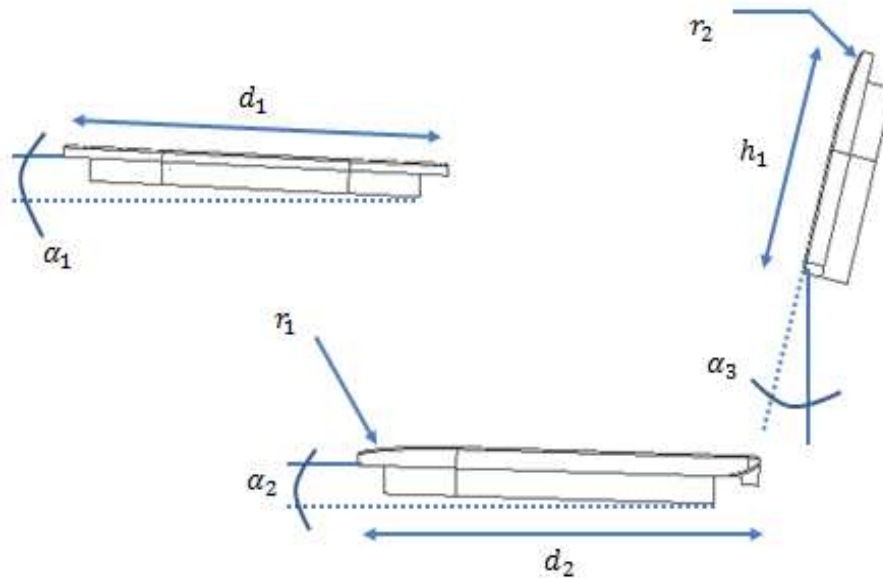


Figura 1.3. Vista lateral del ensamble de carpeta.

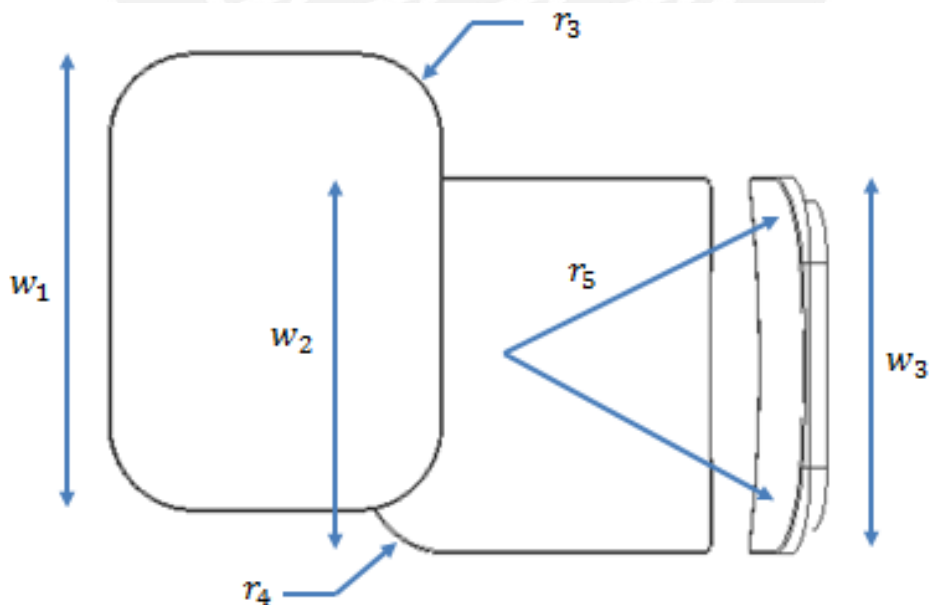


Figura 1.4. Vista superior del ensamble de carpeta.

En la siguiente tabla se muestra la descripción de cada una de las dimensiones mostradas y sus respectivos valores.

**Tabla 1.1:** Dimensiones y tolerancias de las superficies de las carpetas

Descripción	Símbolo	Dimensiones (mm)
<b>TABLERO</b>		
Ancho efectivo de la superficie del tablero	$w_1$	480
Longitud efectiva de la superficie del tablero	$d_1$	350
Radio en el contorno del tablero	$r_3$	90
Ángulo de la superficie del tablero	$\alpha_1$	3°
<b>ASIENTO</b>		
Ancho efectivo de la superficie del asiento	$w_2$	395
Longitud efectiva de la superficie del asiento	$d_2$	365
Radio en el extremo del asiento	$r_1$	750
Radio en el contorno del asiento	$r_4$	90
Ángulo de la superficie del asiento	$\alpha_2$	2°
<b>RESPALDO</b>		
Ancho efectivo de la superficie del espaldar	$w_3$	395
Altura efectiva de la superficie del espaldar	$h_1$	200
Radio en el extremo del asiento	$r_2$	90
Radio de curvatura del espaldar	$r_5$	1680
Ángulo de la superficie del asiento	$\alpha_3$	15°

Las superficies de la carpeta no son componentes que requieren elaboradas especificaciones de tolerancias. Sin embargo, se propone como objetivo fabricar piezas que no sobrepasen 2 mm respecto a las dimensiones laterales y 1 mm en cuanto al espesor. Además, es importante que cada de una las superficies fabricadas sean lo más parecidas posibles para evitar posibles problemas durante el montaje en el bastidor. Por otro lado, cabe señalar que el tablero tiene espesor constante de 10 mm, mientras que el respaldo y el asiento presentan espesores variables a través de sus superficies debido a las curvaturas ergonómicas, siendo 19 mm el valor máximo. Estos espesores fueron determinados según 3 factores: el factor principal radica en la obtención de una curvatura que brinde comodidad al usuario; el segundo factor está asociado con la reducción de costos de materia prima, por lo cual, se busca determinar el mínimo espesor posible; y el último factor está relacionado con la resistencia mecánica, pues las superficies deben soportar el peso de un individuo.

En este caso, se deben moldear tres tipos de superficies diferentes, esto implica la realización de un análisis similar para cada una de ellas, ya que las características de operación son idénticas. La diferencia radica en que el tablero es completamente recto mientras que el espaldar y el asiento presentan curvaturas (formas ergonómicas). Por este motivo, en los capítulos de diseño mecánico y término, se mostrarán los análisis detallados realizados para el tablero y los resultados obtenidos de manera análoga para las otras superficies.

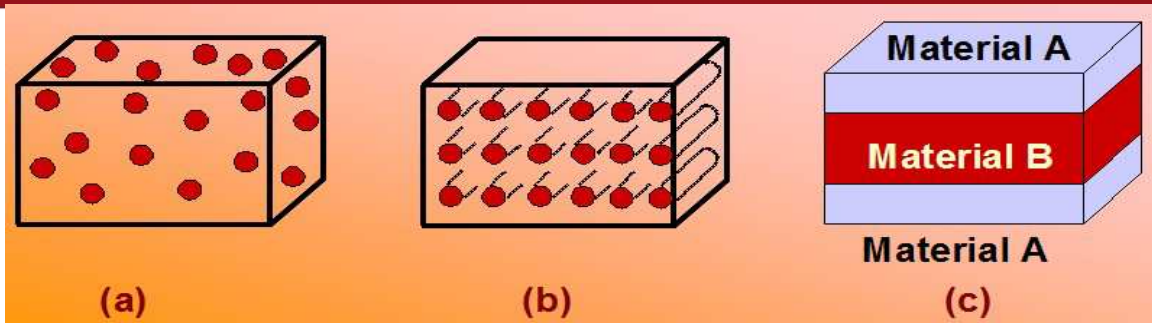
Entonces, el diseño del molde y su potencial fabricación constituyen la tecnología que permitirá la producción de las carpetas, las cuales deberán poseer las dimensiones y propiedades idóneas para que puedan ser empleadas eficazmente y sin comprometer la seguridad del usuario.

### 1.3 MATERIALES COMPUESTOS

La clasificación clásica indica que los materiales sólidos se subdividen en metálicos, cerámicos y poliméricos. Sin embargo, a los componentes formados por más de uno de estos tipos se les denomina materiales compuestos. Algunos de estos existen en la naturaleza, pero la mayoría han sido diseñados y desarrollados en laboratorios mediante la combinación de propiedades específicas con la finalidad de crear un material capaz de satisfacer las necesidades tecnológicas.

Las propiedades de los materiales compuestos normalmente son superiores a las de los materiales originales e incluso pueden ser únicas en algún aspecto específico. Estas son determinadas en función de las propiedades de las fases constituyentes, sus cantidades relativas y la geometría de la fase dispersa [Callister 2007]. Entre las características mecánicas y térmicas que pueden ser perfeccionadas tenemos: rigidez, resistencia, peso, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza y conductividad.

Los materiales compuestos suelen estar formados por dos componentes: la fase matriz y la fase dispersa. La primera se utiliza como sustancia de aglutinamiento (es continua y envuelve la otra fase) y es seleccionada en función de las condiciones ambientales y de trabajo. Por otro lado, la fase dispersa sirve como material de refuerzo. En la Figura 1.5 se puede apreciar la presentación de las formas de refuerzos: partículas (a), fibras (b) o en láminas estructurales (c).



**Figura 1.5.** Tipos de refuerzos de materiales compuestos.

Existen muchas clases de materiales compuestos y en consecuencia varias clasificaciones. Sin embargo, desde el punto de vista de ingeniería, podemos clasificar estos materiales en función de su refuerzo (ver Figura 1.6).



**Figura 1.6.** Clasificación de materiales compuestos según refuerzo [Callister 2007].

Los materiales compuestos más investigados en nuestro país son los reforzados con partículas “grandes” y los reforzados con fibras. Los primeros tienen la fase dispersa más dura y rígida que la matriz. Este refuerzo es más efectivo cuando las partículas son de tamaño reducido y están distribuidas uniformemente en la matriz. Las propiedades mecánicas aumentan según el incremento del contenido de partículas. Por otro lado, los reforzados con fibras presentan mejores propiedades al incorporar fibras resistentes y rígidas en una matriz más blanda y dúctil. Esta transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada [Askeland 1998].

#### 1.4 COMPUESTOS DE PLÁSTICO RECICLADO Y MADERA RECUPERADA

Actualmente, los Compuestos Madera-Plástico (WPC) se están desarrollando con mayor énfasis debido a su potencial y continua mejora de propiedades (resistencia, dureza, estabilidad térmica, entre otros). Además, esta tendencia se debe a que existen grandes volúmenes de plástico que deben ser reciclados y a la facilidad que existe para conseguir restos de madera de las industrias que trabajan con ella.

El éxito comercial radica en la obtención de mejores materiales fabricados en base a residuos reciclados y recuperados y en la eficiencia del diseño del producto y los procesos de producción [Wolcott 2002].

#### **1.4.1 Matriz termoplástica**

La fase matriz de plástico será la encargada de aglutinar las partículas o fibras de madera de tal manera que los esfuerzos se transmitan a las partículas y estas admitan cierto porcentaje de la carga. Ahora bien, los termoplásticos que podrían ser utilizados para la matriz son el polipropileno y PET (polietileno tereftalato) puesto que son los más comercializados. Además, estos plásticos son de bajo costo y poseen buenas propiedades.

En este caso, la matriz del material compuesto que será utilizado en la fabricación de las superficies de las carpetas está formada por partículas de polipropileno, por lo cual, mencionaremos sus principales propiedades mecánicas y térmicas.

##### **a) Polipropileno**

El polipropileno es un polímero termoplástico, es así que cuando es sometido a altas temperaturas se funde y puede ser moldeado, de tal manera que adquiere otra estructura geométrica. Sin embargo, después del enfriamiento se solidifica sin perder sus propiedades iniciales. Esto ocurre debido a que las moléculas reciben la energía necesaria para separarse cuando se produce el calentamiento y de esa forma pueden cambiar su posición relativa dando origen a nuevas formas. Cabe señalar que el polipropileno, dadas sus características termoplásticas, puede ser moldeado en repetidas ocasiones, sin embargo, este proceso tiende a disminuir sus propiedades iniciales. En la actualidad, el polipropileno es un material utilizado en la fabricación de cubiertos desechables, cascos de seguridad, piezas de fontanería, sillas apilables, entre otros.

##### **b) Propiedades de polipropileno**

###### **Propiedades mecánicas**

El auge del polipropileno y su gran demanda en el mercado se origina por las excelentes propiedades físicas y mecánicas que posee, lo cual lo hace un material versátil. Entre las principales características podemos resaltar las siguientes:

- Alta rigidez
- Elevado punto de fusión
- Excelente resistencia química
- Baja densidad
- Buena resistencia a la fatiga

Estas características son idóneas para la fabricación de carpetas, dado que se necesita producir un componente con la rigidez necesaria para soportar los esfuerzos provocados por el peso de un ser humano sin generarse deformaciones que sobrepasen los límites establecidos. Además, su baja densidad reduce el peso de las partes, lo cual le da un valor agregado al producto. Por otro lado, su excelente resistencia química asegura la fiabilidad de la carpeta ante escenarios ambientales adversos.

### **Propiedades térmicas**

En las líneas anteriores hemos descrito las propiedades físicas y mecánicas del polipropileno. Además, es necesario determinar con mayor rigor las características térmicas de este material, debido a que será empleado en un proceso de moldeo, el cual se realiza a elevadas temperaturas.

Los materiales termoplásticos están formados por largas cadenas entrecruzadas unidas por enlaces secundarios débiles. El desplazamiento de estas cadenas está determinado principalmente por la variación de la temperatura. En ese sentido, se han definido valores de temperaturas críticas que describen el comportamiento del polímero [Askeland 1998].

- Temperatura de degradación ( $T_d$ ): indica el punto en que los enlaces se quiebran y el polímero se carboniza. Normalmente, esta clase de materiales tiene una temperatura de degradación bastante elevada, por lo cual, se dificulta su proceso de eliminación cuando su utilización ya no es requerida.
- Temperatura de fusión ( $T_m$ ): sobre este punto los enlaces del polímero se presentan débiles. Esta situación facilita la fluencia del material si es que se le aplica una fuerza. En este punto, los valores de resistencia y módulo de elasticidad son despreciables.
- Temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ): hace referencia al valor bajo el cual el polímero se comporta como un material vidrioso. Es decir, sus principales características son la dureza y la fragilidad.

Cuando la temperatura del polímero se encuentra entre la temperatura de fusión y la temperatura de transición vítrea, este puede adoptar estructura amorfa o cristalina. Es importante señalar que la microestructura del material se mantiene constante en cualquier estado, sin embargo, varían las propiedades.

#### 1.4.2 Refuerzo de fibras de origen vegetal

Los refuerzos utilizados en los materiales compuestos pueden ser de distintos orígenes. Sin embargo, la utilización de fibras de origen vegetal representa mayores ventajas frente a otros tipos de fibra. Esto se debe a su bajo costo, baja densidad, altos valores de resistencia a la tracción, buenas propiedades térmicas, biodegradabilidad, fácil reciclaje, entre otros.

Cabe señalar que el material compuesto a utilizar para este trabajo ha sido desarrollado por el Área de Materiales – PUCP y se denomina Qauchu Kullu, el cual está conformado por una matriz polimérica de plástico polipropileno y reforzado con partículas de madera capirona recuperada (ver sección 1.4.3).

##### a) Madera

La madera es un material compuesto formado por varios tipos de células orgánicas cuyas paredes están constituidas por fibras de celulosa. Estas fibras están reforzadas por una matriz polimérica de lignina y otros compuestos orgánicos.

##### b) Componentes de la madera

La madera está conformada por tres componentes fundamentales: celulosa (45-50%), lignina (25-30%) y hemicelulosa (25-30%). Además, existe un pequeño porcentaje de otros elementos como resinas, ceras y grasas.

La celulosa es el principal componente puesto que define las principales propiedades de la madera. Está conformada por una larga cadena de moléculas de glucosa, las cuales están unidas por medio de enlaces de hidrógeno (ver Figura 1.4). Estos tienen una gran influencia en lo referente a la morfología, rigidez y resistencias de las cadenas celulósicas.

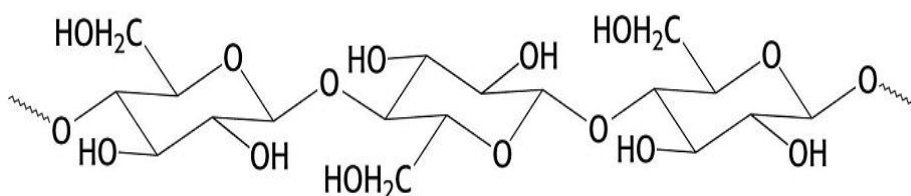


Figura 1.7. Cadena de celulosa.

La degradación de la celulosa constituye un factor crucial en las propiedades de la madera. Por lo cual, deben ser los eliminados todos los factores que propicien su degradación térmica y/o mecánica.

Por su parte, la lignina es un polímero aromático con alto peso molecular unido mediante enlaces covalentes que se ubica en los espacios libres existentes entre las cadenas de celulosa. La proporciones relativas de celulosa y lignina definen afectan la estructura, morfología y propiedades de las fibras.

### **c) Madera capirona**

La capirona es una madera que crece en las partes altas y bajas de la amazonía peruana. Normalmente, se desarrolla en suelos arenosos y arcillosos que presenten un contenido medio de materia orgánica. Esta madera fue seleccionada debido a que posee buena dureza y resistencia mecánica. Según la clasificación de los materiales compuestos según el refuerzo (ver Figura 1.6), la capirona está acorde a la características de refuerzo de partículas.

#### **1.4.3 Compuesto Polipropileno - Capirona**

El Área de Materiales – PUCP ha estado trabajando continuamente en la investigación y desarrollo de nuevos materiales compuestos que contribuyan a resolver necesidades tecnológicas utilizando materiales recuperados. En ese sentido, se ha diseñado un material compuesto de matriz de polipropileno con refuerzos de partículas de madera capirona denominado Qauchu Kullu.

Una vez establecido el marco teórico (características de la matriz polimérica y el refuerzo de fibras de origen vegetal) y definido las propiedades de los materiales a emplearse (polipropileno y capirona), se procedió a la caracterización del nuevo material. Con ello, se obtuvieron las principales propiedades del Qauchu Kullu, las cuales definirán algunos parámetros de diseño del molde.

### **a) Estudio experimental**

Una de las etapas de la investigación del Qauchu Kullu consistió en la realización de probetas –según estándares internacionales- para poder caracterizar el nuevo material. Estas probetas fueron producidas variando los porcentajes de la matriz y de los refuerzos, así como también los tamaños de las partículas de capirona. La fabricación se realizó mediante moldeo por compresión.



Todos los parámetros del proceso de fabricación de las probetas servirán como referencia para el proceso de moldeo de las superficies de las carpetas. De igual manera, nos permitirán definir la proporción ideal de la fase matriz y la fase dispersa.

En el estudio experimental se realizaron probetas de 300x150x10mm, fabricadas por moldeo por compresión en una prensa manual con capacidad de 20 Ton-f y un diámetro de pistón donde se aplica la presión de 80mm. Previamente, las probetas fueron calentadas en una mufla eléctrica hasta alcanzar la temperatura de moldeo. En la sección 1.5 se aborda con mayor detalle las variables relacionadas al proceso de fabricación. En la Tabla 1.2, podemos observar los rangos de los parámetros de acuerdo a las distintas muestras de material compuesto.

**Tabla 1.2:** Parámetros del proceso de fabricación de probetas de Qauchu Kullu

Parámetro	Símbolo	Unidades	Nivel inferior	Radio de diseño	Nivel superior
Temperatura de moldeo	$TM$	°C	165	170	175
Madera capirona	$MC$	%	35	50	65
Polipropileno reciclado	$PPR$	%	30	50	70
Fuerza aplicada	$F_C$	Ton-f	3	9	15
Tamaño de partícula	–	mm	1,9	3,33	5,15
Tiempo de prensado	$tp$	min	10	15	25



**Figura 1.8.** Calentamiento y prensado de probetas de Qauchu Kullu.

El parámetro de fuerza aplicada no es útil, pues solo sirve como referencia para el moldeado de probetas de las dimensiones señaladas. Por ese motivo, es necesario realizar la conversión a presión. Con ello, obtenemos un parámetro que puede ser utilizado para configuraciones dimensionales aleatorias. En la Figura 1.9 podemos ver los valores de presión para muestras diferentes.

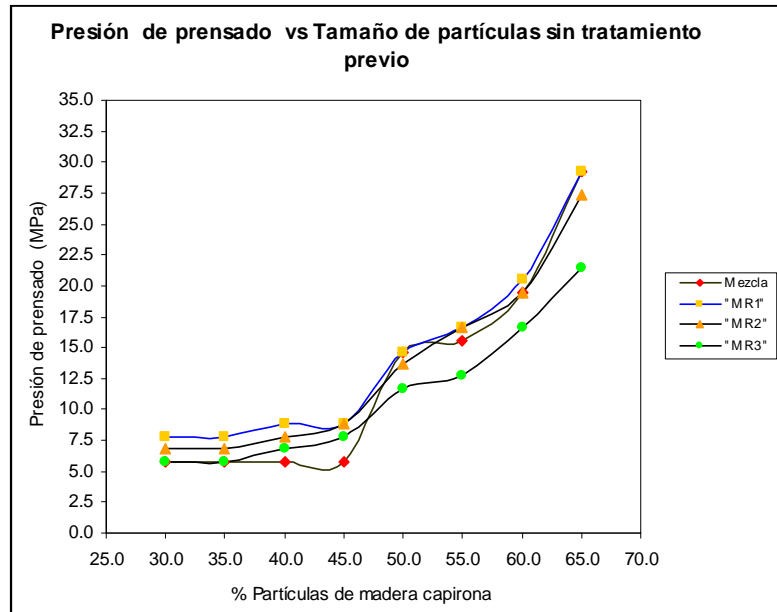


Figura 1.9. Presión de prensado vs tamaño de partícula.

En los siguientes gráficos podremos observar los resultados obtenidos.

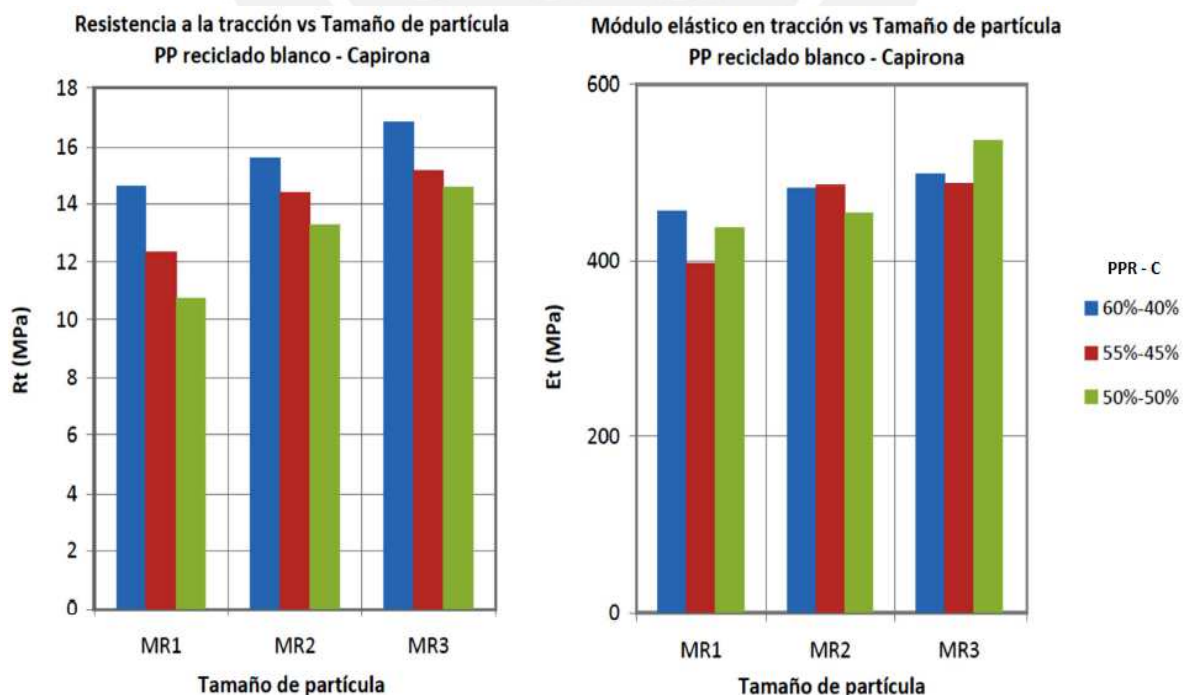


Figura 1.10. Resultados de resistencia a la tracción y módulo elástico en tracción.

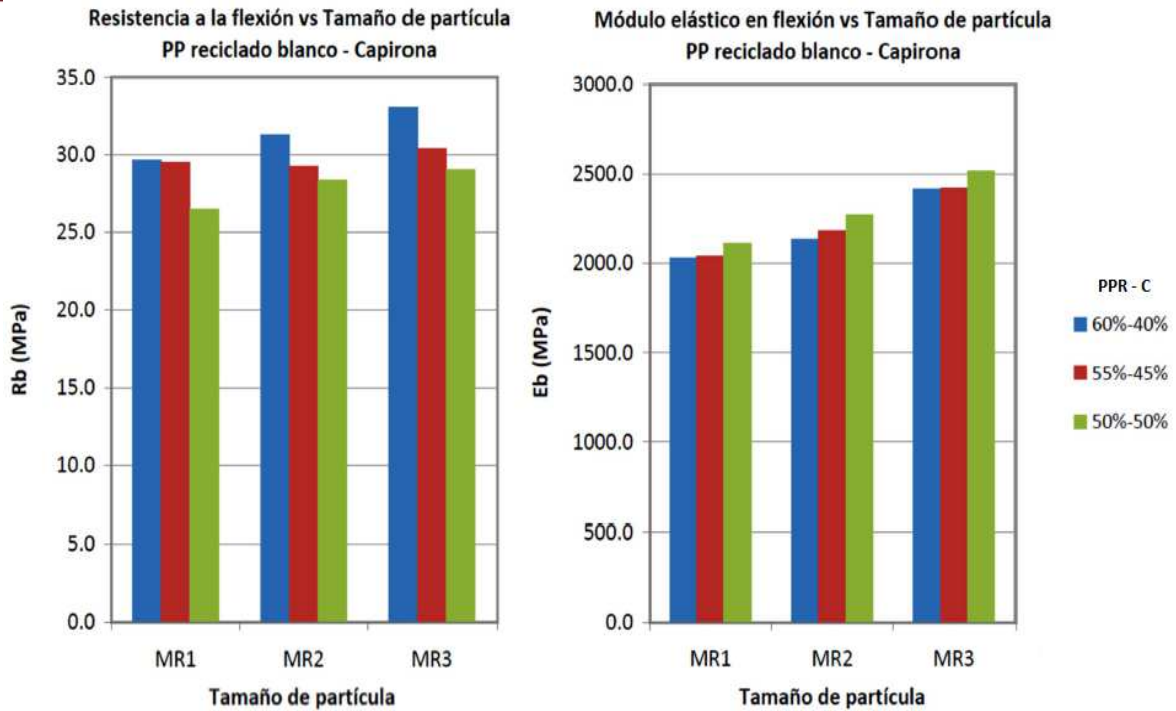


Figura 1.11. Resultados de resistencia a la flexión y módulo elástico en flexión.

NOTA: **PPR – C** hace referencia a las cantidades relativas del polipropileno reciclado con respecto a la madera capirona.

El tamaño de partículas está clasificado según la nomenclatura MR1, MR2 y MR3. Esta hace referencia al tipo de malla utilizado para el tamizado.

Tabla 1.3: Muestras utilizadas en el tamizado

Muestra	Malla normalizada	Tamaño de partículas (mm)
MR1	MESH ‘ 4	5,15
MR2	MESH ‘ 6	3,33
MR3	MESH ‘ 10	1,9

Las propiedades obtenidas del Qauchu Kullu fueron las siguientes [Sierra 2012]:

- Bajo peso específico
- Resistencia y rigidez específicas regulables
- Buena resistencia química y a los insectos
- Bajo nivel de absorción de agua
- Buena estabilidad dimensional

A su vez, se elaboraron las siguientes conclusiones:

- El módulo elástico en tracción ( $E_t$ ) y el módulo elástico en flexión ( $E_b$ ) se incrementan gradualmente en función del contenido en volumen de la madera, mientras que la resistencia a la tracción ( $R_t$ ) y la resistencia a la flexión ( $R_b$ ) disminuyen porque se reduce la adhesión entre la matriz y el refuerzo.
- Los módulos elásticos, la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión aumentan según disminuye el tamaño de las partículas.

### b) Selección de muestra para superficies

Dado que existen varias combinaciones de material compuesto formado por polipropileno y madera capirona, se debe seleccionar la muestra con las cantidades relativas de cada constituyente que refleja las mejores propiedades mecánicas, según los datos provenientes de la investigación metodológica. Posteriormente, se debe comprobar que las propiedades de la muestra seleccionada puedan soportar los esfuerzos ocasionados por las condiciones de uso. Esta verificación se realizará por medio de un análisis de elementos finitos (ver siguiente sección).

En los gráficos se puede observar que los valores de resistencia a la tracción y resistencia a la flexión son mayores en las muestras de 60%-PPR y 40%-C. Sin embargo, los resultados de módulos elásticos son ligeramente mayores en muestras 50%-PPR y 50%-C. Dado que es un material en experimentación y no se conoce su comportamiento ante distintas sollicitaciones, en este caso, optamos por seleccionar la muestra con mayores valores de resistencia. Por este motivo, en primera instancia, analizando los resultados podemos determinar que la mezcla idónea para la fabricación de las superficies de las carpetas es cuando el material compuesto contiene 60% de matriz de polipropileno y 40% de refuerzos de madera capirona con tamaño de partícula MR3 (1,9 mm).

**Tabla 1.4:** Propiedades del material compuesto [PPR-C (60-40%) – MR3]

Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia a la tracción	16,8	N/mm <sup>2</sup>
Módulo elástico en tracción	490	N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la flexión	33	N/mm <sup>2</sup>
Módulo elástico en flexión	2450	N/mm <sup>2</sup>
Densidad	0,79	g/cm <sup>3</sup>

### **c) Análisis de resistencia y rigidez**

Se ha mencionado que el diseño de las superficies de las carpetas ha sido realizado considerando la comodidad del usuario. Sin embargo, se debe comprobar que estas superficies tengan la suficiente resistencia y rigidez cuando sean fabricadas a partir del material compuesto Quachu Kullu, de tal manera que respondan adecuadamente a las condiciones de uso. En ese sentido, se ha optado por realizar una simulación en un software especializado que permita analizar su comportamiento mecánico. Para tal fin, se ha empleado el software ANSYS, el cual utiliza el método de elementos finitos.

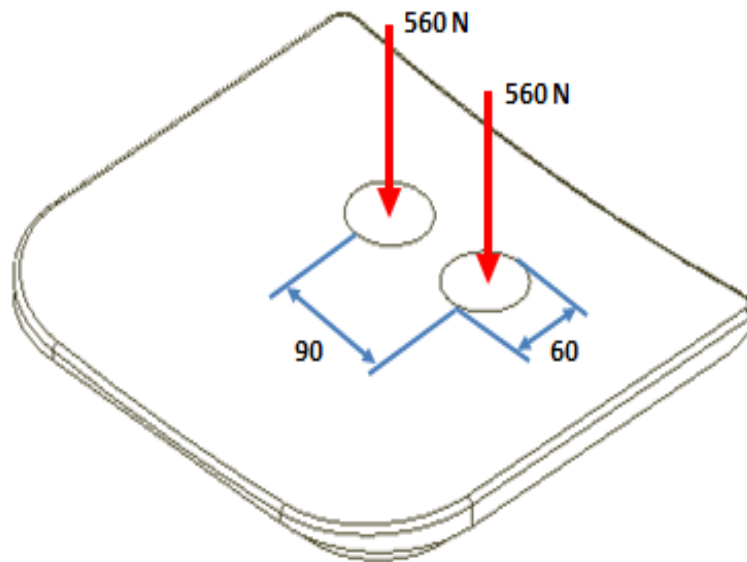
#### **Consideraciones previas**

Para el análisis de elementos finitos es necesario conocer ciertas propiedades del material analizado. En este caso, las superficies de apoyo de la carpeta están fabricadas con Quachu Kullu, un material compuesto cuyo comportamiento es asumido como lineal y sus propiedades se pueden considerar isotrópicas según el estudio experimental realizado en el Área de Materiales (ver anexo 1), dado que no existe una dirección determinada de las partículas de madera capirona. La muestra seleccionada está formada por 60% de polipropileno y 40% de madera capirona, y sus propiedades se pueden observar en la Tabla 1.4. Para la evaluación por elementos finitos se ha considerado al módulo elástico en flexión como referencia para el cálculo, ya que esta sollicitación se asemeja a las condiciones de empleo de las superficies.

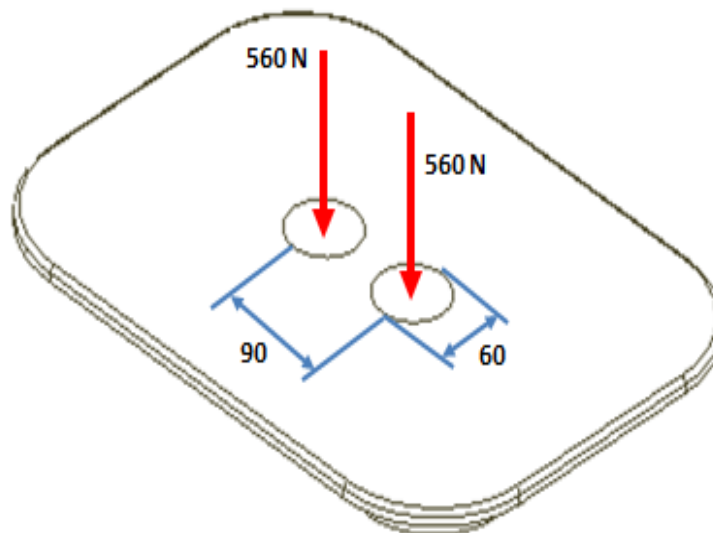
#### **Análisis estático**

Se ha realizado un análisis estático a cada una de las superficies considerando los parámetros de carga y las condiciones de operación. En los casos del asiento y el tablero se ha determinado que la condición crítica sucede cuando el usuario se sienta sobre alguna de estas superficies. Bajo esa consideración, es importante determinar cuál es la fuerza aplicada y su punto de aplicación. Según estudios antropométricos, en posición sedente, cerca del 75% del peso total del cuerpo de un individuo es soportado únicamente por 26 cm<sup>2</sup> de las tuberosidades isquiáticas [Panero 1996]. Entonces, para el análisis se ha determinado que el peso se aplicará en dos áreas idealizadas como circunferencias de 60 mm de diámetro. Por otro lado, previamente se ha establecido que estas áreas de apoyo se encuentran distantes 90 mm. Finalmente, se considera pertinente seleccionar como caso crítico de evaluación a un individuo de 150 kg. En ese sentido, la fuerza total aplicada sería 112 kg-f (75% del peso total de la persona), lo cual es equivalente a 1120 N. Por lo tanto, en cada área se ejerce una fuerza de 560 N (Ver Figura 1.12 y Figura 1.13).

En el caso del respaldo, se ha considerado como caso crítico, la acción de una fuerza equivalente al 50% del peso del individuo sobre un área que refleje el contacto entre su superficie y la espalda del usuario. De esta manera, para una persona de 150 kg, la fuerza aplicada sería equivalente a 750 N (Ver Figura 1.15).



**Figura 1.12.** Fuerza aplicada sobre el asiento.



**Figura 1.13.** Fuerza aplicada sobre el tablero.

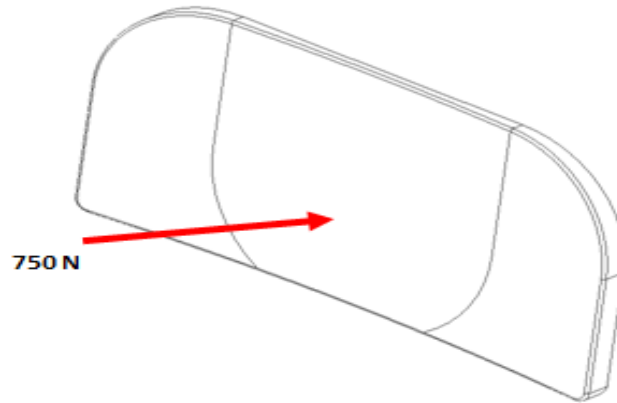


Figura 1.14. Fuerza aplicada sobre el respaldo.

**Resultados**

En las siguientes imágenes se muestran los esfuerzos equivalentes y las deformaciones máximas para cada superficie analizada.

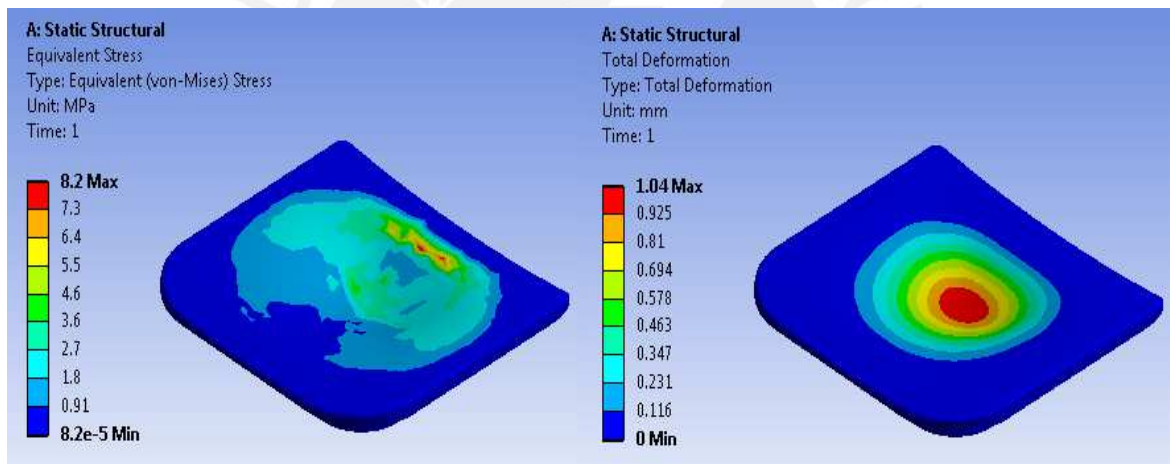


Figura 1.15. Esfuerzo (izquierda) y deformación (derecha) del asiento.

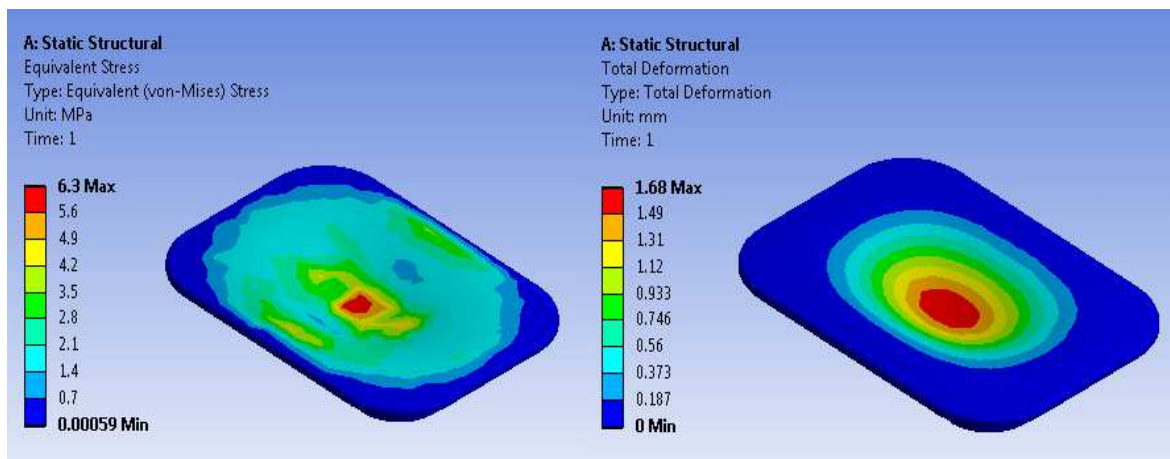
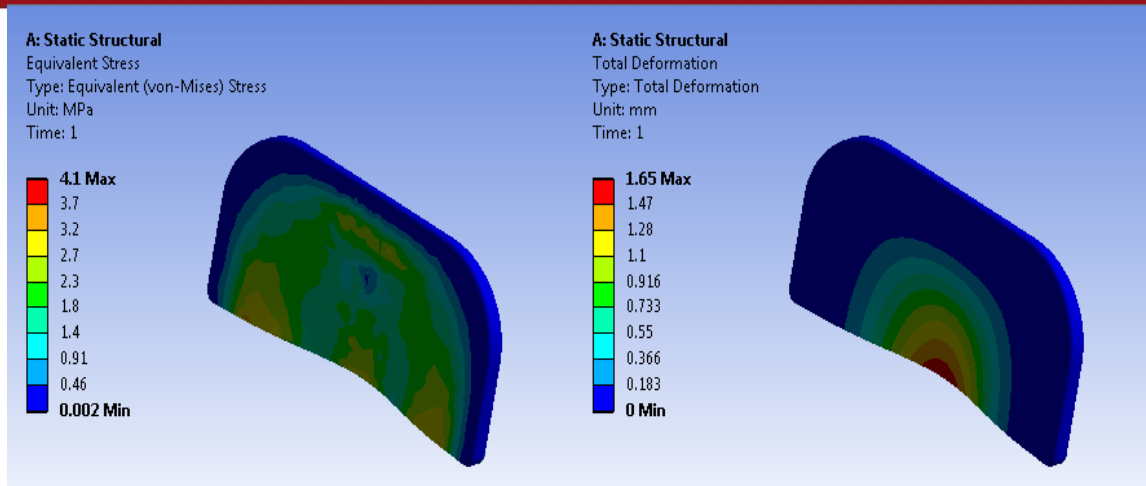


Figura 1.16. Esfuerzo (izquierda) y deformación (derecha) del tablero.



**Figura 1.17.** Esfuerzo (izquierda) y deformación (derecha) del respaldo.

### Evaluación técnica

Analizando los resultados, podemos observar que no existen mayores inconvenientes en cuanto a la resistencia del material compuesto, dado que los valores de esfuerzos máximos fluctúan entre 4 y 8 MPa en los casos analizados. Los mayores esfuerzos equivalentes se presentan en los casos del asiento (8,2 MPa) y del tablero (6,3 MPa), lo cual era previsible de acuerdo a las condiciones planteadas. En el caso del respaldo, el esfuerzo máximo es de menor magnitud (4,1 MPa). Si tomamos como valor de esfuerzo de fluencia del Qauchu Kullu a la resistencia a la tracción (16,8 MPa), el factor de seguridad promedio obtenido es aproximadamente 3. Del mismo modo, si para el esfuerzo de fluencia se toma como referencia a la resistencia a la flexión (33 MPa), el factor de seguridad promedio aumenta hasta 6 aproximadamente. Estos resultados garantizan que las superficies se comportarán eficazmente ante las sollicitaciones de uso.

Por otro lado, si evaluamos la rigidez de las superficies, se puede observar que las deformaciones producidas por las cargas se encuentran entre 1 y 2 mm. Para el asiento, la deformación presentada es 1,04 mm, mientras que en los casos del tablero y del respaldo se obtuvo 1,64 y 1,65 mm respectivamente. Tomando como referencia los ensayos mecánicos realizados con este material, se puede establecer como valor máximo permisible 3 mm de deformación ante el efecto de una carga. En base a ello, podemos asegurar que las deformaciones de las superficies se encuentran en un rango aceptable y, en consecuencia, se asegura la rigidez de las superficies.



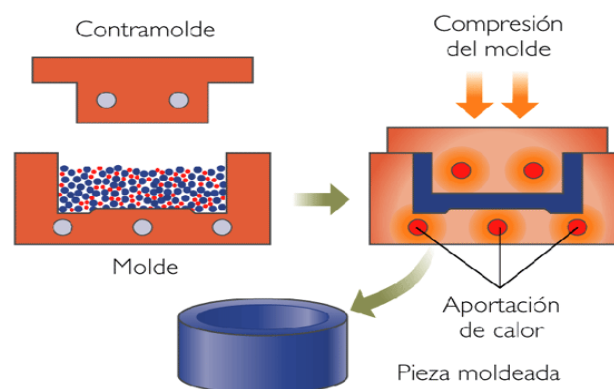
## 1.5 MOLDEO POR COMPRESIÓN DE COMPUESTOS MADERA-PLÁSTICO

En la industria actual, existen dos métodos comunes para la fabricación por moldeo de productos utilizando materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzos de madera. Estos son el moldeo por inyección y el moldeo por compresión. El moldeo por inyección consiste en introducir el material a una cámara a altas temperaturas en donde se mezcla y, posteriormente, se envía a la cavidad de un molde para su enfriamiento y solidificación. Por otro lado, en el moldeo por compresión, el material es colocado en el molde, el cual se calienta hasta la temperatura de moldeo. Luego, se aplica una fuerza para que el material adquiera la forma del molde y, paralelamente, se produce el enfriamiento.

El sistema de moldeo seleccionado para la fabricación de las superficies de las carpetas será el moldeo por compresión, ya que el método de moldeo por inyección implica calentar el material compuesto a mayores temperaturas, lo cual provocaría la degradación de las partículas de capirona del Qauchu Kullu. Además, el empleo del sistema por compresión supone la utilización de componentes menos costosos y con mayor disponibilidad que en el caso del moldeo por inyección, con lo cual se obtendrá una alternativa tecnológica más viable. Cabe señalar, que se disponen de los resultados del estudio experimental del compuesto polipropileno-capirona, lo cual constituye una importante fuente de información para la determinación de los parámetros del proceso.

### 1.5.1 Moldeo por compresión convencional

Generalmente, en el moldeo por compresión se utiliza una prensa hidráulica, la cual aplica una presión sobre el contramolde, obteniéndose la forma deseada. Para que esto ocurra, se debe aportar calor de tal manera que el material alcance su temperatura de fusión y pueda fluir.



**Figura 1.18.** Sistema de moldeo por compresión convencional.

### Procedimiento de moldeo por compresión:

1. Colocación del material (carga) en el molde
2. Calentamiento del molde hasta la temperatura de moldeo
3. Aplicación de presión sobre el contramolde
4. Enfriamiento del molde
5. Extracción de pieza

#### 1.5.2 Variables de moldeo

El diseño de los moldes para la fabricación de las superficies de las carpetas debe contemplar los parámetros relacionados al sistema de moldeo por compresión. Estos pueden ser determinados en base al proceso descrito y a las condiciones utilizadas en la fabricación de muestras del compuesto polipropileno-capirona. A continuación, se mencionan los principales parámetros del proceso y sus respectivos valores. La información fue obtenida de los datos registrados en la fabricación de probetas.

- Temperatura de trabajo: este valor constituye el nivel de temperatura que se debe alcanzar para que el material termoplástico pueda adoptar una nueva estructura geométrica. En nuestro caso, este valor debe ser cercano a la temperatura de fusión del polipropileno (168-176°C aprox.). Lo ideal sería fijar la temperatura de trabajo es 180°C, sin embargo, se plantea alcanzar 200°C para garantizar el calentamiento del molde y la fusión del compuesto. El tiempo de calentamiento no debe sobrepasar 40 minutos, de tal manera, que el proceso de producción sea viable. Además, el incremento significativo del tiempo de calentamiento podría causar la degradación de la madera.
- Características del material: estas definirán las propiedades de la pieza moldeada. Por ello, las proporciones relativas del polímero y las partículas de madera deben ser acordes a las condiciones de empleo de las superficies. Para este caso, la muestra seleccionada tiene 60% de polipropileno reciclado y 40% de madera capirona recuperada.
- Condiciones de prensado: estas hacen referencias a las variables que serán controladas durante la aplicación de presión al contramolde (plato superior). Estas son la fuerza aplicada, la velocidad de cierre de la prensa y el tiempo de prensado (10-15 min). En la Figura 1.9 podemos apreciar que los valores de presión aplicada fluctúan entre 5 y 30 MPa para el moldeo de muestras. Para el caso de las superficies de las carpetas (60% PPR-40% MC), la presión de moldeo aplicada será 7 MPa para asegurar la cohesión del material compuesto en la forma deseada (ver sección 2.1).

- Temperatura de enfriamiento: En el caso de los materiales termoplásticos se debe enfriar el molde hasta la temperatura en la cual se solidifica el polímero y la pieza moldeada adquiere consistencia. En el caso del polipropileno, la temperatura de enfriamiento mínima es 65°C. El tiempo para enfriar el molde está en función del medio utilizado (agua o aire) y de los datos obtenidos en la investigación del Qauchu Kullu. Las muestras que cumplieron los requisitos dimensionales fueron enfriadas mientras se realizaba el prensado. Por este motivo, el tiempo de enfriamiento no debe sobrepasar los 15 minutos.

### 1.5.3 Moldeo por compresión de termoplásticos

El proceso de moldeo por compresión convencional se puede emplear tanto para materiales termoestables como para termoplásticos. Sin embargo, para estos últimos el proceso se torna más largo y costoso.

En el proceso de moldeo por compresión de materiales termoestables podemos diferenciar dos etapas. La primera es aquella en la cual se posiciona la carga en la cavidad del molde y, la segunda, es cuando se eleva la temperatura y se aplica presión en el molde. Esta última etapa recibe el nombre de curado y en ella se producen reacciones a nivel molecular que permiten el endurecimiento del compuesto. Luego del curado, se retira la pieza moldeada aún caliente pues estos materiales son dimensionalmente estables [Callister 2007]. Es en ese punto del proceso que radica la principal diferencia con el moldeo de termoplásticos. Para este tipo de materiales, luego de alcanzar el punto de fusión, se debe enfriar la pieza aplicando presión hasta un nivel de temperatura que asegure su solidificación y facilite su extracción. Debido a las características del moldeo de materiales termoplásticos explicadas anteriormente, la duración del ciclo de trabajo se alarga considerablemente pues debe considerarse el tiempo adicional que involucra enfriar la pieza. Además, los costos de operación se elevan pues debe implementarse un sistema de enfriamiento que consumirá más recursos.

En este contexto, las nuevas tecnologías para el moldeo de termoplásticos realizan el proceso de moldeo en estaciones independientes, de tal forma que se optimiza el empleo de energía y se reduce el tiempo del ciclo de trabajo. En la primera estación se carga el material en el molde; luego, se traslada a la estación de calentamiento, en la cual hay un horno donde se calienta el molde hasta la temperatura de fusión del material; y finalmente, llega a la estación de enfriamiento, donde una prensa aplica la presión requerida y se enfría el molde mediante agua o aire.

En este caso, se implementarían las siguientes estaciones:

- Estación 1: Carga del material / Extracción de la pieza
- Estación 2: Calentamiento sin presión
- Estación 3: Enfriamiento con presión

Este planteamiento permitiría establecer un ciclo de trabajo en el cual se pueda trabajar paralelamente varias superficies del ensamble de la carpeta (Ver Figura 1.19). Por ejemplo: mientras se carga el respaldo, se calienta el tablero y se enfría el asiento.

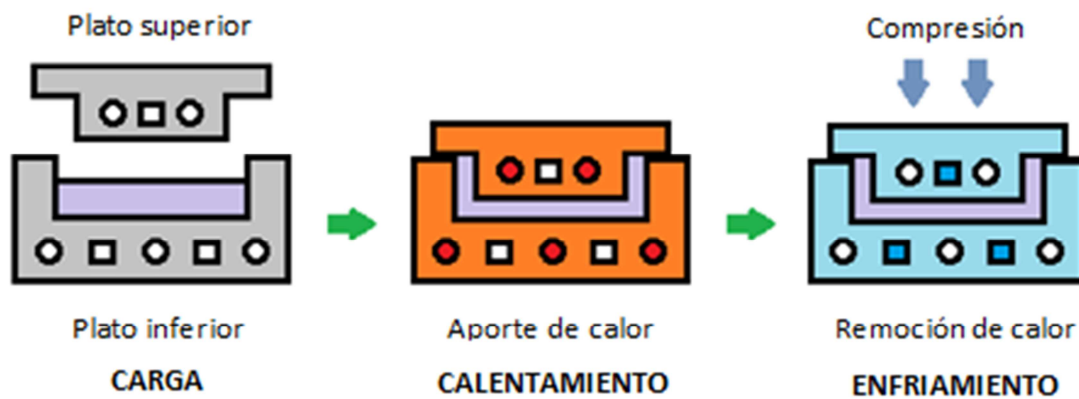


Figura 1.19. Sistema de moldeo por compresión en estaciones independientes.

#### 1.5.4 Metodología de fabricación

En la sección anterior se describió el proceso de moldeo de compresión de termoplásticos. Sin embargo, para una mejor comprensión del proceso, en la Tabla 1.5 se lo describe detalladamente, considerando los tiempos y valores de temperatura determinados previamente.

Tabla 1.5: Metodología de fabricación

Paso	Descripción
<b>ESTACIÓN 1: CARGA DE MATERIAL</b>	
1	Limpiar y lubricar el molde con un desmoldante adecuado para el material compuesto empleado.
2	Pesar las partículas de madera y las granzas de polipropileno de acuerdo a las cantidades relativas establecidas y realizar una mezcla homogénea.
3	Colocar la carga de material compuesto en el plato inferior del molde y luego posicionar el plato superior.

<b>ESTACIÓN 2: CALENTAMIENTO</b>	
4	Trasladar el molde de la estación de carga hacia a la de calentamiento (*).
5	Posicionar el molde cargado con material compuesto en el horno de calentamiento (**).
6	Esperar la fusión del polipropileno por un lapso no mayor a 40 minutos.
7	Retirar el molde caliente (aprox. 200°C) y transportarlo hasta la estación de enfriamiento (*).
<b>ESTACIÓN 3: ENFRIAMIENTO</b>	
8	Posicionar el molde sobre el dispositivo de plataforma de prensado.
9	Desplazar la prensa hacia abajo hasta hacer contacto con el plato superior del molde y aplicar una presión equivalente a 7 MPa (**).
10	Encender el dispositivo de enfriamiento y mantener la prensa aplicando la presión indicada (**).
11	Esperar que la temperatura del centro del molde sea 65°C, lo cual ocurrirá en un tiempo menor a 15 minutos y retirar la fuerza ejercida.
12	Activar el dispositivo de eyección de pieza, pero no retirarla del molde (**).
13	Trasladar el molde nuevamente hacia la estación de carga (*).
<b>ESTACIÓN 1: CARGA DE MATERIAL</b>	
14	Retirar el plato superior del molde y, luego, el bloque lateral desmontable del molde (***). Finalmente, retirar la superficie moldeada con cuidado.
15	Colocar nuevamente el bloque lateral y reiniciar el proceso de carga.

(\*) El transporte del molde se realiza por medio de un sistema amortiguado que no forma parte del alcance de esta tesis (ver Estructura de funciones – Figura 1.20).

(\*\*) En la sección 1.6.4 se muestran la selección de los dispositivos mencionados.

(\*\*\*) En la sección 4.2 se especifican los componentes del molde.

## 1.6 DETERMINACIÓN DEL PROYECTO ÓPTIMO DE DISEÑO

### 1.6.1 Planteamiento de la necesidad

El objetivo de este trabajo es el diseño de un molde que permita la fabricación de superficies de carpetas ergonómicas (tablero, asiento y respaldo) mediante un sistema de compresión térmica, utilizando como materia prima un compuesto formado por polipropileno reciclado y madera capirona recuperada.

### 1.6.2 Lista de exigencias

La lista de exigencias constituye una fuente de requisitos para la necesidad planteada, en la cual se determinan las exigencias (E) y/o deseos (D) del diseño.

#### FUNCIÓN PRINCIPAL

E	Fabricar superficies de carpetas ergonómicas (tablero, asiento y respaldo), con las propiedades mecánicas y dimensiones geométricas correctas, de tal modo, que el ensamble final pueda ser utilizado por un individuo.
---	---

#### CARACTERÍSTICAS DE PRODUCCIÓN

E	La temperatura de molde no debe sobrepasar los 200 °C y el tiempo que permanece en ese estado no debe sobrepasar 40 minutos, para aumentar el flujo de producción.
E	El tiempo de enfriamiento del molde hasta 65 °C debe ser menor a 15 minutos, de tal manera, que la pieza obtenida tenga rigidez y pueda ser removida.
E	El molde debe soportar 7 MPa de presión de moldeo. De esta manera, se asegura una correcta cohesión del material compuesto.
D	El número de colaboradores debe ser como máximo 2 técnicos con la capacitación adecuada en el funcionamiento del sistema de moldeo.

#### CONTROL DE CALIDAD

E	Las superficies de las carpetas deberán aprobar las pruebas necesarias (resistencia mecánica, comportamiento frente a sustancias químicas, etc.) para garantizar su comercialización en el mercado local. Los ensayos se realizarán según la norma BS EN 1729-2:2012.
---	---

**MATERIA PRIMA**

E	El material utilizado para la fabricación de las superficies de las carpetas es un compuesto formado por una matriz termoplástica de polipropileno (60%) y partículas de madera capirona recuperada (40%). El tamaño de las partículas de refuerzo de madera es de 1,9 mm.
---	--

**GEOMETRÍA**

E	La geometría del molde deberá garantizar la extracción sin dificultades de la superficie moldeada.
E	El molde deberá ser hermético para impedir el ingreso de sustancias contaminantes en su interior que afecten las propiedades del producto.

**FABRICACIÓN**

E	El molde podrá ser fabricado en cualquier taller de manufactura de Lima equipado con un centro de mecanizado.
E	Los materiales de los componentes del molde deberán ser adquiridos en el mercado local. Estos deben ser seleccionados en función a los parámetros de moldeo (temperatura, presión aplicada) y de operación (costos, propiedades mecánicas, etc.).

**SEGURIDAD**

E	El molde debe garantizar la seguridad del mismo y de los operarios mientras se encuentre en funcionamiento.
E	Las posibles zonas de peligro (sistema de calentamiento, fuente de energía eléctrica, etc.) deberán ser señalizadas para evitar accidentes.

**1.6.3 Estructura de funciones**

En la Figura 1.22 se muestra la estructura de funciones del proceso de moldeo, la cual nos permitirá definir las alternativas de solución para cada función parcial del proceso y, luego, determinar el proyecto óptimo en base a la realización de análisis técnico-económicos.

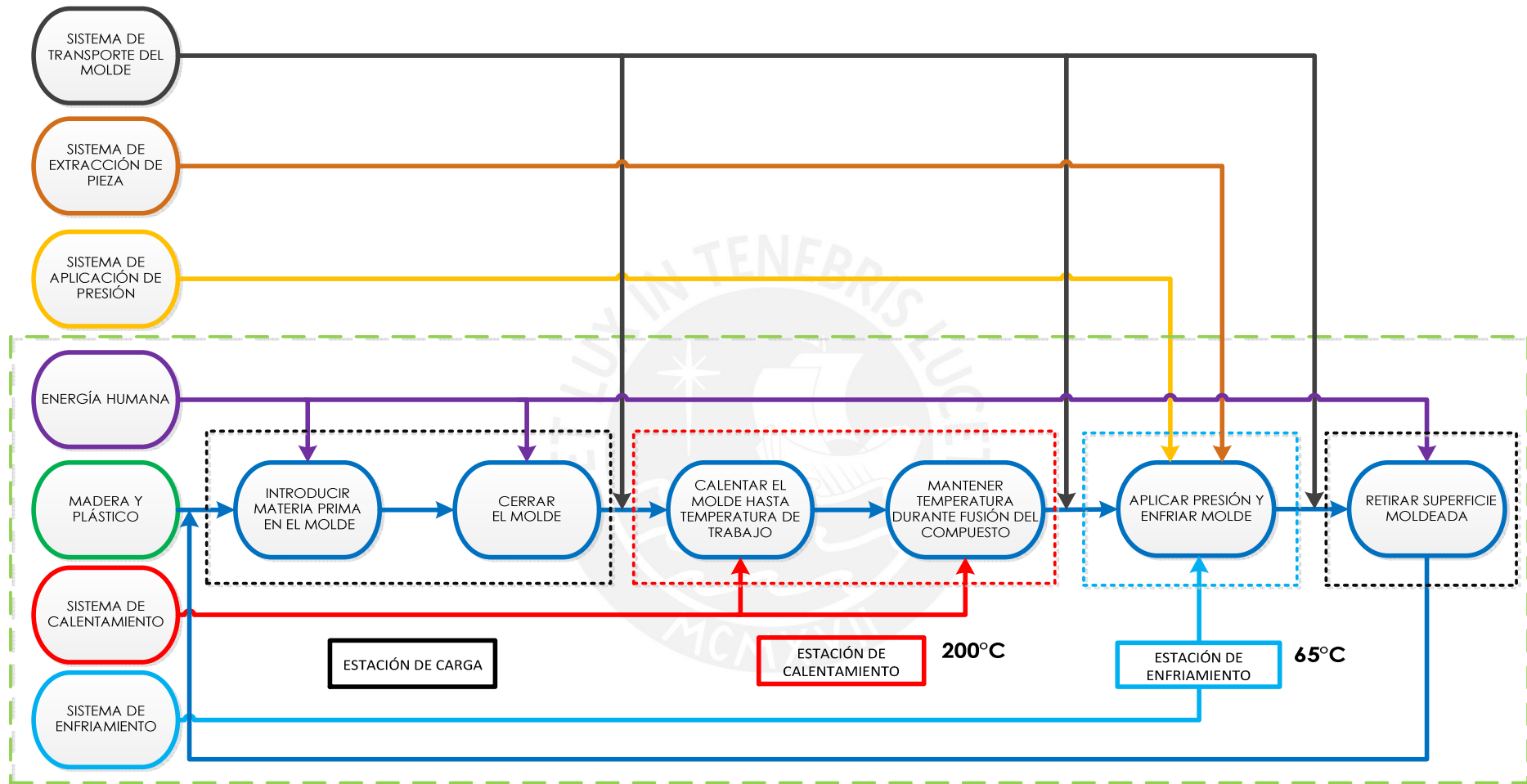


Figura 1.20. Estructura de funciones del sistema de moldeo por compresión.

**Nota:** El alcance de la presente tesis está limitado por el diseño de los componentes que se encuentran dentro del recuadro punteado.



#### 1.6.4 Alternativas de solución

A continuación, se analizarán las alternativas tecnológicas disponibles para cada función parcial del proceso de moldeo. Este análisis comprende la determinación del tipo del molde, el método de aplicación de presión, el análisis de los sistemas de calentamiento y enfriamiento; y el método de extracción de la superficie moldeada.

##### a) Moldes

El proceso de moldeo por compresión consiste en ejercer presión sobre un compuesto hasta que adopte la geometría requerida mientras se produce el enfriamiento. En ese sentido, el molde debe permitir que dicho proceso se realice de manera rápida, económica y efectiva.

##### Material del molde:

El material del molde influye directamente en el diseño del mismo. Por ello, es muy importante seleccionar un material idóneo para las características de operación planteadas. Se plantea como opción el empleo de Alumold (ver anexo 2), una aleación de aluminio de buena conductividad térmica y aceptables propiedades mecánicas.

##### Moldes según grado de automatización del proceso:

Esta clasificación categoriza a los moldes en tres subgrupos: manuales, semi-automáticos y automáticos [Groover 2007].

- Moldes manuales: estos reciben este nombre porque todas las operaciones durante el proceso de moldeo se realizan de forma manual. Estas operaciones incluyen el posicionamiento de la carga, la apertura y separación de sus mitades, la extracción de las piezas y el retiro del molde de la plataforma de prensado. Este tipo de molde se utilizan normalmente para prototipos.
- Moldes semiautomáticos: con este tipo de molde, la aplicación de la fuerza durante el prensado se realiza mediante un ciclo programado pero la manipulación de la carga permanece siendo manual. Se utiliza para producción de lotes de mayor cantidad.
- Moldes automáticos: este clase moldes permite realizar todo el proceso de forma automática, tanto el posicionamiento de la carga en el molde como la aplicación de la fuerza de presando en los tiempos determinados. Su utilización conlleva a un elevado costo debido al alto grado de automatización. Están diseñados para la producción a gran escala.

**Tabla 1.6:** Comparación de moldes según grado de automatización de proceso

	Manual	Semiautomático	Automático
<b>Costos de operación/instalación</b>	Bajo costo de operación. Nivel de instrucción básico de operario.	Bajo costo de operación. Moderado costo de adquisición.	Elevados costos de instalación por uso de componentes electrónicos. Alto costo de operación por elevado nivel técnico del operario.
<b>Mantenimiento</b>	Fácil mantenimiento.	Complicado mantenimiento.	Complicado mantenimiento.
<b>Nivel de producción</b>	Utilizado para prototipos o pequeños lotes.	Utilizado para lotes de mediana cantidad.	Utilizado para producción a escala masiva.
<b>Espacio</b>	Ocupa reducido espacio.	Requiere de amplio espacio.	Requiere de amplio espacio.
<b>Tiempo de operación</b>	Ciclo de larga duración. Todas las operaciones son manuales.	Ciclo de regular duración. El posicionamiento de la carga y la extracción de la pieza son manuales.	Ciclo de corta duración. Los procesos se realizan automáticamente.

La selección del tipo de molde según el grado de automatización del proceso se realizará de acuerdo a un análisis técnico-económico.

**Tabla 1.7:** Análisis técnico-económico del tipo de molde según grado de automatización

Factor de ponderación	Criterio de evaluación	Puntaje
A: Costos de operación/instalación	1: Prescindible	0: Malo
B: Mantenimiento	2: Importante	1: Regular
C: Nivel de producción	3: Muy importante	2: Bueno
D: Espacio	4: Determinante	3: Muy bueno
E: Tiempo de operación		

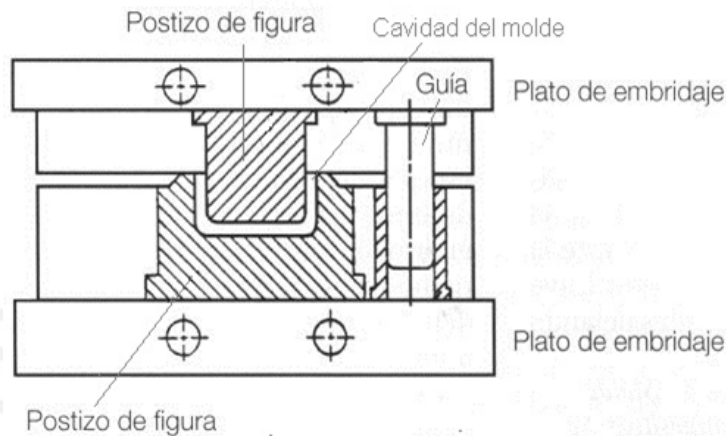
Criterio de evaluación	A	B	C	D	E	
<b>Factor de ponderación</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>Suma ponderada</b>
Manual	3	3	1	3	1	<b>31</b>
Semiautomático	1	1	2	2	2	<b>20</b>
Automático	1	1	3	2	3	<b>24</b>

De acuerdo al análisis realizado, el molde seleccionado es de tipo manual.

### Moldes según configuración macho-hembra:

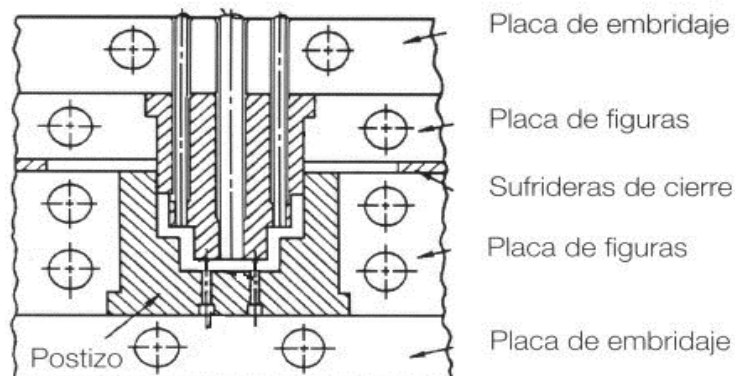
La configuración geométrica de los componentes macho-hembra clasifica a los moldes de la siguiente manera: de platos, positivos y semipositivos.

- Moldes de platos: esta clase constituye los moldes de fabricación más simple y son utilizados para piezas de geometría sencilla. Están formados por dos platos en los cuales se posicionan los postizos. Además, tienen guías para garantizar el correcto alineamiento durante la apertura y cierre del molde.



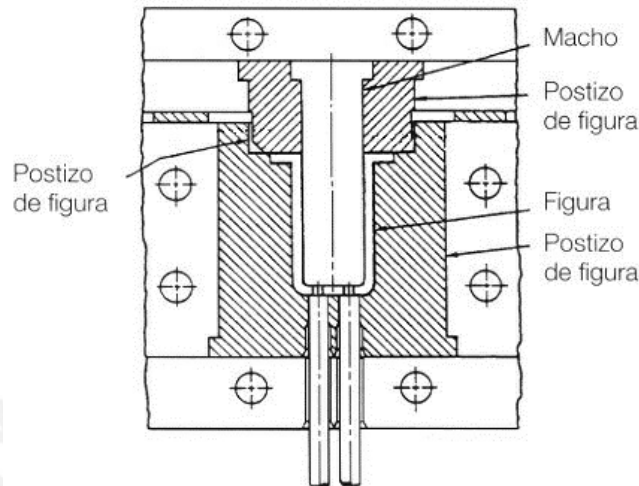
**Figura 1.21.** Molde de platos.

- Moldes positivos: en este tipo de moldes, la fuerza de la parte superior se transmite en la cavidad situada en la parte inferior. Esto permite que la presión se aplique directamente sobre el compuesto situado en dicha cavidad. El funcionamiento es análogo a un sistema cilindro-pistón, en el cual hay un juego axial entre ambos componentes. En este caso, si el juego es muy amplio el material se escapa y la pieza no se completa. En cambio, si el juego es demasiado reducido, el aire no se libera y se producen burbujas de aire en la pieza.



**Figura 1.22.** Molde positivo.

- **Moldes semipositivos:** estos son la combinación de los moldes descritos anteriormente. En este caso, la parte superior que aplica la fuerza tiene contacto directo con la cavidad. Con ello, se mejora el control del espesor de la rebaba y las dimensiones, las cuales son determinadas a partir de la línea de partición.



**Figura 1.23.** Molde semipositivo.

**Tabla 1.8:** Comparación de moldes según configuración macho-hembra

	Platos	Positivo	Semipositivo
<b>Costos de fabricación</b>	Bajo costo de fabricación. Molde de geometría sencilla.	Alto costo de fabricación, debido a tolerancias de diseño del molde.	Alto costo de fabricación, debido a tolerancias de diseño del molde.
<b>Calidad de trabajo</b>	Calidad media/baja de la pieza obtenida. No existe control sobre las rebabas. Se pueden presentar burbujas de aire.	Calidad media/alta de la pieza obtenida. Se pueden presentar burbujas de aire.	Calidad alta de la pieza obtenida. Mejor control sobre rebabas y dimensiones.
<b>Facilidad de operación</b>	Fácil operación.	Fácil operación.	Fácil operación.
<b>Seguridad</b>	El material escapa fácilmente de la cavidad del molde.	Poca probabilidad de fuga de material.	Poca probabilidad de fuga de material.
<b>Mantenimiento</b>	Fácil mantenimiento.	Regular dificultad de mantenimiento debido a la complejidad del diseño.	Regular dificultad de mantenimiento debido a la complejidad del diseño.

De igual manera, se realiza el análisis técnico económico para la selección del molde.

**Tabla 1.9:** Análisis técnico-económico de moldes según configuración macho-hembra

Factor de ponderación	Criterio de evaluación	Puntaje
A: Costos de fabricación	1: Prescindible	0: Malo
B: Calidad de trabajo	2: Importante	1: Regular
C: Facilidad de operación	3: Muy importante	2: Bueno
D: Seguridad	4: Determinante	3: Muy bueno
E: Mantenimiento		

Criterio de evaluación	A	B	C	D	E	
Factor de ponderación	3	4	3	2	2	Suma ponderada
Platos	3	2	2	1	3	31
Positivo	2	3	3	2	2	35
Semipositivo	2	3	2	3	2	34

Según el análisis realizado, seleccionamos un molde positivo. Entonces, podemos concluir que el molde que será empleado será de tipo manual y positivo.

#### b) Sistema de aplicación de presión

En los sistemas de moldeo por compresión de plásticos normalmente se suele utilizar prensas verticales hidráulicas, las cuales pueden ser accionadas hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la configuración de los componentes del sistema. Estas pueden ser de tipo autónomo (aceite incluido), pero en la mayoría de los casos tienen un sistema hidráulico común para su accionamiento [SME 1998].

La utilización de un sistema hidráulico permite controlar algunos parámetros del proceso de moldeo con mayor eficiencia, debido a sus características de operación:

- Presión/fuerza: se pueden alcanzar altas presiones sin dificultad. En nuestro debemos emplear una prensa con capacidad para 7 MPa aprox. Esta es la presión necesaria para compactar el material compuesto. Sin embargo, se desea que el sistema de moldeo pueda ser utilizado para otros compuestos, por ello, se plantea que la capacidad de la prensa sea de 20 MPa como mínimo.
- Control de la velocidad: en los sistemas hidráulicos se puede controlar la velocidad de forma exacta. Esto permitirá aplicar la fuerza de manera controlada y, de esa manera, evitar problemas por sobrecargas. Además, los posicionamientos intermedios durante la carrera también se pueden obtener precisamente.

**c) Análisis del sistema de calentamiento**

El sistema de calentamiento se utiliza para elevar la temperatura del molde hasta llegar al punto de fusión del compuesto (200°C aprox.) y se adopte la forma geométrica deseada. Existen varios métodos para elevar la temperatura a esos niveles, entre los cuales podemos señalar los siguientes:

- Calentamiento por vapor: se emplea vapor saturado proveniente de una caldera.
- Calentamiento por resistencias eléctricas: se eleva la temperatura de las resistencias de acuerdo a la intensidad de corriente suministrada.
- Calentamiento por fluidos a altas temperaturas: se puede utilizar agua o aceite que fluyan por tuberías a elevadas temperaturas.

**Tabla 1.10:** Comparación de métodos de calentamiento

	<b>Vapor</b>	<b>Resistencias eléctricas</b>	<b>Fluidos a altas temperaturas</b>
<b>Costos de operación</b>	Reducidos costos de operación. Aumentan los costos por mantenimiento de caldera, tuberías y accesorios.	Moderados costos de operación.	Elevados costos de operación.
<b>Temperatura de trabajo</b>	Se puede alcanzar fácilmente la temperatura de fusión. La regulación de la temperatura no se realiza de manera sencilla.	Un conjunto de resistencias eléctricas puede alcanzar la temperatura de trabajo. Fácil regulación de la temperatura por medio de termostatos.	Con agua no se puede alcanzar la temperatura de fusión. Se limita al uso de aceite a altas temperaturas. Difícil regulación de la temperatura.
<b>Seguridad</b>	Sistema seguro con los dispositivos de seguridad adecuados.	Sistema sencillo y confiable.	Sistema seguro con los dispositivos de seguridad adecuados.
<b>Utilización de la energía</b>	Eficiencia media de ciclos de producción de vapor saturado.	Moderado consumo de energía eléctrica.	Elevadas pérdidas por calentamiento del aceite.
<b>Versatilidad</b>	La utilización de tuberías dificulta su adaptación al equipo.	Puede adaptarse fácilmente a la geometría del equipo utilizando cables.	La utilización de tuberías dificulta su adaptación al equipo.

**Tabla 1.11:** Análisis técnico-económico de métodos de calentamiento

Factor de ponderación	Criterio de evaluación	Puntaje
A: Costos de operación	1: Prescindible	0: Malo
B: Temperatura de trabajo	2: Importante	1: Regular
C: Seguridad	3: Muy importante	2: Bueno
D: Utilización de la energía	4: Determinante	3: Muy bueno
E: Versatilidad		

Criterio de evaluación	A	B	C	D	E	
Factor de ponderación	3	4	2	2	3	Suma ponderada
Vapor	2	3	2	2	2	<b>32</b>
Resistencias eléctricas	2	3	2	2	3	<b>35</b>
Fluidos calientes	1	2	2	1	2	<b>23</b>

De acuerdo al análisis técnico-económico elaborado, la mejor alternativa para el sistema de calentamiento es la utilización de resistencias eléctricas.

#### d) Análisis del sistema de enfriamiento

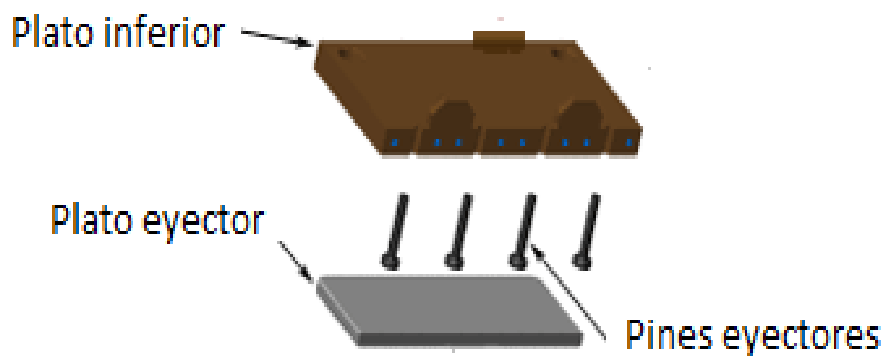
El moldeo por compresión es muy utilizado para plásticos termoestables, pero también puede ser utilizado con termoplásticos si es que estos presentan una suficiente cantidad de fibras que permitan reducir la viscosidad [SME 1998]. De acuerdo a los datos experimentales del compuesto polipropileno-capirona, el tiempo de enfriamiento hasta 65°C debe ser menor a 15 minutos, para que la pieza obtenga rigidez, cumpla con los requisitos dimensionales y pueda ser retirada.

La disminución de la temperatura del molde puede ser conseguida a través de una línea de agua de enfriamiento o por aire forzado. La primera alternativa se presenta como una opción más rápida, debido a que el agua tiene mayor capacidad de remoción de calor, con lo cual se disminuirá a mayor velocidad la temperatura del molde. Por otro lado, si se eligiera reducir la temperatura por medio de convección de aire forzado sería necesario un ventilador de elevadas dimensiones y, en consecuencia, mayores costos de operación.

En base a las condiciones de operación y costos de ambas opciones, se ha determinado que el sistema de enfriamiento será realizar mediante un flujo de agua. Para ello, el sistema debe contar con una bomba centrífuga para enviar el caudal necesario a la presión idónea. Adicionalmente, se utilizarán reservorios para el agua que será bombeado a través de la línea y para el agua residual, de tal manera, que esta pueda ser reutilizada, lo cual permitirá aumentar la eficiencia del equipo.

### e) Sistema de extracción de pieza moldeada

En los procesos de moldeo de componentes de plástico es muy importante la implementación de un sistema de extracción de piezas rápido y eficiente. Es muy común la utilización de pines eyectores montados en un plato en este tipo de procesos (ver Figura 1.24). Sin embargo, debe diseñarse un sistema que permita aplicar una fuerza en la dirección de apertura del molde (no forma parte del alcance de este trabajo), de tal manera, que los pines ejercen presión sobre la superficie inferior de la superficie moldeada y esta se desplace verticalmente.



**Figura 1.24.** Sistema de plato y pines eyectores.

Los métodos que se emplean para aplicar la presión a los pines son los siguientes:

- Sistema acoplado a prensa hidráulica: en esta clase de sistemas, se acoplan dispositivos (cadenas, guías, barras de acople) a la plataforma de la prensa hidráulica y al plato eyector. Luego de enfriar la pieza, la prensa se desplaza hacia arriba, este movimiento es aprovechado para levantar simultáneamente el plato eyector y expulsar la pieza moldeada mediante la presión ejercida por los pines.
- Sistema de aire comprimido: este método emplea un pistón neumático ubicado por debajo del plato extractor. Cuando es necesario retirar la pieza, se activa el circuito y el pistón se desplaza hacia arriba. Este método es utilizado para piezas de pequeños espesores.
- Sistema de palanca: se emplea un dispositivo de palanca acoplado al plato eyector. En este caso, la fuerza empleada para levantar el plato extractor proviene de un operario

En base a los sistemas de extracción analizados, se establece que el método empleado será el de pines eyectores accionados por un dispositivo acoplado a la prensa hidráulica.



## 1.7 PARÁMETROS DEFINITIVOS DEL PROCESO

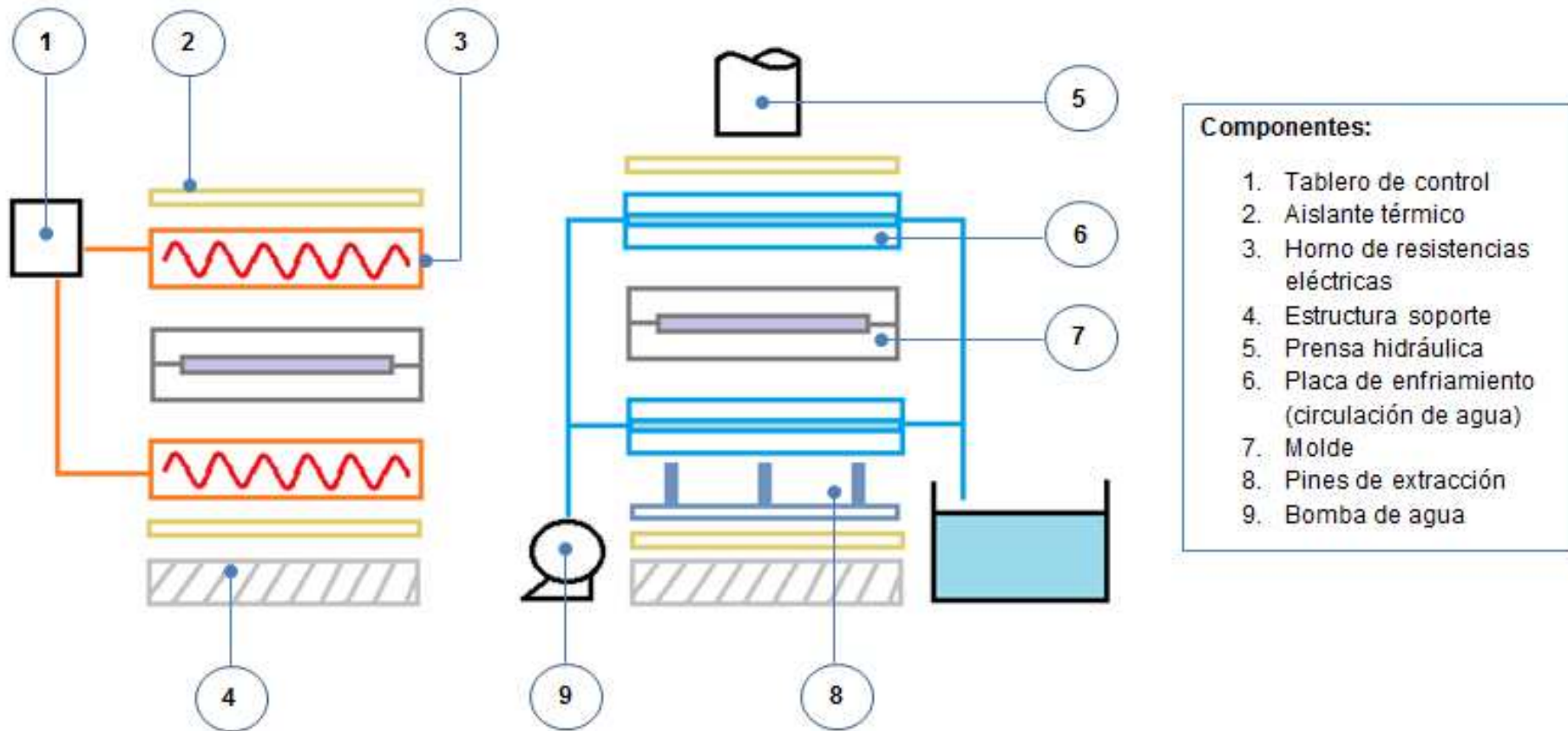
Luego de describir el marco teórico relacionado al alcance del proyecto y analizar las alternativas de solución para cada función parcial, se muestran los parámetros finales del proceso.

**Tabla 1.12:** Parámetros de diseño del molde.

Parámetro	Descripción/Valor
<b>MATERIAL COMPUESTO</b>	
Matriz termoplástica	Polipropileno reciclado
Refuerzo de fibras vegetales	Partículas de madera capirona recuperada
Cantidades relativas	PPR-C: 60-40%
Tamaño de partícula	1,99 mm
Tipo de malla	MR3
<b>VARIABLES DE MOLDEO</b>	
Temperatura de moldeo	200°C
Temperatura mínima enfriamiento	65°C
Tiempo máximo enfriamiento	15 min
Presión de moldeo	7 MPa aprox.
<b>MOLDE</b>	
Según grado de automatización de proceso	Manual
Según configuración macho-hembra	Positivo
Material	Alumold
<b>SISTEMA APLICACIÓN DE FUERZA</b>	Prensa hidráulica Capacidad: 20 MPa mínimo
<b>SISTEMA DE CALENTAMIENTO</b>	Horno de resistencias eléctricas
<b>SISTEMA DE ENFRIAMIENTO</b>	Circulación de agua
<b>SISTEMA DE EXTRACCIÓN</b>	Pines eyectores

## 1.8 ESQUEMA DE PROYECTO ÓPTIMO

En base a los parámetros de diseño definidos a lo largo del capítulo, podemos bosquejar la configuración espacial de los componentes que conformarán el sistema de moldeo.



**Figura 1.25.** Componentes de las estaciones de calentamiento y enfriamiento del sistema de moldeo.

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO MECÁNICO DEL MOLDE

En base a los parámetros definitivos del proceso establecidos en el capítulo anterior podemos realizar el diseño mecánico del molde. Este incluye los cálculos de dimensionamiento, teniendo en consideración las deformaciones producidas durante el proceso de moldeo debido a la presión aplicada por el compuesto; y por el aumento de la temperatura. De igual manera, se realiza una verificación de resistencia mecánica del molde debido a que estará sometido a la presión ejercida por la prensa.

#### 2.1 TRANSMISIÓN DE PRESIÓN EN EL MOLDE

El diseño del molde implica conocer la transmisión de presión existente durante el proceso de moldeo y su área de aplicación. En ese sentido, debemos catalogar dos presiones: la presión de moldeo ejercida directamente por la prensa ( $P_M$ ) y la presión que genera el compuesto sobre las paredes laterales ( $P_{MC}$ ).

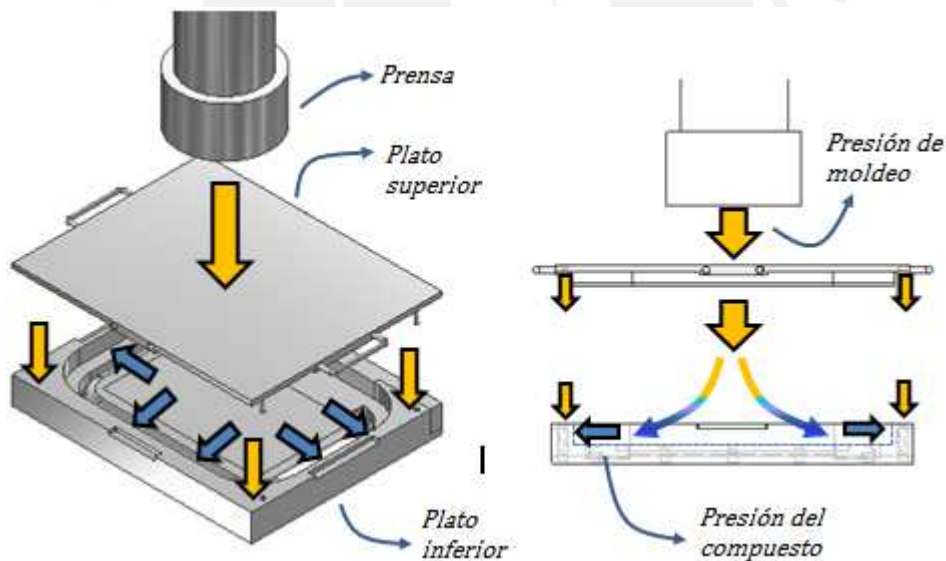
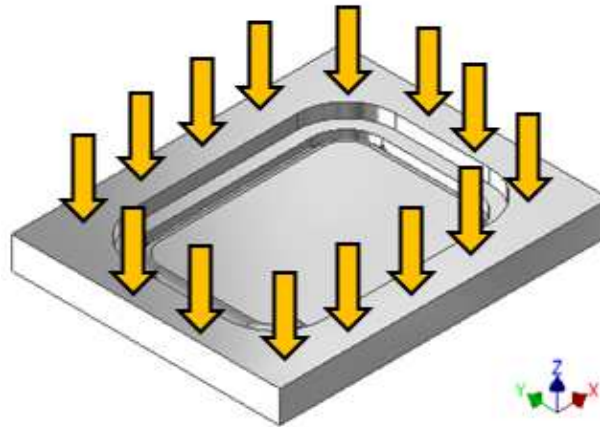


Figura 2.1. Presiones ejercidas sobre el molde.

#### Presión de moldeo

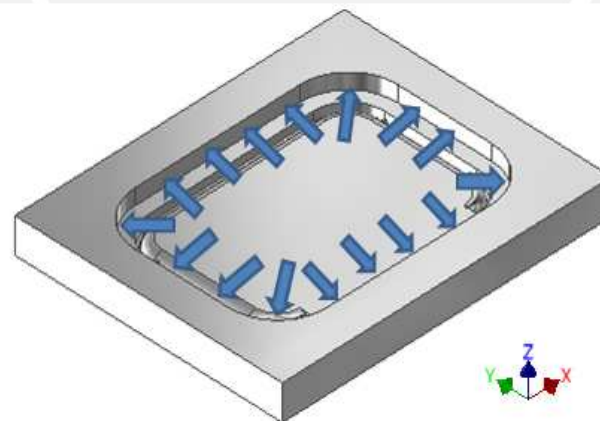
La prensa ejerce la presión de moldeo, la cual se distribuye homogéneamente, mediante un marco de perfiles entrecruzados, sobre el plato superior. Este a su vez, trasmite la presión hacia la superficie superior del plato inferior y al compuesto que se encuentra alojado en la cavidad. En el capítulo 1 se determinó que la presión de moldeo ( $P_M$ ) para la muestra seleccionada para las superficies es 7 MPa.



**Figura 2.2.** Transmisión de la presión de moldeo hacia el plato inferior.

### Presión del compuesto

La prensa aplica presión sobre el plato superior y se esta se traslada al compuesto. A su vez, este la transmite hacia la superficie interna de la cavidad. En teoría, ambas presiones deberían ser iguales, sin embargo, esta situación no es real ya que la cavidad del molde tiene un área de desfogue. Por este motivo, la presión del compuesto ( $P_{MC}$ ) es menor que la presión de moldeo. Según datos experimentales, la presión ejercida por materiales compuestos en procesos de moldeo varía de 0,6 a 1,5 MPa [Lucana 2008]. Tomamos como valor crítico para el cálculo 1,5 MPa.

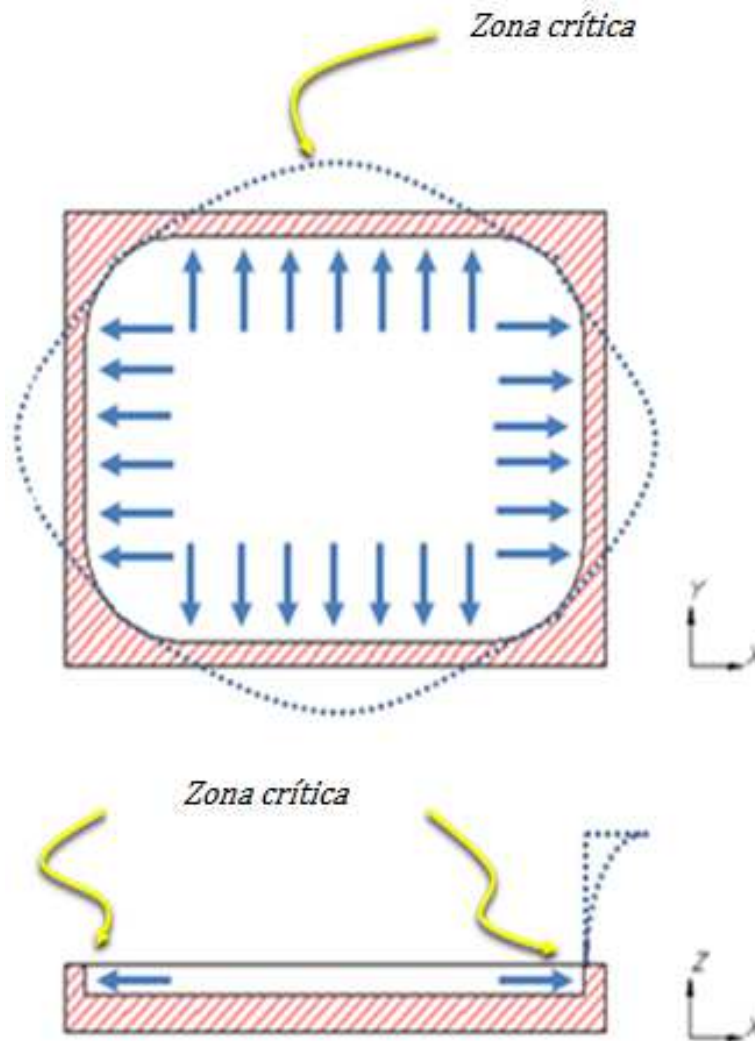


**Figura 2.3.** Presión del compuesto ejercida sobre la superficie interna del molde.

## 2.2 DEFORMACIÓN POR EFECTO DE LA PRESIÓN DEL COMPUESTO

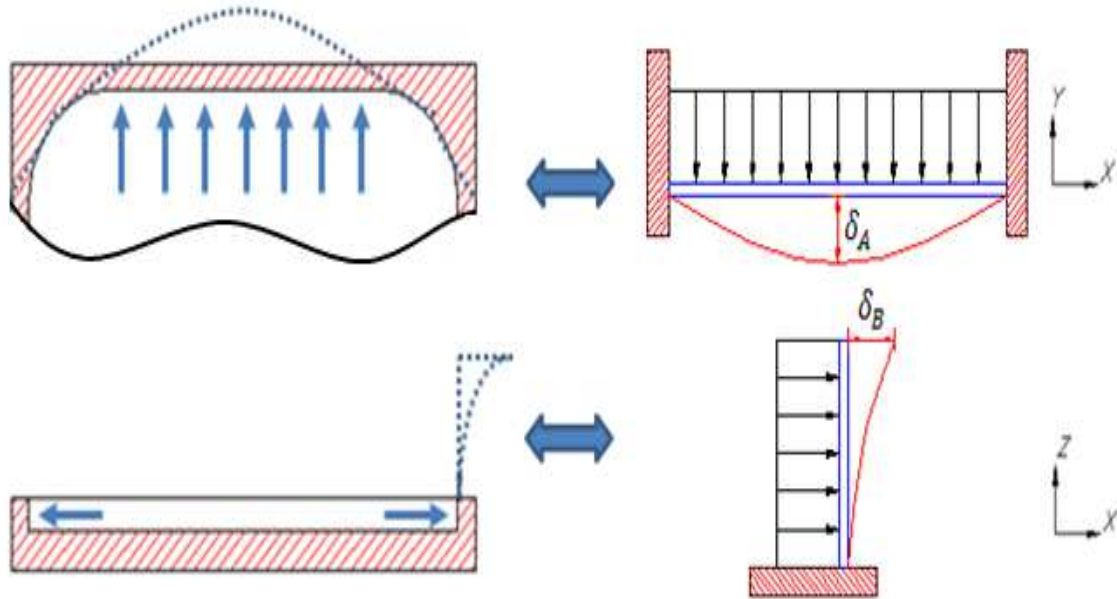
La presión del compuesto ( $P_{MC}$ ) se transmite a la superficie interna del plato inferior del molde. Por ello, se debe cuantificar las deformaciones producidas por esa sollicitación para determinar el ancho de las paredes laterales. El análisis consiste en identificar las zonas críticas y, luego, realizar el dimensionamiento respectivo.

Para facilitar el análisis de identificación de las zonas críticas, se muestra el efecto de la presión en cada uno de los ejes (Ver Figura 2.4). Se aprecia que en el eje X-Y la zona crítica es la dimensión de mayor longitud. Por otro lado, en el eje X-Z, vemos que la deformación crítica se encuentra en el extremo superior para cualquier punto analizado ya que el espesor es constante.



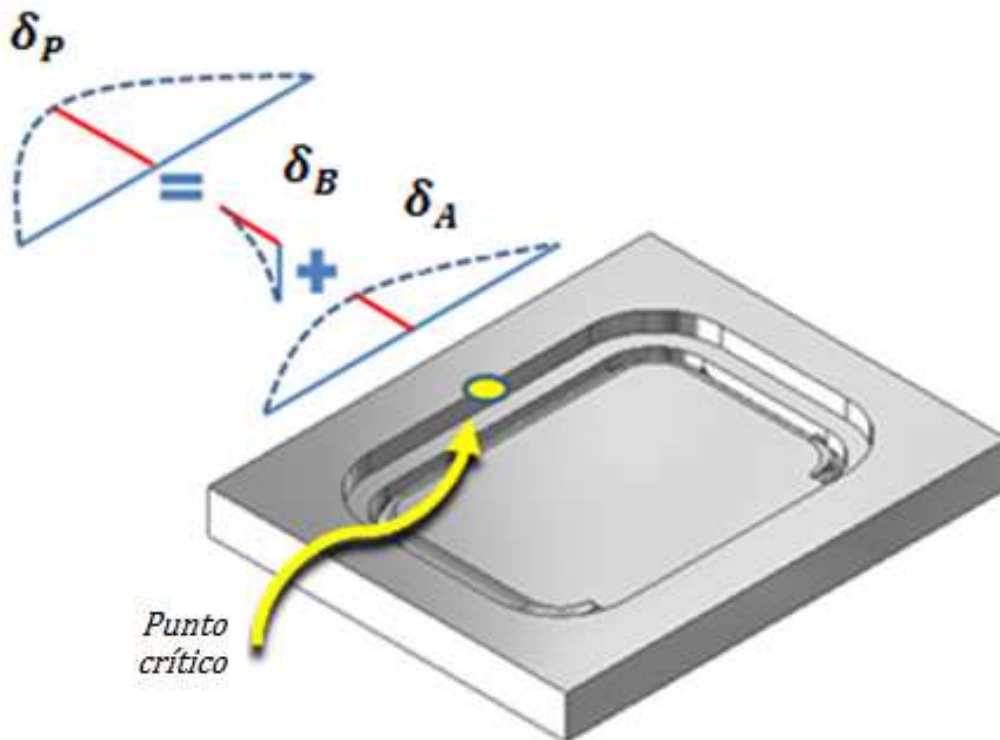
**Figura 2.4.** Efecto de la presión del compuesto aplicada en cada eje.

Las deformaciones son calculadas aplicando el primer teorema de Castigliano. Para ello, asumimos que las paredes del molde se comportarán como vigas y establecemos la configuración de sus extremos (rígido o flexible) en cada uno de los ejes de análisis. En el eje X-Y, podemos asumir que todos los tramos del molde tienen ambos extremos empotrados. En cuanto al eje X-Z, podemos considerar que el extremo inferior es empotrado y el superior es libre. Además, la presión ejercida sobre las paredes del molde la representamos mediante una carga lineal.



**Figura 2.5.** Modelos matemáticos de deformaciones.

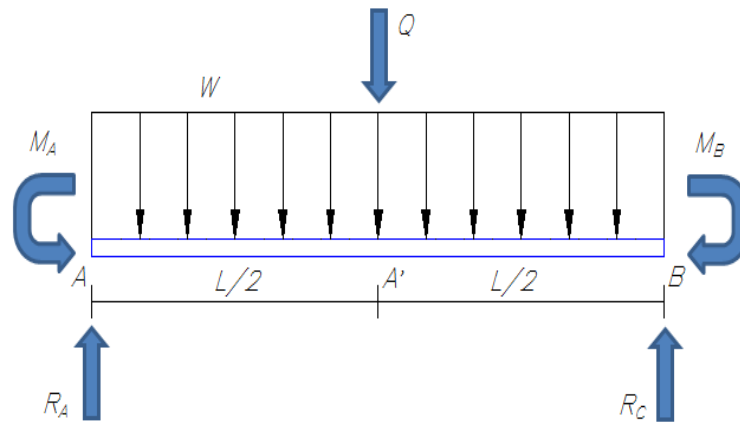
Entonces, en base al análisis de deformaciones, podemos definir el punto crítico para el cálculo. Este se encuentra en el borde superior de la pared lateral de mayor longitud y su deformación total ( $\delta_p$ ) será la suma correspondiente a las deformaciones en ambos ejes (Ver Figura 2.6).



**Figura 2.6.** Deformación total del punto crítico.

### Deformación X-Y

Para calcular la deformación en el plano X-Y ( $\delta_A$ ), tomamos el siguiente modelo:



**Figura 2.7.** Modelo matemático para cálculo de la deformación en X-Y ( $\delta_A$ ).

Donde,

$R_A$  : Reacción en el punto A

$R_B$  : Reacción en el punto B

$M_A$  : Momento flector en el punto A

$M_B$  : Momento flector en el punto B

$W$  : Carga lineal

El teorema de Castigliano indica que para hallar  $\delta_A$  debe existir una fuerza en el punto  $A'$  que actúe en dirección (eje Y) a dicha deformación. Como en este caso no existe tal carga, es necesario considerar una fuerza ficticia  $Q$  para efectos de cálculo. Debido a la simetría en la configuración de la viga y en la aplicación de las cargas, podemos determinar  $\delta_A$  dividiendo la viga en dos tramos y calcular la deformación en solo uno de ellos.

Según Castigliano,

$$\delta_A = \int_0^L \frac{M_x}{EI} \left( \frac{\partial M_x}{\partial Q} \right) dx = \int_A^{A'} \frac{M_x}{EI} \left( \frac{\partial M_x}{\partial Q} \right) dx + \int_{A'}^B \frac{M_x}{EI} \left( \frac{\partial M_x}{\partial Q} \right) dx$$

$$\delta_A = \int_A^{A'} + \int_{A'}^B = 2 \int_0^{L/2} \frac{M_x}{EI} \left( \frac{\partial M_x}{\partial Q} \right) dx \quad [2.1]$$

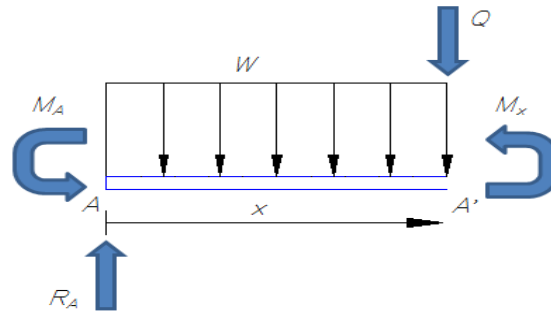
Donde,

$M$  : Momento flector

$E$  : Módulo de elasticidad del material del molde

$I$  : Momento de inercia de la sección

En la siguiente figura podemos apreciar las cargas en el tramo A – A’:



**Figura 2.8.** Solicitaciones en el tramo A – A’.

En base a lo observado, podemos establecer las siguientes relaciones:

$$R_A = \frac{WL}{2} + \frac{Q}{2}$$

$$M_A = \frac{WL^2}{12}$$

$$M_x = R_A x - \frac{Wx^2}{2} - M_A = \left( \frac{WLx}{2} + \frac{Qx}{2} \right) - \frac{Wx^2}{2} - \frac{WL^2}{12}$$

Obtenemos la derivada,

$$\frac{\partial M_x}{\partial Q} = \frac{x}{2}$$

Reemplazamos los valores hallados en la expresión [2.1] y sabiendo que  $Q = 0$ ,

$$\delta_A = \frac{2}{EI} \int_0^{\frac{L}{2}} \left[ \frac{WLx}{2} - \frac{Wx^2}{2} - \frac{WL^2}{12} \right] \frac{x}{2} dx$$

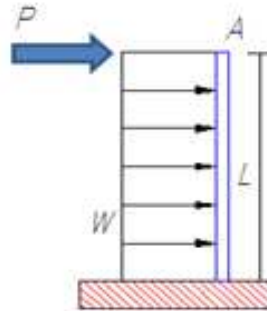
$$\delta_A = \frac{2}{EI} \left[ \frac{WLx^3}{12} - \frac{Wx^4}{16} - \frac{WL^2x^2}{48} \right]_0^{\frac{L}{2}}$$

$$\delta_A = 0,0026 \frac{WL^4}{EI} \quad [2.2]$$



**Deformación X-Z**

Análogamente, para calcular la deformación en el plano X-Z ( $\delta_B$ ), tomamos el modelo que establece un extremo empotrado y el otro libre.



**Figura 2.9.** Modelo matemático para cálculo de la deformación en X-Z ( $\delta_B$ ).

Al igual que en el caso anterior, debemos colocar una fuerza ficticia en el punto A para hallar la deformación. En este caso, denotamos dicha carga con la letra P.

Según Castigliano,

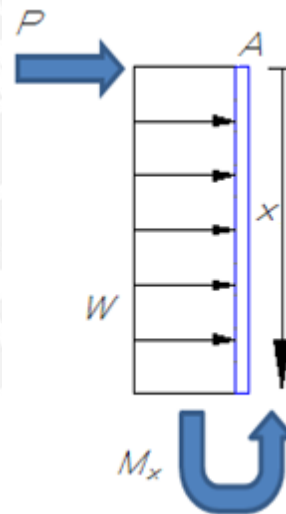
$$\delta_B = \int_0^L \frac{M_X}{EI} \left( \frac{\partial M_X}{\partial P} \right) ds \quad [2.3]$$

Para este caso, el momento flector que actúa sobre la sección de la viga a una distancia genérica x del extremo es:

$$M_X = Px + \frac{Wx^2}{2}$$

Obtenemos la derivada,

$$\frac{\partial M_X}{\partial P} = x$$



**Figura 2.10.** Solicitaciones en la viga.

Reemplazando en la expresión de Castigliano [2.3] y recordando que  $P = 0$ ,

$$\delta_B = \int_0^L \frac{1}{EI} \left( \frac{Wx^2}{2} \right) x dx = \frac{1}{2EI} \left[ \frac{Wx^4}{4} \right]_0^L$$

$$\delta_B = 0.125 \frac{WL^4}{EI} \quad [2.4]$$

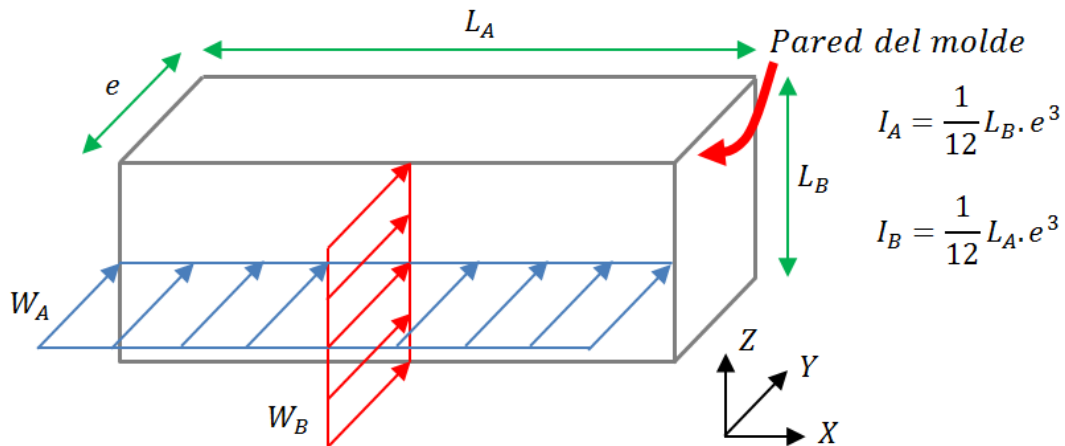
**Deformación total por presión**

Tal como se ha mencionado anteriormente, la deformación máxima en el punto crítico ( $\delta_p$ ) será la suma de las deformaciones en ambos planos (Ver Figura 2.6). Para cuantificarla utilizaremos las expresiones [2.2] y [2.4] con lo cual tenemos:

$$\delta_p = \delta_A + \delta_B$$

$$\delta_p = 0,0026 \frac{W_A L_A^4}{EI_A} (\text{Plano } XY) + 0,125 \frac{W_B L_B^4}{EI_B} (\text{Plano } XZ) \quad [2.5]$$

Entonces, debemos aplicar valores para definir la deformación total y verificar que esta no exceda la tolerancia establecida. El módulo de elasticidad ( $E$ ) es constante, mientras que la longitud ( $L$ ), la carga lineal aplicada ( $W$ ) y el momento de inercia ( $I$ ) varían según el plano analizado. La deformación está determinada según la variación del momento de inercia, que se modifica en relación al espesor ( $e$ ) de la pared del molde (cambio en la sección).



**Figura 2.11.** Cargas aplicadas y parámetros geométricos de la pared del molde.

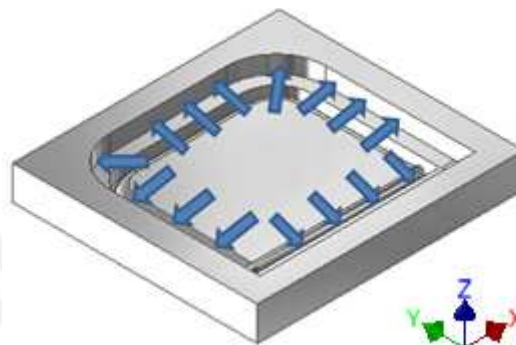
En la siguiente tabla, se aprecian los valores de deformación obtenidos para distintos espesores de la pared del molde.

**Tabla 2.1:** Deformación según espesor de la pared del molde (Tablero)

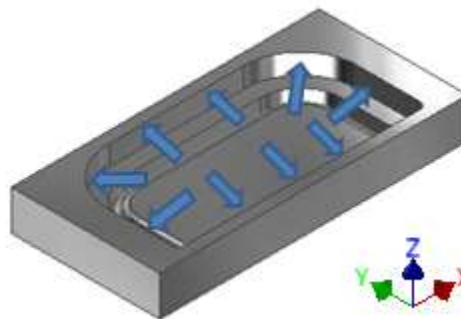
Espesor (mm)	$I_A$ (mm <sup>4</sup> )	$I_B$ (mm <sup>4</sup> )	$W_A$ (N/mm)	$W_B$ (N/mm)	$\delta_A$ (mm)	$\delta_B$ (mm)	$\delta_p$ (mm)
32	27307	1,3x10 <sup>6</sup>	15	720	1.05	9,5x10 <sup>-6</sup>	<b>1,05</b>
34	32753	1,6x10 <sup>6</sup>	15	720	0,88	8,0x10 <sup>-6</sup>	<b>0,88</b>
36	38880	1,9x10 <sup>6</sup>	15	720	0,74	6,7x10 <sup>-6</sup>	<b>0,74</b>
38	45727	2,2x10 <sup>6</sup>	15	720	0,63	5,7x10 <sup>-6</sup>	<b>0,63</b>

Analizando los resultados, podemos determinar que el espesor ideal de la pared del molde debe ser 36 mm en la dimensión crítica, lo cual representa una deformación total por presión de 0,74 mm. Esta es menor a las tolerancias planteadas (1 mm). La deformación con 34 mm de pared (0,88 mm) también está dentro de los límites, sin embargo, aún falta considerar el efecto por dilatación por aumento de la temperatura.

En el caso de las otras superficies de la carpeta, el procedimiento de cálculo es exactamente el mismo. A continuación, se muestra la distribución de la presión del compuesto sobre las cavidades de los moldes para el asiento y el respaldo.



**Figura 2.12.** Cargas distribuidas sobre la cavidad del molde del asiento.



**Figura 2.13.** Cargas distribuidas sobre la cavidad del molde del respaldo.

De igual manera, las siguientes tablas muestran las deformaciones para distintos espesores de la pared del molde.

**Tabla 2.2:** Deformación según espesor de la pared del molde (Asiento)

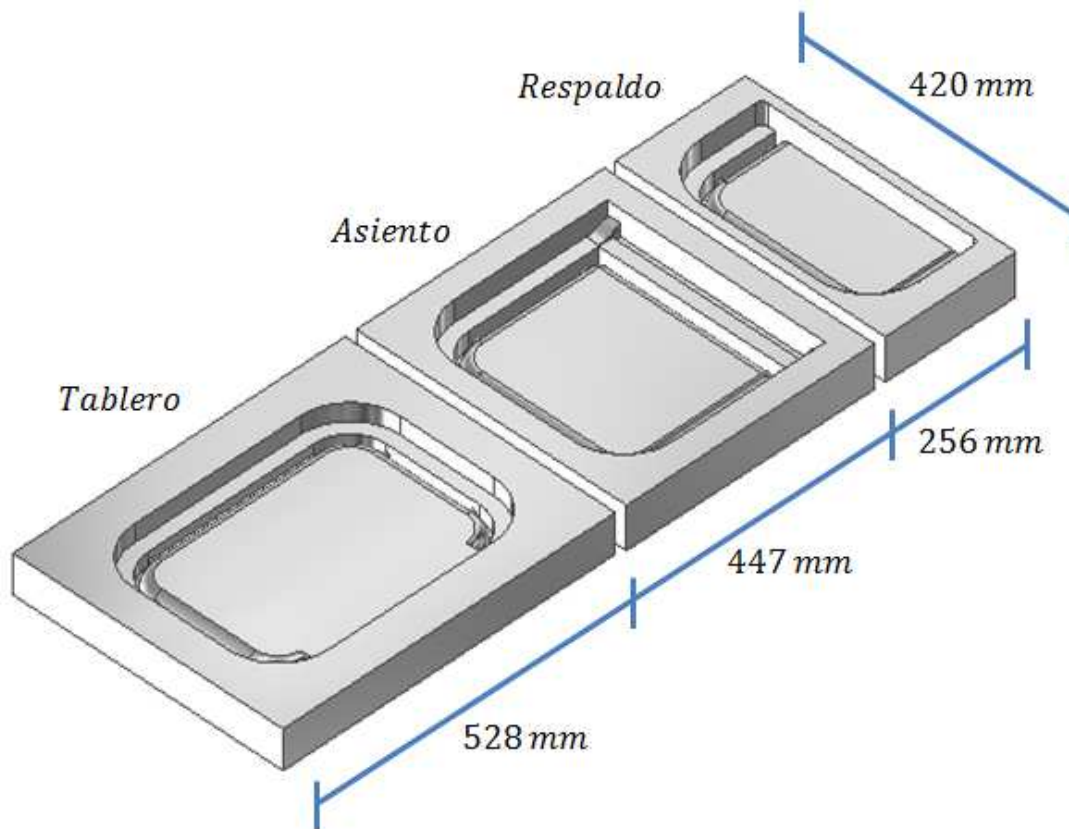
Espesor (mm)	$I_A$ (mm <sup>4</sup> )	$I_B$ (mm <sup>4</sup> )	$W_A$ (N/mm)	$W_B$ (N/mm)	$\delta_A$ (mm)	$\delta_B$ (mm)	$\delta_P$ (mm)
22	21888	$4,6 \times 10^5$	28,5	592,5	1,14	$3,0 \times 10^{-4}$	<b>1,14</b>
26	27829	$5,8 \times 10^5$	28,5	592,5	0,90	$2,3 \times 10^{-4}$	<b>0,90</b>
28	34757	$7,2 \times 10^5$	28,5	592,5	0,72	$1,9 \times 10^{-4}$	<b>0,72</b>
30	42750	$8,9 \times 10^5$	28,5	592,5	0,59	$1,5 \times 10^{-4}$	<b>0,59</b>

**Tabla 2.3:** Deformación según espesor de la pared del molde (Respaldo)

Espesor (mm)	$I_A$ (mm <sup>4</sup> )	$I_B$ (mm <sup>4</sup> )	$W_A$ (N/mm)	$W_B$ (N/mm)	$\delta_A$ (mm)	$\delta_B$ (mm)	$\delta_P$ (mm)
8	810	8533	28,5	300	2,03	$8,0 \times 10^{-3}$	<b>2,03</b>
10	1583	16666	28,5	300	1,04	$4,1 \times 10^{-3}$	<b>1,04</b>
12	2736	28800	28,5	300	0,60	$2,4 \times 10^{-3}$	<b>0,60</b>
14	4344	45733	28,5	300	0,38	$1,5 \times 10^{-3}$	<b>0,38</b>

Finalmente, podemos establecer que las paredes de los moldes en las dimensiones analizadas para el asiento y respaldo serán 28 mm y 12 mm respectivamente.

Los sistemas de calentamiento y enfriamiento serán aplicados para moldear todas las superficies. En ese sentido, es importante definir las dimensiones de los moldes, de tal forma, que se puedan adaptar fácilmente a estos sistemas, optimizando los recursos empleados. Se ha establecido una medida de ancho única (420 mm), con lo cual, es posible dimensionar con mayor eficiencia los sistemas complementarios (Ver Figura 2.14).



**Figura 2.14.** Moldes de las superficies de la carpeta.

### 2.3 DILATACIÓN POR INCREMENTO DE LA TEMPERATURA

En el proceso de moldeo la temperatura máxima alcanzada estará cercana a los 200°C y luego descenderá hasta 65°C para extraer la superficie moldeada. Por este motivo, existirá un efecto de dilatación en las paredes del molde en todas las direcciones.

#### Dilatación del plato inferior (dimensiones críticas)

Al igual que en el caso de la deformación por efecto de la presión, la verificación debe ser realizada para cada una de las dimensiones críticas del molde. En el caso del tablero, el largo mide 480 mm y el ancho es 350 mm y eso los constituye como las dimensiones críticas. Además, podemos asegurar que la dilatación del ancho del tablero (eje Y) es más crítica pues esta se produce en la misma dirección que la deformación total por presión en el punto crítico (ver Figura 2.15).

Entonces, calculamos la dilatación térmica ( $\delta_T$ ) mediante la siguiente expresión:

$$\delta_T = L_0 \cdot \alpha_c \cdot \Delta T \quad [2.6]$$

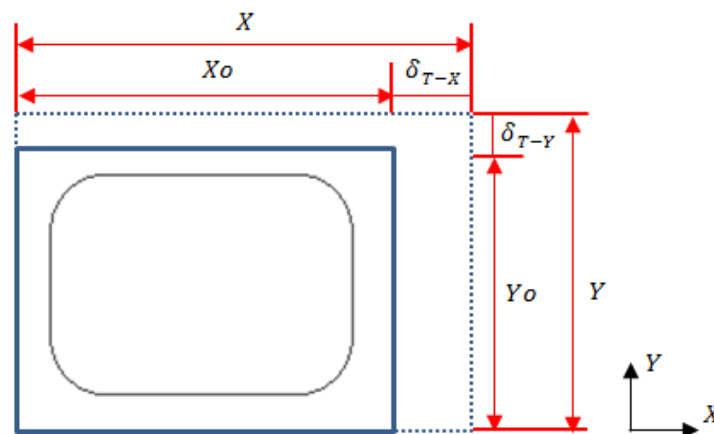
Donde,

$L_0$  : Longitud inicial [m]

$\alpha_c$  : Coeficiente de dilatación térmica del Alumold =  $23,2 \times 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$

$\Delta T$  : Gradiente de temperatura =  $65 - 20 = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$

El valor de la longitud inicial está determinado por la longitud de la superficie más el espesor de la pared del molde, que fue determinado previamente (ver Figura 2.22). Entonces, las longitudes iniciales para el largo y el ancho son 528 mm y 420 mm respectivamente.



**Figura 2.15.** Dilatación térmica del plato inferior del molde (Tablero).

Por otro lado, el gradiente indica la variación entre la temperatura ambiente (20°C aprox.) y la temperatura a la cual se extrae la superficie. En el caso del Quachu Kullu, un compuesto formado por polipropileno, esta temperatura está fijada en 65°C.

Entonces, reemplazando en la expresión [2.6]:

**Largo:**

$$\delta_{T-X} = 528 \cdot 23,2 \times 10^{-6} \cdot (65 - 20)$$

$$\delta_{C-X} = 0,55 \text{ mm}$$

**Ancho:**

$$\delta_{T-Y} = 420 \cdot 23,2 \times 10^{-6} \cdot (65 - 20)$$

$$\delta_{T-Y} = 0,44 \text{ mm}$$

Ahora debemos verificar la deformación total máxima ( $\delta_{MAX}$ ) producida en el eje Y, utilizando la siguiente expresión:

$$\delta_{MAX} = 2\delta_P + \delta_{T-Y} \quad [2.7]$$

$$\delta_{MAX} = 2 \times 0,74 + 0,44$$

$$\delta_{MAX} = 1,92 \text{ mm}$$

La deformación máxima calculada es 1,92 mm, esto indica que la superficie moldeada obtenida se encuentra de las tolerancias establecidas, pues la deformación es menor a 2 mm (requisito de tolerancia). Se realizó un análisis similar para los otros moldes comprobándose que las deformaciones máximas se encontraban dentro de los límites planteados.

### **Dilatación de los platos inferior y superior (espesor)**

La deformación por efecto de la temperatura también debe ser verificada en el eje Z, puesto que los platos inferior y superior se dilatarán en esa dirección afectando el espesor final de la pieza (Ver Figura 2.16).

La verificación deberá realizarse mediante esta expresión:

$$\delta_{T-Z} = \delta_{Z-PLATO INFERIOR} + \delta_{Z-PLATO SUPERIOR} < 1 \text{ mm} \quad [2.8]$$

La expresión anterior puede ser interpretada de la siguiente manera:

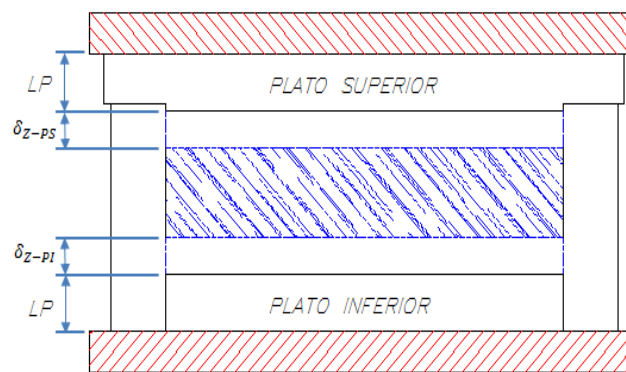
$$\delta_{T-Z} = \delta_{Z-PLATO INFERIOR} = \delta_{Z-PLATO SUPERIOR} < 0,5 \text{ mm} \quad [2.9]$$

Reemplazando [2.6] en la expresión [2.9]:

$$\delta_{T-Z} = LP_{MAX} \cdot \alpha_c \cdot \Delta T < 0.5 \text{ mm}$$

$$\delta_{T-Z} = LP_{MAX} \cdot 23,2 \times 10^{-6} \cdot 45 < 0.5 \text{ mm}$$

$$LP_{MAX} < 478 \text{ mm}$$



**Figura 2.16.** Dilatación vertical del molde.

El cálculo realizado nos permite establecer la altura límite de 478 mm para los platos superior e inferior del molde. Para los moldes se establece 25 mm como longitud de plato máxima ( $LP_{MAX}$ ), con lo cual se asegura el requisito de tolerancia.

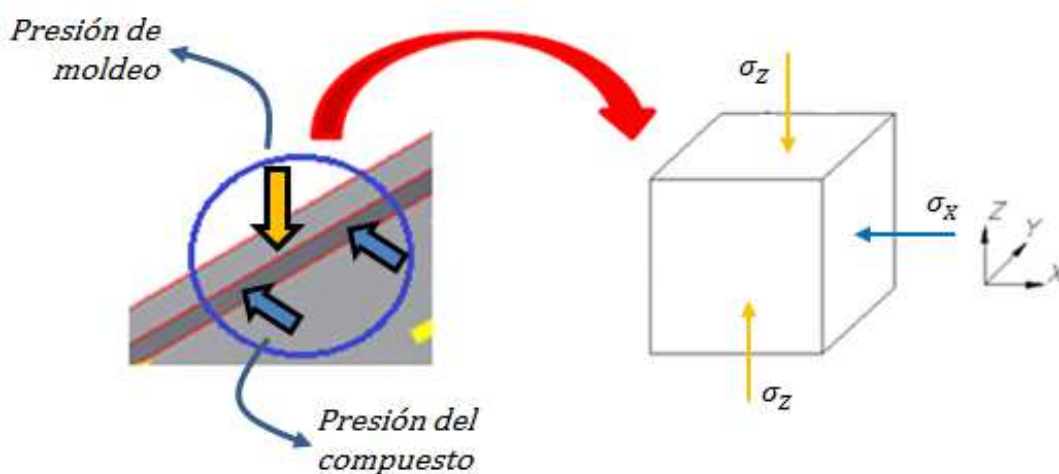
## 2.4 DIMENSIONAMIENTO DE CAVIDAD

La forma de la cavidad del molde está definida por la geometría de la superficie moldeada. Sin embargo, la profundidad de la cavidad debe ser diseñada considerando el factor de compresión del material compuesto. Esto se debe a la reducción de volumen del material cuando es sometido a la fuerza compresiva de la prensa hidráulica. Cuando se dispone la carga en la cavidad del molde, esta ocupa un volumen determinado, sin embargo, a medida que el molde es sometido a calentamiento y luego a presión, el volumen del material se comprime hasta el valor deseado. Es por ello, que se debe considerar un espacio adicional en la cavidad para alojar el volumen inicial del material.

En función a pruebas realizadas en el Área de Materiales de la PUCP, se ha podido determinar que el factor de compresión del Caucho Kullu es aproximadamente 2,13. Este valor indica que la cavidad del molde debe superar como mínimo el doble del espesor de cada una de las partes moldeadas. Para el molde del tablero la profundidad de la cavidad se fija en 32 mm, mientras que en el caso de los moldes del asiento y el respaldo se establece en 34 mm.

## 2.5 VERIFICACIÓN DE RESISTENCIA MECÁNICA

El molde estará sometido a diferentes solicitaciones, los cuales ejercerán esfuerzos que deben ser cuantificados para verificar que no se produzcan fallas mecánicas. Las zonas de análisis serán aquellas en las que se presenten las mayores cargas. Dado que ya se ha analizado el efecto de la presión en el proceso de moldeo, podemos determinar que las zonas críticas son las paredes laterales del molde, ya que soportan la presión de la prensa en su superficie superior y la presión de moldeo en su superficie interna. Por ello, utilizaremos el criterio de Von Mises sobre un elemento diferencial para comprobar la eficiencia del diseño.



**Figura 2.17.** Esfuerzos sobre elemento diferencial.

El esfuerzo en el eje Z es generado por la presión ejercida por la prensa. Como caso crítico, decimos que toda la presión se transmite sobre la superficie superior del plato inferior, entonces tenemos que:

$$\sigma_z = 7 \frac{N}{mm^2}$$

En cuanto al esfuerzo en el eje X, este es calculado conociendo la presión que ejerce el material compuesto sobre la pared del molde, que en este caso es 1,5 N/mm<sup>2</sup>.

$$\sigma_x = 1,5 \frac{N}{mm^2}$$

El esfuerzo equivalente total podemos hallarlo utilizando el criterio de Von Mises, el cual plantea la siguiente expresión:

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2} < \frac{\sigma_F}{FS} \quad [2.10]$$



Donde,

$$\sigma_{F_{Alumold}} : \text{Esfuerzo de fluencia del Alumold} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$FS : \text{Factor de seguridad} = 2,5$$

El valor de factor de seguridad es el recomendado para moldes de compresión [Vidosic 1957].

Reemplazando en la expresión **[2.10]**:

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{1,5^2 + 7^2} < \frac{500}{2,5}$$

$$7,2 \frac{N}{mm^2} < 200 \frac{N}{mm^2}$$

El cálculo demuestra que las paredes del molde (zona crítica) no fallarán por resistencia. Para los moldes del asiento y el respaldo, se realiza la misma consideración de esfuerzo en el eje Z. De igual, se mantiene constante el esfuerzo en el eje X. En base a lo descrito anteriormente, podemos asegurar que los moldes funcionarán correctamente frente a las solicitaciones analizadas.

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO TÉRMICO DEL MOLDE

El diseño térmico de los sistemas complementarios del molde tiene como objetivo determinar los parámetros de operación del horno de calentamiento y las placas de enfriamiento. En cuanto, al sistema de calentamiento se determinan los requerimientos de potencia eléctrica necesaria para calentar el molde hasta la temperatura idónea para fundir el polipropileno del compuesto. A su vez, para el sistema de enfriamiento, se dimensionan los canales de circulación de agua que permitirán reducir la temperatura del molde hasta que se produzca la solidificación del polipropileno y la superficie moldeada pueda ser retirada.

#### 3.1 SISTEMA DE CALENTAMIENTO

En la estación de calentamiento se introduce el molde cargado con el compuesto y se eleva la temperatura del molde hasta que se produzca la fusión del material. Posteriormente, se traslada a la estación de enfriamiento, donde se aplica la fuerza requerida y se reduce la temperatura (ver sección 1.5.4). En ese sentido, los componentes necesarios para conseguir dicho objetivo son las resistencias eléctricas, los aislantes que atenuarán las pérdidas de calor y la estructura metálica que servirá de soporte.

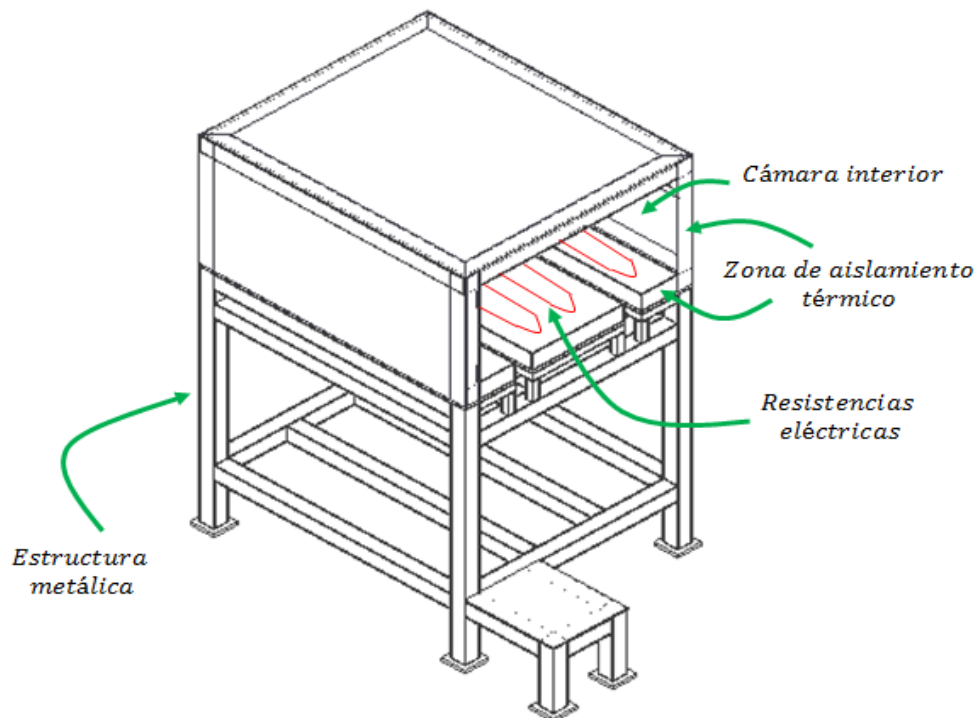
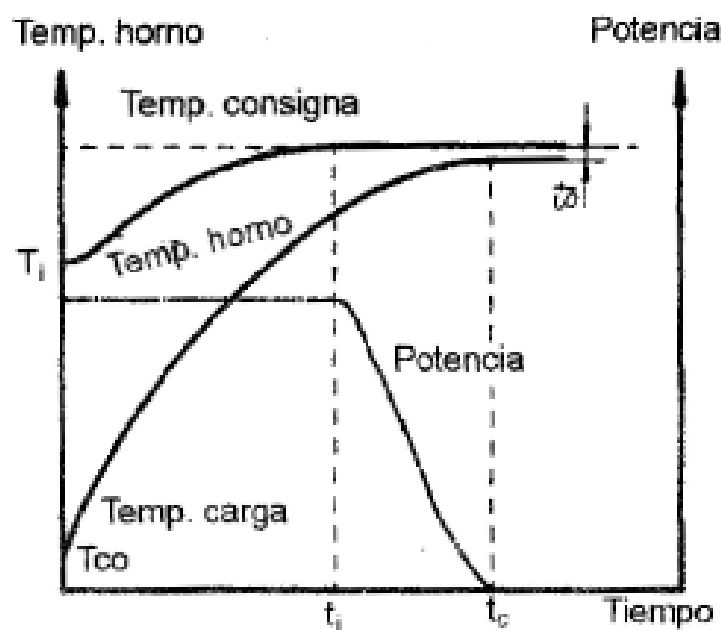


Figura 3.1. Componentes del horno de calentamiento.

### 3.1.1 Análisis del proceso de calentamiento

En el proceso de calentamiento es fundamental conocer la evolución de las temperaturas del horno y de la carga en el tiempo. En la mayoría de casos se establece una temperatura de regulación del horno que es alcanzada aprovechando al máximo la potencia del horno. Esto ocurre al inicio al proceso, donde la evolución de las temperaturas del horno y de la carga se realiza con mayor ritmo. Posteriormente, se reduce la potencia media conectada y el calentamiento de la carga se realiza a menor velocidad al disminuir el gradiente de temperaturas entre el horno y la carga hasta que se alcanza la temperatura de regulación (Ver Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Evolución de las temperaturas del horno y la carga.

Además, se debe tener en cuenta que en cargas de elevada densidad o de grandes dimensiones, existe una variación entre la temperatura superficial y la del interior de la carga, por lo cual deberá establecerse un tiempo adicional de calentamiento. Por otro lado, el gráfico señala que la temperatura de la carga alcanza la temperatura de trabajo del horno. En nuestro caso, el molde deberá elevar su temperatura desde  $20^{\circ}\text{C}$  hasta  $200^{\circ}\text{C}$ , siendo este el valor de regulación. Sin embargo, como el molde es una carga de grandes dimensiones, la temperatura de trabajo del horno debe ser mayor a  $200^{\circ}\text{C}$ , con ello, se reduciría en gran medida el tiempo de calentamiento. Esta situación provocaría el aumento en los costos de operación, pero se incrementaría la capacidad de producción. De acuerdo a un cálculo iterativo (ver sección 3.1.3), la temperatura a la cual debe programarse el horno es para obtener un tiempo menor a 40 minutos es  $450^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1.2 Parámetros de operación del horno

A continuación se muestran las características geométricas y propiedades térmicas de los componentes del sistema de calentamiento, los cuales servirán como referencia para los cálculos posteriores.

**Tabla 3.1:** Parámetros de operación del horno

REQUERIMIENTO TÉRMICO			
Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Temp. externa horno	$T_h$	°C	40
Temp. interna horno	$T_p$	°C	450
Temp. inicial carga	$T_i$	°C	20
Temp. final carga	$T_f$	°C	200
Temp. ambiente	$T_a$	°C	25
DATOS GEOMÉTRICOS DE LA CARGA (*)			
Medida	Símbolo	Unidad	Valor
Largo	$L_c$	mm	528
Ancho	$B_c$	mm	420
Altura	$H_c$	mm	70
Área lateral	$A_{lat-c}$	m <sup>2</sup>	0,074
Área frontal	$A_{fr-c}$	m <sup>2</sup>	0,059
Área superior	$A_{sup-c}$	m <sup>2</sup>	0,222
Área inferior	$A_{inf-c}$	m <sup>2</sup>	0,222
Área total	$A_{total-c}$	m <sup>2</sup>	0,576
Volumen	$V_c$	m <sup>3</sup>	0,0155
Masa	$m_c$	kg	43,5
PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LA CARGA			
Material	Alumold		
Propiedad	Símbolo	Unidad	Valor
Conductividad	$k_c$	W/m°C	153
Calor específico	$Cp_c$	kJ/kg°C	0,857
Densidad	$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>	2800
Emisividad	$\varepsilon_c$	-	0,5

DATOS GEOMÉTRICOS DE LA CÁMARA INTERIOR DEL HORNO			
Medida	Símbolo	Unidad	Valor
Largo	$L_h$	mm	900
Ancho	$B_h$	mm	670
Altura	$H_h$	mm	350
Área lateral	$A_{lat-h}$	m <sup>2</sup>	0,630
Área frontal	$A_{fr-h}$	m <sup>2</sup>	0,469
Área superior	$A_{sup-h}$	m <sup>2</sup>	0,603
Área inferior	$A_{inf-h}$	m <sup>2</sup>	0,603
Área total	$A_{total-h}$	m <sup>2</sup>	2,305
Volumen	$V_h$	m <sup>3</sup>	0,2111
MATERIALES DE FABRICACIÓN DEL HORNO			
Descripción	Material		
Superficie externa	Lámina galvanizada		
Aislante térmico	Lana de roca mineral		
Superficie interna	Lámina galvanizada		
	Resistencias eléctricas		
CARACTERÍSTICAS SUPERFICIES (EXTERNA/INTERNA)			
Propiedad	Símbolo	Unidad	Valor
Emisividad	$\epsilon_s$	-	0,9
Espesor	$e_{se}$	mm	1.5
Conductividad	$k_s$	W/m°C	50
PROPIEDADES AISLANTE TÉRMICO			
Propiedad	Símbolo	Unidad	Valor
Conductividad	$k_{ais}$	W/m°C	0,0465
Calor específico	$Cp_{ais}$	kJ/kg°C	0,842
Densidad	$\rho_{ais}$	kg/m <sup>3</sup>	40
Espesor	$e_{ais}$	mm	80

(\*) Los datos geométricos de la carga están señalados en función del molde del tablero, ya que es el de mayor tamaño y eso lo constituye como caso crítico.

### 3.1.3 Cálculo de potencia requerida

La cantidad de potencia requerida para el funcionamiento del horno será equivalente a la cantidad de potencia necesaria para el calentamiento de la carga por unidad de tiempo más las pérdidas producidas durante el tiempo de operación. Para el cálculo de la potencia ( $P_T$ ) utilizaremos la siguiente expresión:

$$P_T = P_C + P_{PER} \quad [3.1]$$

Donde,

$P_T$  : Potencia suministrada al horno

$P_C$  : Potencia absorbida por la carga

$P_{PER}$  : Flujo de calor al exterior (pérdidas)

#### Transmisión de calor a la carga

En el caso de un horno, la transmisión de calor a la carga se realiza por medio del mecanismo de radiación. La superficie interna del horno irradiará calor hacia la superficie de la carga para que produzca el calentamiento. Para la configuración planteada, el intercambio neto de calor viene dado por:

$$P_{pc} = \sigma \cdot A_p \cdot F_{pc} \cdot (T_p^4 - T_c^4) \quad [3.2]$$

Donde,

$P_{pc}$  : Flujo neto de calor por radiación entre pared – carga

$F_{pc}$  : Factor de forma

$T_p$  : Temperatura de pared del horno

$T_c$  : Temperatura de la carga (variable en el tiempo)

Para una superficie gris que envuelve completamente a la otra, el factor de forma se calcula de la siguiente manera:

$$F_{pc} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right) \cdot \left(\frac{A_p}{A_{total-c}}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{se}-1}\right)} \quad [3.3]$$

Donde,

$A_p$  : Superficie interna cubierta por resistencias eléctricas = 1,836 m<sup>2</sup>

$A_{total-c}$  : Superficie de la carga = 0,576 m<sup>2</sup>

$\varepsilon_{se}$  : Emisividad de la superficie interna = 0,9

$\varepsilon_c$  : Emisividad de la carga = 0,5

Reemplazando los datos en la ecuación [3.3], tenemos que:

$$F_{pc} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,5}\right) \cdot \left(\frac{1,836}{0,576}\right) + \left(\frac{1}{0,9-1}\right)} = 0,14$$

### Cálculo del tiempo de calentamiento

El balance energético nos permitirá estimar el tiempo de calentamiento de la carga. La energía radiante que es absorbida por la carga provocará una variación en su energía interna, con el consecuente aumento de temperatura. Para ello, establecemos que el flujo de calor de radiación entre la pared del horno y la carga debe ser igual al calor absorbido por la carga por unidad de tiempo.

$$\dot{Q}_{pc} = \dot{Q}_c$$

$$\sigma \cdot A_p \cdot F_{pc} \cdot (T_p^4 - T_c^4) = m_c \cdot Cp_c \cdot \frac{dT}{dt} \quad [3.4]$$

La ecuación diferencial es resuelta utilizando variables:

$$\frac{\sigma \cdot A_p \cdot F_{pc} \cdot T_p^4}{m_c \cdot Cp_c} - \frac{\sigma \cdot A_p \cdot F_{pc} \cdot T^4}{m_c \cdot Cp_c} = \frac{dT}{dt}$$

Entonces,

$$K1 = \frac{\sigma \cdot A_p \cdot F_{pc} \cdot T_p^4}{m_c \cdot Cp_c}$$

$$K2 = \frac{\sigma \cdot A_p \cdot F_{pc}}{m_c \cdot Cp_c}$$

$$K1 - K2 \cdot T^4 = \frac{dT}{dt}$$

Resolviendo la ecuación diferencial:

$$t_{cal} = \frac{1}{4.K_1^{0.75}.K_2^{0.25}} \left[ \ln \left( 1 + \frac{T}{T_p} \right) - \ln \left( 1 - \frac{T}{T_p} \right) + \frac{2\pi}{180} \cdot \text{tg}^{-1} \left( \frac{T}{T_p} \right) \right]_{T_i}^{T_f} \quad [3.5]$$

Donde,

$$\sigma : \text{Constante universal} = 4,97 \times 10^{-8} \text{ kcal/h.m}^2.K$$

$$m_c : \text{Masa de la carga} = 43,5 \text{ kg}$$

$$Cp_c : \text{Calor específico de la carga} = 0,857 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C} = 0,205 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

$$T_i : \text{Temperatura inicial de la carga} = 293 \text{ K}$$

$$T_f : \text{Temperatura final de la carga} = 473 \text{ K}$$

$$T_p : \text{Temperatura de pared del horno} = 723 \text{ K}$$

Del mismo, la expresión [3.5] puede ser simplificada en:

$$t_{cal} = A \cdot [B - C] \quad [3.6]$$

Donde,

$$A : \text{Constante de integral}$$

$$B : \text{Integral evaluada en } T_f$$

$$C : \text{Integral evaluada en } T_i$$

Reemplazando valores:

$$K_1 = \frac{4,97 \times 10^{-8} \times 1,836 \times 0,14 \times 723^4}{43,5 \times 0,205} = 385$$

$$K_2 = \frac{4,97 \times 10^{-8} \times 1,836 \times 0,14}{43,5 \times 0,205} = 1,41 \times 10^{-9}$$

$$A = \frac{1}{4 \times 385^{0.75} \times (1,41 \times 10^{-9})^{0.25}} = 0,47$$

$$B = \ln \left( 1 + \frac{723}{473} \right) - \ln \left( 1 - \frac{723}{473} \right) + \frac{2\pi}{180} \cdot \text{tg}^{-1} \left( \frac{723}{473} \right) = 2,73$$

$$C = \ln \left( 1 + \frac{293}{473} \right) - \ln \left( 1 - \frac{293}{473} \right) + \frac{2\pi}{180} \cdot \text{tg}^{-1} \left( \frac{293}{473} \right) = 1,63$$

Finalmente, de la expresión [3.6], el tiempo de calentamiento de la carga es:

$$t_{cal} = 0,47 \times [2,73 - 1,63] = 0,51 \text{ h} \approx 30 \text{ m}$$



Por otro lado, la cantidad de potencia absorbida por la carga se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_c = \frac{m_c \cdot c_{p_c} (T_f - T_i)}{t_{cal}} \quad [3.7]$$

Reemplazando,

$$P_c = \frac{43,5 \times 0,857 \cdot (473 - 293)}{0,51 \times 3600} \approx 4 \text{ kW}$$

### Flujo de calor al exterior (pérdidas)

En los procesos de transferencia de calor, normalmente se producen pérdidas de energía por los mecanismos de conducción, convección y radiación. El proceso de moldeo también es afectado por estos fenómenos. En ese sentido, las pérdidas deben cuantificarse dado que estas deberán ser repuestas por el sistema de calentamiento.

Para poder estimar las pérdidas de calor es necesario conocer la configuración espacial de los componentes del sistema de calentamiento y de esa forma establecer cómo se pierde el calor (ver Figura 3.3). En base a ello, podemos decir que existirán pérdidas por conducción a través de las paredes del horno y pérdidas por convección y radiación desde la superficie exterior del horno hacia el ambiente.

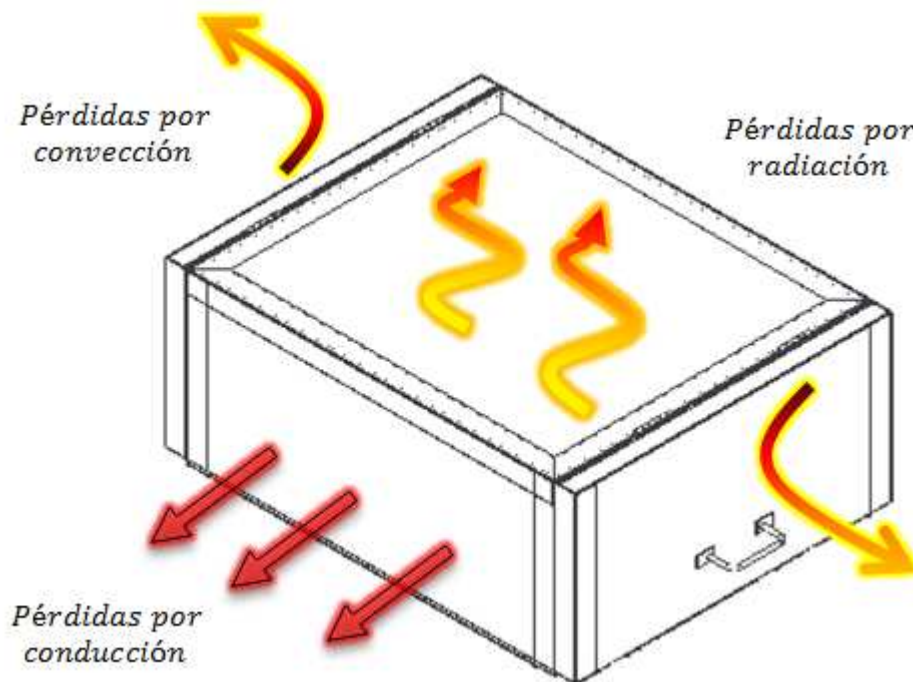


Figura 3.3. Mecanismos de pérdidas de calor del molde.

- **Pérdidas por conducción:**

Las pérdidas de calor por conducción se producen a través de las paredes del horno. Para reducirlas, es necesario el empleo de superficies aislantes de baja conductividad térmica. Se plantea la utilización como aislante de lana mineral ya que es útil hasta 700°C y es de fácil montaje. El cálculo de dimensionamiento del aislante se muestra en la sección 3.1.4. Se plantea la siguiente expresión para la estimación de las pérdidas por conducción [Sors 1967]:

$$P_{COND} = \frac{k_{ais}}{e_{ais}} \cdot A_{total-h} \cdot (T_p - T_h) \quad [3.8]$$

Donde,

$k_{ais}$  : Conductividad térmica del aislante = 0,0465 W/m . °C

$e_{ais}$  : Espesor del panel aislante = 85 mm

$T_p$  : Temperatura de pared del horno = 450 °C

$T_h$  : Temperatura superficie externa = 40 °C

$A_{total-h}$  : Área de la superficie de transferencia = 2,305 m<sup>2</sup>

Entonces,

$$P_{COND} = \frac{\left(\frac{0,0465}{1000}\right)}{0,085} \cdot 2,305 \cdot (450 - 40) = 0,52 \text{ kW}$$

- **Pérdidas por convección:**

Las pérdidas por convección se producen por el contacto existente entre la superficie externa del horno y el aire quieto que se encuentra en el exterior. El proceso de convección libre se encuentra en función de tres parámetros adimensionales (Nusselt, Prandtl y Grashof). El objetivo es calcular el coeficiente convectivo ( $h_{pc}$ ), que se encuentra en función del número de Nusselt (Nu), el cual está relacionado con los otros parámetros adimensionales nombrados.

En primer lugar, debemos conocer las propiedades del aire a la temperatura media de película, ya que los parámetros adimensionales son calculados de acuerdo a estos valores.

$$T_m = \frac{T_h + T_a}{2} \quad [3.9]$$

Donde,

$$T_h : \text{Temperatura superficie externa} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_a : \text{Temperatura ambiente} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Reemplazando en [3.9], tenemos que la temperatura media de película es 32,5°C.

Luego, se procede a calcular los números de Grashof ( $Gr$ ) y Prandtl ( $Pr$ ).

$$Gr = (\Delta T \cdot \beta) \cdot \frac{L_h^3 \cdot \rho_a^2 \cdot g}{\mu_a^2} \quad [3.10]$$

Donde,

$$\Delta T : \text{Variación de temperatura superficie externa} - \text{ambiente} = 15^\circ\text{C}$$

$$\beta : \text{Coeficiente de dilatación del aire} = 1/298 \text{ K}$$

$$L_h : \text{Longitud característica (largo del horno)} = 900 \text{ mm}$$

$$\rho_a : \text{Densidad del aire} = 1,16 \text{ kg/m}^3$$

$$g : \text{gravedad} = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\mu_a : \text{Viscosidad dinámica del aire} = 1,88 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

Reemplazando en la expresión [3.10], tenemos que:

$$Gr = \left(15 \times \frac{1}{298}\right) \cdot \frac{0,9^3 \cdot 1,16^2 \cdot 9,8}{(1,88 \times 10^{-5})^2} = 1,36 \times 10^9$$

Del mismo modo, sabemos que el número de Prandtl a la temperatura media indicada es 0,711.

Con estos los valores hallados anteriormente, es posible determinar el régimen del flujo de aire.

$$\text{Régimen laminar: } 10^5 < Gr \cdot Pr < 2 \times 10^7 \quad [3.11]$$

$$Nu = 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4}$$

$$\text{Régimen turbulento: } 2 \times 10^7 < Gr \cdot Pr < 3 \times 10^{10} \quad [3.12]$$

$$Nu = 0,14 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3}$$

Entonces, tenemos calculamos el producto correspondiente:

$$\rightarrow Gr.Pr = (1,36 \times 10^9) \times 0,711 = 9,7 \times 10^8$$

El resultado indica que el régimen es turbulento, por ende, utilizaremos la expresión [3.12] para calcular el número de Nusselt.

$$Nu = 0,14 \times (9,7 \times 10^8)^{1/3} = 138,52$$

Con este parámetro, ya es posible calcular el coeficiente convectivo ( $h_{pc}$ ).

$$Nu = \frac{h_{pc} \cdot L_h}{k_a} \rightarrow h_{pc} = \frac{Nu \cdot k_a}{L_h} \quad [3.13]$$

Donde,

$$k_a : \text{Conductividad del aire} = 2,66 \times 10^{-5} \text{ kW/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

Reemplazando,

$$h_{pc} = \frac{138,52 \times (2,66 \times 10^{-5})}{0,9} = 0,0041 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Las pérdidas por convección se calculan mediante la siguiente expresión:

$$P_{CONV} = h_{pc} \cdot A_{conv} \cdot (Th - Ta) \quad [3.14]$$

El área de convección ( $A_{conv}$ ) es un factor que influye en la cantidad total de pérdidas.

Para la superficie horizontal superior:

$$P_{CONV-SS} = h_{pc} \cdot A_{sup-h} \cdot (Th - Ta) = 0,0041 \times 0,603 \times (40 - 25) = 0,037 \text{ kW}$$

Para la superficie horizontal inferior (convección dificultada), se considera el 50% menos que las pérdidas en la superficie superior:

$$P_{CONV-SI} = 0,037 \times 0,5 = 0,018 \text{ kW}$$

En el caso de las superficies verticales, se considera un coeficiente de película 35% menor al de la superficie horizontal superior:

$$P_{CONV-SL} = 0,65 \cdot h_{pc} \cdot (A_{lat-h} + A_{fr-h}) \cdot (Th - Ta)$$

$$P_{CONV-SL} = 0,65 \times 0,0041 \times (0,63 + 0,469) \cdot (40 - 25) = 0,044 \text{ kW}$$

Con los valores obtenidos anteriormente, tenemos que las pérdidas por convección totales es igual a:

$$P_{CONV} = P_{CONV-SS} + P_{CONV-SI} + P_{CONV-SL} \quad [3.15]$$

$$P_{CONV} = 0,037 + 0,018 + 0,044 = 0,1 \text{ kW}$$

- **Pérdidas por radiación:**

Durante el proceso de calentamiento, el horno se comporta como una superficie radiante que emite cierta cantidad de energía hacia el exterior a través de su superficie externa. Debido a dicha situación, se producen las pérdidas por radiación que pueden ser aproximadas mediante la siguiente expresión:

$$P_{RAD} = \varepsilon_{se} \cdot \sigma \cdot A_{total-h} \cdot (Th - Ta) \quad [3.16]$$

Donde,

$$\varepsilon_{se} : \text{Emisividad de la superficie interna} = 0,9$$

$$\sigma : \text{Constante universal} = 5,78 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \cdot K$$

$$A_{total-h} : \text{Área de la superficie externa del horno} = 2,305 \text{ m}^2$$

$$Th : \text{Temperatura superficie externa} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Ta : \text{Temperatura ambiente} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Entonces, las pérdidas por radiación son equivalentes a:

$$P_{RAD} = 0,9 \times (5,78 \times 10^{-11}) \times 2,305 \cdot (40 - 25) = 0,21 \text{ kW}$$

### **Potencia requerida**

Dado que ya se han calculado el calor absorbido por la carga y las pérdidas de funcionamiento, utilizamos la expresión [3.1] para calcular la potencia total requerida.

$$P_T = P_C + P_{PER}$$

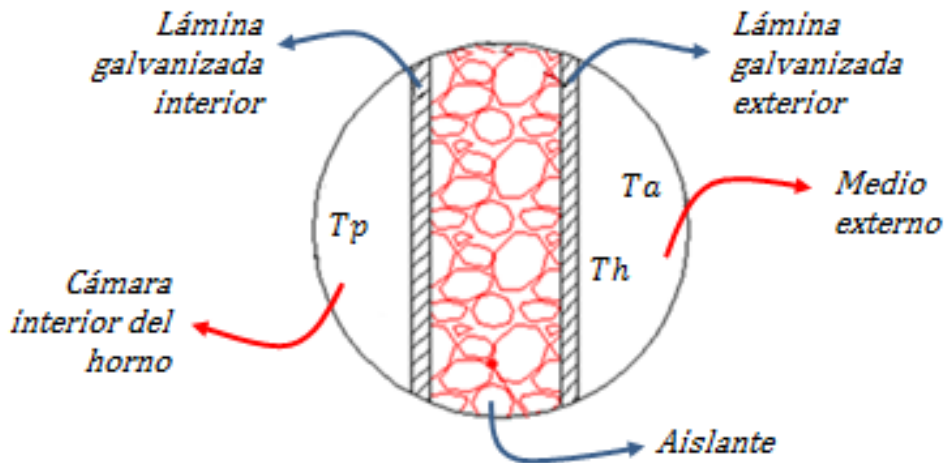
$$P_T = P_C + P_{COND} + P_{CONV} + P_{RAD} = 4 + 0,52 + 0,1 + 0,21 \approx 6 \text{ kW}$$

La potencia total requerida para el funcionamiento del horno es 6 kW.

#### **3.1.4 Dimensionamiento de espesor de aislante**

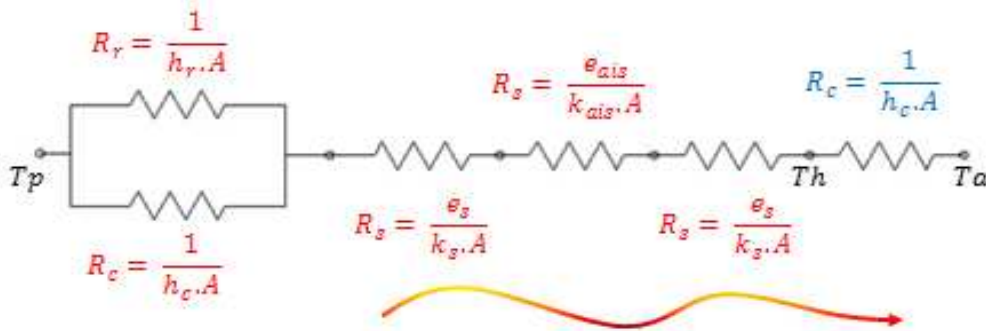
El adecuado aislamiento del horno permitirá elevar su eficiencia energética al reducir las pérdidas por conducción. De igual forma, se debe determinar el espesor mínimo de aislante necesario para reducir costos de fabricación. A su vez, el aislante instalado debe garantizar las condiciones de operación planteadas, entre las cuales figura una temperatura de superficie externa no mayor a 40°C, de tal manera, que no se generen accidentes de los operarios durante su funcionamiento.

Para el dimensionamiento del espesor del aislante, se debe conocer la configuración espacial de los componentes del horno. La cámara interna está cubierta por una lámina de acero galvanizado, luego está instalado el aislante y finalmente, tenemos otra capa de lámina galvanizada para la superficie de la cámara exterior. La temperatura  $T_p$  es la interna del horno,  $T_h$  es la de superficie externa y  $T_a$  es la temperatura del medio exterior.



**Figura 3.4.** Configuración de componentes del horno.

Para simplificación del cálculo, se plantea el circuito de resistencias equivalente a la transferencia de calor. Estas resistencias corresponden a las variables de los fenómenos de conducción, convección y radiación.



**Figura 3.5.** Circuito de resistencias equivalente a la transferencia de calor.

En la Figura 3.5 se aprecia que la primera resistencia está relacionada a la radiación y la convección en la cámara interna del horno. Luego, tenemos tres resistencias que representan el calor que pasa a través de las láminas galvanizadas y el aislante. Finalmente, la última resistencia representa la convección del aire quieto en el exterior. Dado que el flujo de calor es el mismo en todo el circuito, podemos igualar los flujos de calor interno (de  $T_p$  a  $T_h$ ) y el externo (de  $T_h$  a  $T_a$ ) mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{interno} = \dot{Q}_{externo} \quad [3.17]$$

$$\frac{T_p - T_h}{\sum_p^h R} = \frac{T_h - T_a}{R_c} \quad [3.18]$$

Desarrollando la expresión y ordenando los términos, tenemos:

$$e_{ais} = \frac{k_{ais}}{h_c} \cdot \left[ \frac{(T_p - T_h)}{(T_h - T_a)} \right] - \left[ \frac{k_{ais}}{(h_c - h_r)} \right] - K_{ais} \cdot \frac{2 \cdot e_{se}}{k_s} \quad [3.19]$$

Donde,

$e_{aislante}$  : Espesor del aislante (m)

$k_{aislante}$  : Conductividad térmica del aislante = 0,0465 W/m . °C

$h_c$  : Coeficiente convectivo del aire quieto = 5 W/m<sup>2</sup> . °C

$h_r$  : Coeficiente de la radiación en interior del horno = 30 W/m<sup>2</sup> . °C

$e_{se}$  : Espesor de la lámina galvanizada = 1,5 mm

$k_s$  : Conductividad térmica de la lámina galvanizada = 50 W/m . °C

$T_p$  : Temperatura de pared del horno = 450 °C

$T_h$  : Temperatura superficie externa = 40 °C

$T_a$  : Temperatura ambiente = 25 °C

Reemplazando los valores en la expresión [3.19], tenemos que el espesor del aislante es de 68 mm. Según el resultado obtenido, seleccionamos un panel de lana mineral de 80 mm (medidas comerciales – ver anexo 3). El espesor de aislante obtenido se ajusta a las condiciones de operación planteadas. Este puede ser disminuido utilizando un aislante de menor conductividad térmica, pero el costo de adquisición será mayor.

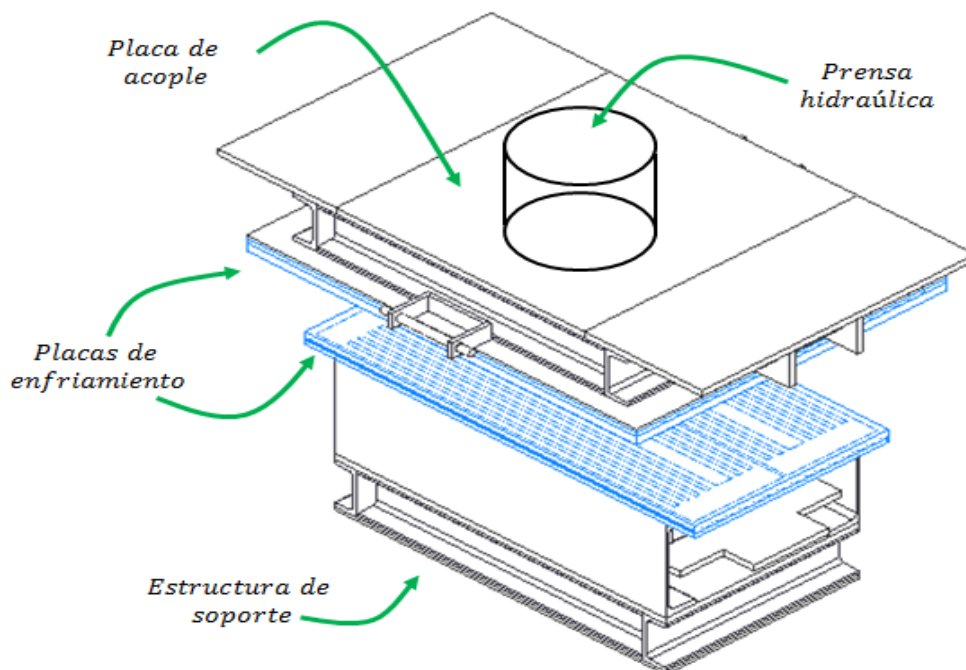
### 3.1.5 Selección de resistencias eléctricas

Es común la utilización de resistencias eléctricas tubulares para superficies calefactoras. Estas pueden montarse fácilmente en las superficies interiores del horno donde serán colocadas y pueden adoptar configuraciones geométricas atípicas. En este caso, se propone como alternativa el empleo de 8 resistencias eléctricas tubulares de 3/8" de 1 kW de potencia. En cada lado de la superficie interna del horno se montan 2 resistencias, de tal manera, que se asegure el flujo de calor necesario por área y se realice una eficiente transferencia de calor.

### 3.2 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

El sistema de enfriamiento tiene como objetivo disminuir la temperatura del molde desde la temperatura máxima del proceso ( $200^{\circ}\text{C}$ ) hasta un valor de temperatura en el cual el polipropileno de la pieza moldeada se solidifique y esta pueda ser extraída sin deformaciones ( $65^{\circ}\text{C}$ ). En la estación de enfriamiento, el molde se posiciona entre dos plataformas de enfriamiento con canales de circulación de agua internos que permitan extraer el calor necesario por medio de los mecanismos de conducción y convección (ver sección 3.2.1.). Se plantea la utilización de agua como medio refrigerante debido a que posee buena capacidad para transmitir calor, es económica y su cambio de fase se produce a elevada temperatura en comparación con otras alternativas comerciales. Por otro lado, es necesaria la utilización de paneles aislantes que reduzcan las pérdidas de calor. Tal como se mencionó anteriormente (ver sección 1.5.4), el proceso de enfriamiento se realiza bajo presión, por lo cual, se deberá verificar la resistencia mecánica de las plataformas bajo las condiciones de operación planteadas. Cabe señalar, que el molde no tiene canales de circulación de agua. En este caso, se diseñan las plataformas para garantizar el enfriamiento del molde de acuerdo a sus dimensiones y material de fabricación.

Entonces, el sistema de enfriamiento está conformado por los siguientes componentes: plataformas de enfriamiento, paneles aislantes, placa de acople y prensa hidráulica.



**Figura 3.6.** Componentes del sistema de enfriamiento.



### 3.2.1 Análisis de la transferencia de calor durante el enfriamiento

En el proceso de enfriamiento, idealmente las plataformas extraerán el calor del molde permitiendo el descenso de su temperatura. Para que esto ocurra, el calor debe transferirse desde el centro del molde hacia su superficie; luego, atravesar la plataforma de enfriamiento y finalmente ser removido hacia el exterior por medio del flujo de agua circulante a través de los canales.

Entonces, para poder determinar los parámetros geométricos y operativos del sistema de enfriamiento, es necesario establecer los mecanismos de transferencia de calor existentes. Estos son la conducción, la convección y la radiación, los cuales se presentan en la gran mayoría de esta clase de procesos térmicos. A continuación, se describe la influencia de cada uno para el proceso de enfriamiento planteado.

#### Conducción

El fenómeno de transmisión de calor por conducción se presenta cuando la energía se transfiere, en un medio sólido, desde una zona de alta temperatura hacia una región de baja temperatura.

Analizando la disposición de los componentes del sistema de enfriamiento, vemos que el proceso de conducción se presenta cuando se transfiere el calor desde el centro hasta la superficie del molde. De igual manera, el calor se transmite por conducción cuando atraviesa el material de la plataforma de enfriamiento. Es importante señalar que, durante el proceso de enfriamiento, la energía interna del molde variará según el tiempo hasta alcanzar el equilibrio. En ese sentido, se debe tomar en cuenta que la transferencia de calor ocurre en estado transitorio.

#### Convección

La transferencia de calor por convección ocurre cuando la superficie de un material sólido se coloca en contacto con un fluido en movimiento, el cual se encuentra a una temperatura distinta a la del sólido. En el sistema planteado, el calor es transmitido por convección a través del flujo de agua de enfriamiento. También, se transfiere calor por convección desde la superficie lateral del molde hacia el exterior, ya que este se encuentra en contacto con el aire que se encuentra a temperatura ambiente. En el caso del flujo de agua, la convección es de tipo forzada pues el fluido es impulsado por un agente externo. En cambio, la convección que se presenta con el aire es de tipo natural, dado que este se encuentra quieto sin la acción de ninguna fuerza externa.

El análisis de la convección forzada del flujo de agua reviste mayor importancia pues está directamente relacionada con la capacidad de enfriamiento del sistema.

### Radiación

En el proceso de transferencia de calor por radiación, un cuerpo transmite energía radiante en función al valor de su temperatura absoluta, independientemente de las condiciones de los alrededores.

Debido a que el molde inicialmente se encuentra relativamente a alta temperatura, se comporta como un cuerpo que emite energía radiante. Sin embargo, conforme disminuye la temperatura del molde, el efecto de la radiación se va minimizando pues este mecanismo está relacionado exponencialmente con la temperatura.

En conclusión, los mecanismos más relevantes para el dimensionamiento del sistema de enfriamiento son la conducción a través del molde y las plataformas y la convección forzada del flujo de agua. Es importante señalar que el calor disipado por convección natural y por radiación influirá en la disminución del tiempo de enfriamiento teórico.

#### 3.2.2 Requerimiento térmico

El primer paso para dimensionar el sistema de enfriamiento es determinar el flujo de calor total que deberá ser removido del molde, el cual depende de las propiedades del termofísicas del material empleado en su fabricación (Alumold) y los parámetros de operación del proceso. Para ello, utilizamos la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_T = \frac{V_c \cdot \rho_c \cdot c_{p_c} \cdot \Delta T_{enf}}{t_{enf}} \quad [kW] \quad [3.20]$$

Donde,

$V_c$  : Volumen de la carga (molde) [ $m^3$ ]

$\rho_c$  : Densidad del Alumold =  $2800 \text{ kg}/m^3$

$c_{p_c}$  : Calor específico del Alumold =  $0,857 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$

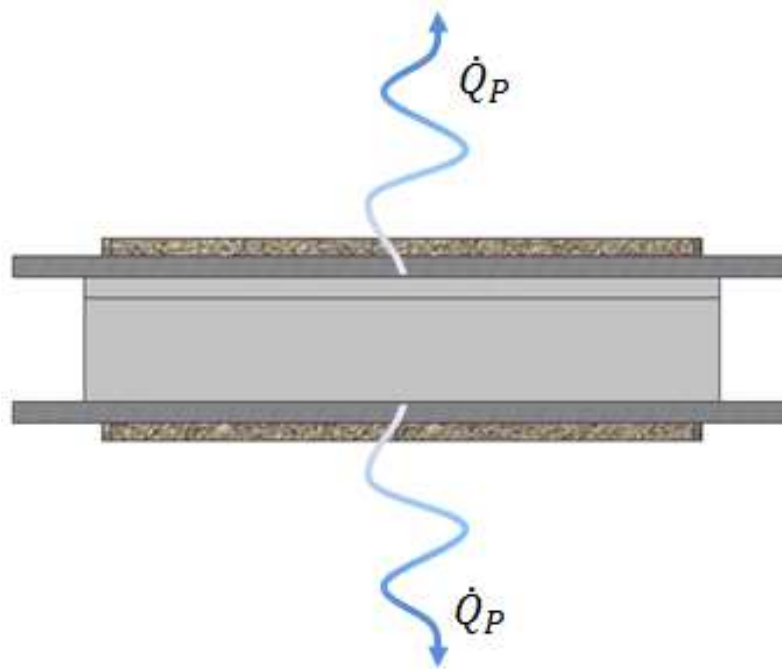
$\Delta T_{enf}$  : Disminución de temperatura desde  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  =  $135 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_{enf}$  : Tiempo de enfriamiento [s]

El tiempo de enfriamiento es el único parámetro que no está definido. Sin embargo, para efectos de cálculo se deberá asumir un valor que luego deberá ser verificado.

Por otro lado, asumimos que las plataformas de enfriamiento tienen la capacidad para extraer la mitad del calor total removido y que los paneles de aislamiento reducirán en gran medida el flujo de pérdidas de calor. Entonces, el calor que deberá remover cada plataforma está determinado por:

$$\dot{Q}_P = \frac{\dot{Q}_T}{2} [kW] \quad [3.21]$$



**Figura 3.7.** Disposición de las plataformas de enfriamiento y aislamientos.

### 3.2.3 Dimensionamiento de las plataformas de enfriamiento

El dimensionamiento de las plataformas de enfriamiento incluye la determinación del flujo másico de agua, el número de canales por plataforma y el tamaño de los orificios que deberán ser mecanizados para permitir el paso del agua. Para ello será necesario analizar las variables presentes en los procesos de conducción y convección forzada analizados en la sección 3.2.1.

#### Determinación del flujo másico por placa y canales

El flujo másico de agua que deberá circular por cada plataforma está directamente relacionado con el flujo de calor requerido para enfriar el molde y con los valores de temperatura de ingreso y salida del agua en los canales:

$$\dot{m}_{agua/P} = \frac{\dot{Q}_P}{c_{p_b} \cdot (T_s - T_e)} [kg/s] \quad [3.22]$$

Donde,

$\dot{Q}_p$  : Flujo de calor removido por cada plataforma [kW]

$Cp_b$  : Calor específico del agua a temperatura de masa  $T_b$  [kJ/kg .°C]

$T_e$  : Temperatura de ingreso del agua [°C]

$T_s$  : Temperatura de salida del agua [°C]

La temperatura de masa ( $T_b$ ) es un valor de referencia que se utiliza para determinar las propiedades térmicas de los fluidos y puedan emplearse en correlaciones de convección dentro de conductos. Esta representa la temperatura del fluido en cierta posición. Asumiendo que la temperatura de la superficie del canal se mantiene aprox. constante, la temperatura de masa puede ser calculada mediante el promedio aritmético entre la temperatura de ingreso y la de salida del agua:

$$T_b = \frac{T_e + T_s}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [3.23]$$



**Figura 3.8.** Parámetros de temperatura de fluidos en conductos.

La temperatura de ingreso del agua ( $T_e$ ) puede ser considerada constante puesto que dependerá del sistema de recirculación de agua. Por otra parte, la temperatura de salida ( $T_s$ ) disminuirá progresivamente su valor puesto que el molde empezará a enfriarse. Estrictamente, se presenta un proceso transitorio de transferencia de calor, el cual debería ser resuelto utilizando procedimientos de cálculo más elaborados. Sin embargo, para fines prácticos, se asume que la temperatura de salida se mantiene en un valor aproximadamente constante.

En cuanto al sistema de circulación de agua, se plantea que el flujo sea independiente en cada canal, para evitar un alto gradiente entre la temperatura de entrada y salida del agua. Entonces, para un determinado número de canales por placa ( $N_p$ ), el flujo másico en cada uno de ellos está dado por:

$$\dot{m}_{agua/c} = \frac{\dot{m}_{agua/P}}{N_p} \text{ [kg/s]} \quad [3.24]$$

### Parámetros adimensionales

En los procesos de convección forzada se utiliza el análisis dimensional debido a que existen muchas variables involucradas en el proceso. Esta clase de análisis permite simplificar el estudio y obtener resultados con mayor facilidad. Será útil determinar el número de Reynolds ( $Re$ ), el número de Nusselt ( $Nu$ ) y el número de Prandtl ( $Pr$ ).

El número de Reynolds está definido por flujo másico de agua circulante y las características geométricas del canal. Su valor indica el tipo de régimen (laminar o turbulento) en que se encuentra el fluido cuando atraviesa el conducto. Entonces, el número de Reynolds es hallado mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_{agua/C}}{\pi \cdot d_H \cdot \mu_b} \quad [3.25]$$

Donde,

$\dot{m}_{agua/C}$  : Flujo másico de agua en cada canal [kg/s]

$d_H$  : Diámetro hidráulico [m]

$\mu_b$  : Viscosidad del agua a  $T_b$  [N.s/m<sup>2</sup>]

El diámetro hidráulico es un valor referencial para el cálculo pues el canal no tiene forma transversal circular. Por cuestiones de fabricación, los canales serán mecanizados con fresas de vástago, las cuales, formarán una sección rectangular. Sin embargo, una vez establecido el valor final del diámetro hidráulico, se puede calcular fácilmente las dimensiones del canal rectangular y de esa forma seleccionar la fresa más adecuada.

$$d_H = \frac{4 \cdot \text{Sección libre para el flujo}}{\text{Perímetro físico en contacto con el fluido}} \quad [3.26]$$

Aplicando la expresión [3.26] para un canal rectangular de ancho  $a'$  y altura  $b'$ :

$$d_H = \frac{4 \cdot a' \cdot b'}{2 \cdot (a' + b')}$$

El número de Nusselt ( $Nu$ ) y Prandtl ( $Pr$ ) serán útiles en la determinación del coeficiente convectivo del agua pues las correlaciones para convección forzada que muchos investigadores han desarrollado están en función de dichos parámetros.

Además, se debe considerar el tipo de régimen del flujo, las dimensiones características del canal y las propiedades termofísicas del agua. Entonces, planteamos la utilización de las siguientes correlaciones de convección forzada en tuberías bajo las siguientes condiciones [Barrantes 2011]:

$$\text{Si } Re < 2320 \rightarrow Nu = 1,86 \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{d_H}{L_c} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad [3.27]$$

$$\text{Si } 2320 \leq Re \leq 10000 \rightarrow Nu = 0,116 \left( 1 + \frac{d_H^2}{L_c} \right) \cdot \left( Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad [3.28]$$

$$\text{Si } Re > 10000 \rightarrow Nu = 0.026 Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad [3.29]$$

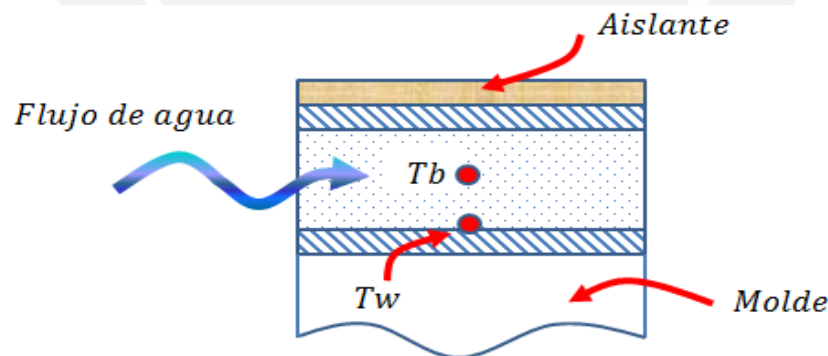
Donde,

$Pr$  : Número de Prandtl a  $T_b$

$L_c$  : Longitud del canal (largo del molde) [m]

$\mu_w$  : Viscosidad del agua a  $T_w$  [ $N \cdot s/m^2$ ]

La temperatura  $T_w$  se refiere al valor de temperatura al cual se encuentra la superficie interna del canal (Ver Figura 3.9). Para efectos de cálculo, este parámetro deberá ser asumido y posteriormente verificado mediante la expresión de calor por convección.



**Figura 3.9.** Temperatura de superficie  $T_w$  en el canal.

Entonces, el coeficiente convectivo del agua ( $h_w$ ) puede ser calculado conociendo el número de Nusselt ( $Nu$ ), el diámetro hidráulico ( $d_H$ ) y la conductividad térmica ( $k_b$ ) del fluido evaluado a la temperatura de masa ( $T_b$ ).

$$Nu = \frac{h_w \cdot d_H}{k_b}$$

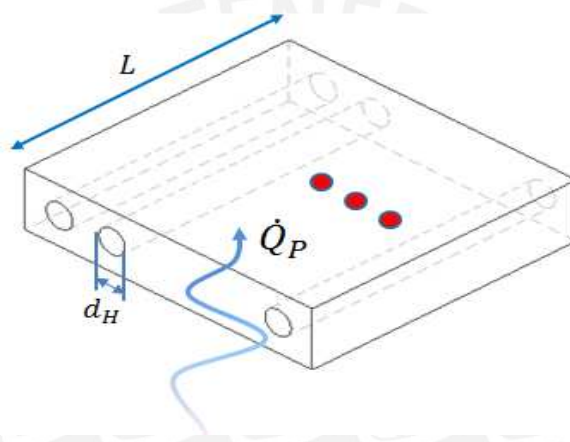
$$\rightarrow h_w = \frac{Nu \cdot k_b}{d_H} \quad [kW/m^2 \cdot ^\circ C] \quad [3.30]$$

### Verificación de temperatura de superficie $T_w$ asumida

Tal como se mencionó anteriormente, la temperatura de superficie ( $T_w$ ) fue asumida para poder determinar el coeficiente convectivo del agua. Sin embargo, es de vital importancia poder verificar el valor asumido, pues este parámetro representa el foco térmico que ejercerán las plataformas de enfriamiento sobre la superficie del molde.

En la Figura 3.10 podemos apreciar el flujo de calor removido por el agua circulante, este puede ser calculado mediante la expresión de transferencia de calor por convección:

$$\dot{Q}_P = h_w \cdot A_s (T_w - T_b) \text{ [kW]} \quad [3.31]$$



**Figura 3.10.** Flujo de calor removido por convección forzada en los canales.

El parámetro  $A_s$  se refiere a la superficie externa de los conductos por donde circula el agua. Entonces, tenemos que:

$$A_s = \pi \cdot d_H \cdot L_c \cdot N_p \text{ [m}^2\text{]} \quad [3.32]$$

Reemplazando la ecuación [3.28] en la expresión [3.29]:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_P &= h_w \cdot \pi \cdot d_H \cdot L_c \cdot N_p (T_w - T_b) \\ \rightarrow T_w &= T_b + \frac{\dot{Q}_P}{h_w \cdot \pi \cdot d_H \cdot L_c \cdot N_p} \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned} \quad [3.33]$$

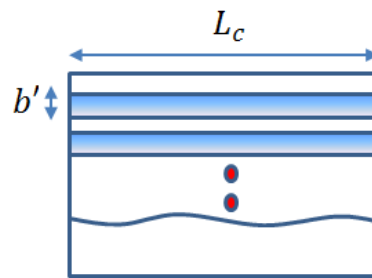
Mediante la expresión [3.33] se puede verificar la temperatura de superficie ( $T_w$ ) asumida. En el caso que las temperaturas de superficie asumida y obtenida sean similares, se habrá determinado el foco térmico existente en la superficie de los canales. Mientras que, si los valores de temperatura comparados difieren, debemos asumir otra temperatura de superficie y realizar el cálculo nuevamente hasta que se cumpla la condición planteada.

**Determinación del foco térmico en la superficie del molde**

En el acápite anterior se menciona que el foco térmico que ejercen las plataformas de enfriamiento sobre la superficie del molde es a la temperatura de superficie ( $T_w$ ). Sin embargo, es importante considerar los siguientes puntos para determinar el foco térmico de manera más aproximada:

- El área real de transferencia de calor es menor la superficie de contacto entre las plataformas y el molde. Esto ocurre debido a los espaciamientos existentes entre cada canal (Ver Figura 3.11).

$$A_T = N_P \cdot d_H \cdot L_c \text{ [m}^2\text{]} \quad [3.34]$$



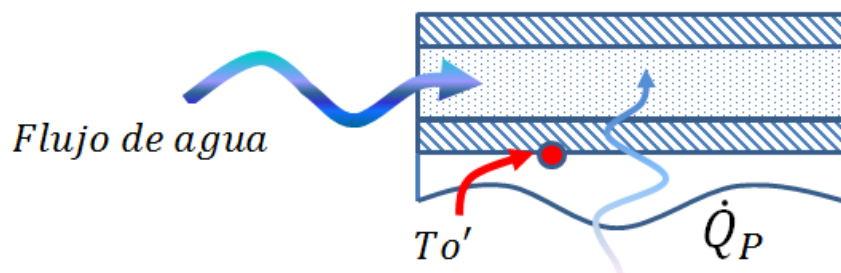
**Figura 3.11.** Área real de transferencia de calor.

- Existe un gradiente de temperatura entre la superficie interna del canal y la superficie externa del molde. Este es producido por el espesor de la plataforma de enfriamiento ( $e_p$ ). El gradiente es determinado por la expresión de transferencia de calor por conducción:

$$\dot{Q}_P = \frac{k_p}{e_p} \cdot A_T \cdot \Delta T_P = \frac{k_p}{e_p} \cdot A_T \cdot (T_{o'} - T_w)$$

$$\rightarrow T_{o'} = T_w + \Delta T_P \quad [3.35]$$

La temperatura  $T_{o'}$  es el valor de temperatura al cual estará sometida la superficie del molde durante el proceso de enfriamiento (foco térmico).



**Figura 3.12.** Gradiente de temperatura debido al espesor de la plataforma.



### Flujo de calor transitorio por conducción

El dimensionamiento de las plataformas de enfriamiento concluye con el análisis del flujo de calor transitorio por conducción que ocurre en el sistema molde-plataformas. El molde se encuentra inicialmente a la temperatura de moldeo, sin embargo, cuando su superficie haga contacto con las plataformas de enfriamiento empezará a disminuir progresivamente su temperatura hasta que alcance el estado de equilibrio. Este fenómeno es conocido como flujo de calor transitorio por conducción.

Es posible estimar la temperatura en el centro del molde luego de transcurrido el tiempo de enfriamiento establecido, mediante la siguiente expresión [Holman 1990]:

$$T(x, t_{enf}) = T_{o'} + (T_{i'} - T_{o'}) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\delta_c t_{enf}}}\right) \quad [3.36]$$

Donde,

$T(x, t_{enf})$ : Temperatura en el centro del molde luego del tiempo de enfriamiento [°C]

$T_{o'}$ : Temperatura de las plataformas de enfriamiento (foco térmico) [°C]

$T_{i'}$ : Temperatura inicial del molde = 200 °C

$x$ : Distancia de la superficie al centro del molde = 0,035 m

$t_{enf}$ : tiempo de enfriamiento [s]

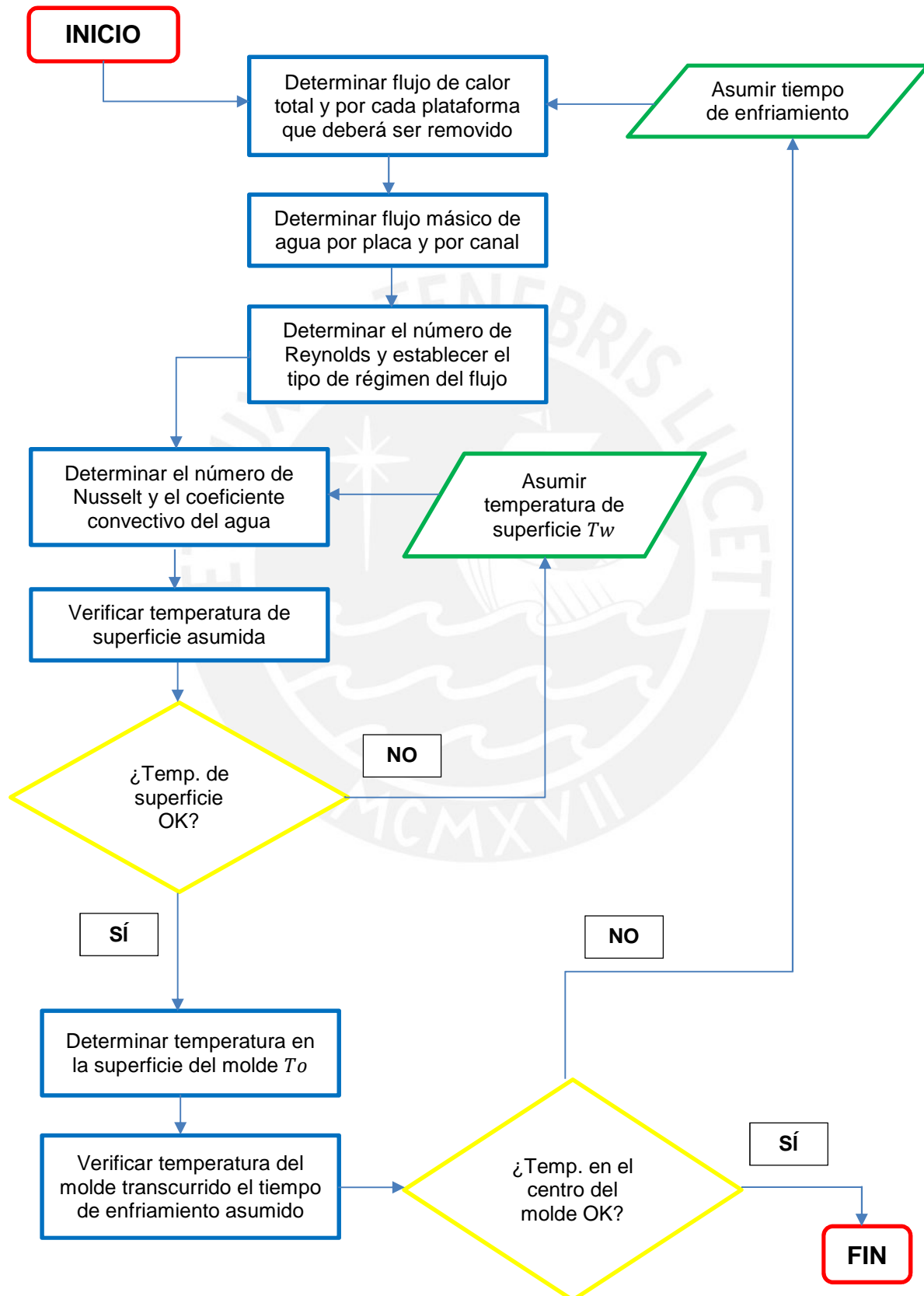
$\delta_c$ : Difusividad térmica del material del molde =  $6,38 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Entonces, si la temperatura estimada en el centro del molde es similar al valor planteado en el requerimiento térmico (65°C), podemos concluir con el dimensionamiento del sistema de enfriamiento. De lo contrario, se debe asumir otro valor para el tiempo de enfriamiento y volver a realizar el cálculo hasta satisfacer las condiciones de operación establecidas.

El procedimiento de dimensionamiento de las plataformas de enfriamiento ha sido planteado en función a los mecanismos de transmisión de calor analizados. Dado que es un proceso de cálculo relativamente extenso e iterativo no se muestran los valores obtenidos parcialmente. En la sección 3.2.4 se muestran los resultados obtenidos del proceso iterativo.

**Diagrama de flujo del dimensionamiento de las plataformas**

A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso de dimensionamiento de las plataformas de enfriamiento, de tal forma, que pueda comprenderse sin dificultad.



### 3.2.4 Parámetros finales del sistema de enfriamiento

A continuación, se muestran los valores finales obtenidos para cada parámetro del sistema de enfriamiento.

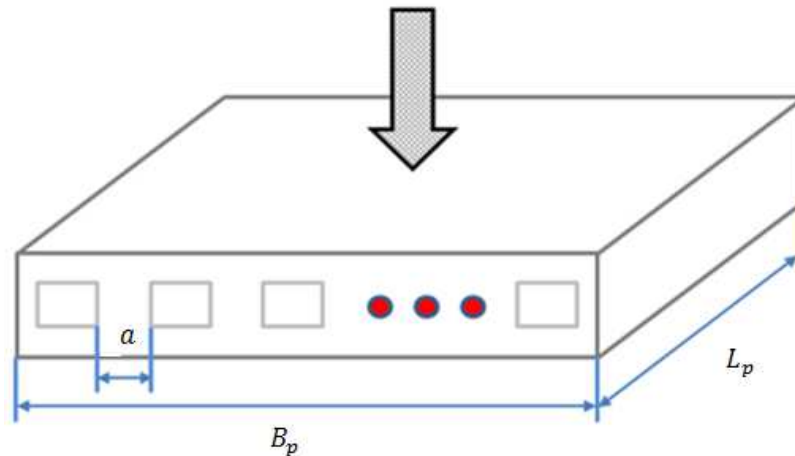
**Tabla 3.2:** Parámetros del sistema de enfriamiento

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor final
Temperatura inicial del molde	$T_{i'}$	°C	200
Temperatura final del molde (Planteado)	$T_{f'}$	°C	65
Tiempo de enfriamiento	$t_{enf}$	min	15
Calor total removido	$\dot{Q}_T$	kW	5,6
Calor removido por placa	$\dot{Q}_P$	kW	2,8
Temperatura de ingreso agua	$T_e$	°C	20
Temperatura de salida agua	$T_s$	°C	70
Temperatura de masa	$T_b$	°C	45
Número de canales por placa	$N_p$	-	20
Diámetro hidráulico	$d_H$	mm <sup>2</sup>	10
Flujo másico por placa	$\dot{m}_{agua/P}$	kg/s	0,0134
Flujo másico por canal	$\dot{m}_{agua/C}$	kg/s	0,00067
Número de Reynolds	$Re$	-	14263
Temperatura de superficie asumida	$T_{w\ asum}$	°C	52
Número de Nusselt	$Nu$	-	19,3
Coefficiente convectivo del agua	$h_w$	W/m <sup>2</sup> .°C	1225
Temperatura de superficie verificada	$T_{w\ verif}$	°C	51,9
Temperatura en la superficie del molde	$T_{o'}$	°C	52,3
Temperatura en el centro del molde transcurrido tiempo asumido	$T(x, t_{enf})$	°C	64,4

Tal como se puede apreciar, el valor de temperatura final del molde planteado en el requerimiento térmico es similar a la temperatura calculada para el centro de este luego de transcurrido el tiempo de enfriamiento. Con ello, concluimos el procedimiento de dimensionamiento de las plataformas de enfriamiento.

### 3.2.5 Verificación de la resistencia mecánica de las plataformas

Las plataformas de enfriamiento estarán sometidas a la presión ejercida por la prensa hidráulica. Por ese motivo, es necesario verificar su comportamiento antes este tipo de solicitaciones. Además, Debemos tener en consideración la geometría de los canales de circulación agua. En la Figura 3.13 se puede apreciar el esquema de la situación planteada y las longitudes características que intervendrán en el cálculo.



**Figura 3.13.** Plataforma de enfriamiento sometida a presión.

Entonces, podemos definir el esfuerzo de compresión como el cociente entre la fuerza aplicada y el área de contacto entre las placas que conforman la plataforma. Para lo cual es necesario definir el parámetro “ $a$ ” que hace referencia a la distancia entre canales.

$$a = \frac{(B_p - N_p \cdot b')}{(N_p - 1)} \quad [3.37]$$

Donde,

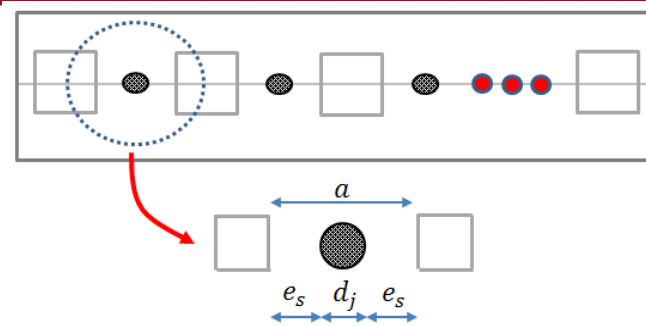
$B_p$  : Ancho de la plataforma = 420 mm

$N_p$  : Número de canales por plataforma = 20

$b'$  : Ancho del canal = 10 mm

Resolviendo la expresión [3.37], hallamos que el valor de “ $a$ ” es 11,6 mm.

Sin embargo, se plantea la utilización de juntas de nitrilo entre los canales, de tal forma, que eviten cualquier tipo de fuga de agua a través de estos (Ver Figura 3.14). Este planteamiento reduce el área efectiva de contacto entre placas pues el parámetro “ $a$ ” disminuye en función del diámetro de la junta. En este caso, se emplearán juntas de 3 mm de diámetro.



**Figura 3.14.** Longitud efectiva de contacto entre placas.

En ese sentido, podemos determinar la longitud efectiva de contacto ( $e_s$ ) conociendo el valor de “ $a$ ” y del diámetro de la junta ( $d_j$ ):

$$a = 2 \cdot e_s + d_j \rightarrow e_s = \frac{a - d_j}{2} \quad [3.38]$$

De la expresión anterior se resuelve que  $e_s$  equivale a 4,3 mm.

Ahora, dado que ya se han establecidos los parámetros geométricos, es posible calcular el esfuerzo actuante y verificar la resistencia de las plataformas. En el cálculo del establecimiento del foco térmico ejercido por las plataformas, se plantea como material para las placas el aluminio 2024 por su buena conductividad térmica, por la facilidad que presenta para el mecanizado y por su elevada resistencia (ver anexo4). Entonces, mediante la siguiente expresión se puede verificar la resistencia de las plataformas:

$$\sigma_C \leq \frac{\sigma_F}{FS} \rightarrow \frac{P_M \cdot A_E}{2 \cdot e_s \cdot (N_p - 1) \cdot L_p} \leq \frac{\sigma_F}{FS} \quad [3.39]$$

Donde,

$P_M$  : Presión de moldeo = 7 N/mm<sup>2</sup>

$A_E$  : Área del émbolo de la prensa = 31416 mm<sup>2</sup>

$L_p$  : Largo de la plataforma = 528 mm

$\sigma_{F\ 2024}$  : Esfuerzo de fluencia del aluminio 2024 = 270 N/mm<sup>2</sup>

$FS$  : Factor de seguridad = 2,5 [Vidosic 1957]

Resolviendo la expresión [3.39] se verifica que las plataformas no fallarán por resistencia, ya que se obtiene:

$$2,6 \frac{N}{mm^2} < 108 \frac{N}{mm^2}$$

### 3.2.6 Caída de presión del agua de enfriamiento

El análisis de la caída de presión del agua es importante para la selección de la bomba centrífuga del sistema de enfriamiento. Para determinar los parámetros que intervendrán en el cálculo es necesario definir la configuración geométrica de los elementos del sistema (Ver Figura 3.15). En este caso, se plantea el esquema básico de componentes que permitirá entregar el flujo de agua necesario al sistema sin considerar el sistema de recirculación que permitiese optimizar el uso de recursos.

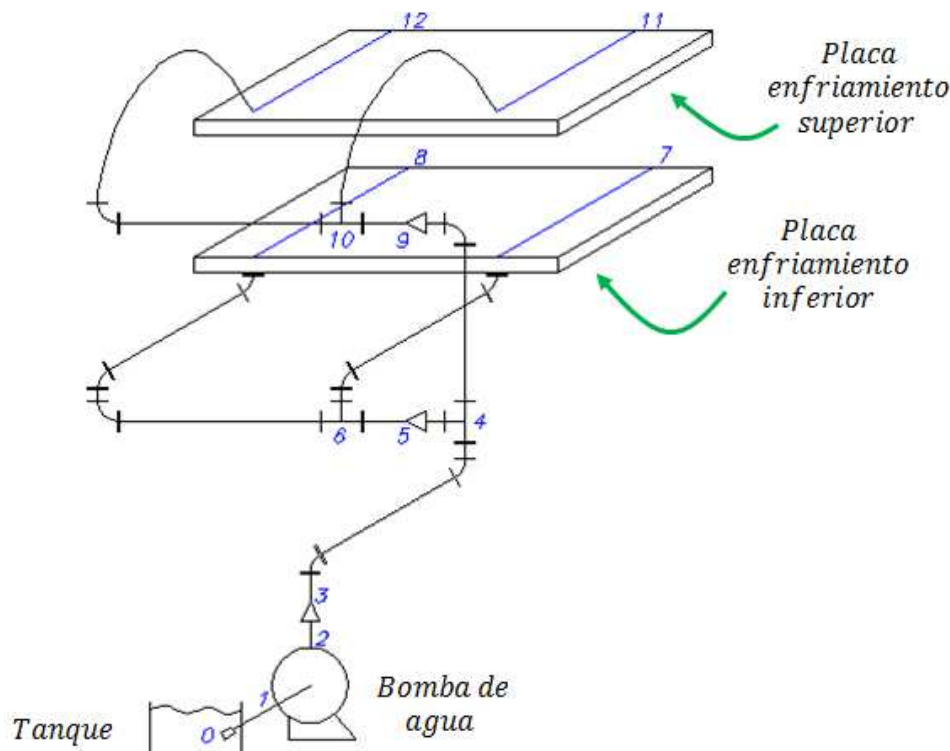


Figura 3.15. Esquema de instalación del sistema de enfriamiento.

#### Consideraciones previas

- Fluido en el reservorio: Agua a 20 °C (condiciones normales)
- Ubicación: Lima (nivel del mar)
- Tuberías: Plástico – PVC
- Propiedades del agua:

$$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{20^{\circ}\text{C}} = 1,00 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

#### Selección de tuberías

Las tuberías que serán empleadas en la instalación serán de PVC para agua fría pues son de costo accesible y su mantenimiento no es complicado de realizar. Por otro lado, es importante definir el diámetro de la tubería principal para lo cual emplearemos la siguiente recomendación [Karassik 1967]:  $v_{descarga} \leq 3,0 \text{ m/s}$

En la sección 3.2.4 se definió el flujo másico de agua que circulará por cada plataforma, entonces es posible determinar el flujo másico total que deberá proporcionar el sistema. Consideramos un factor de seguridad de 6 para contrarrestar el efecto de variación de la temperatura a la salida de los canales (asumida constante en el dimensionamiento de los canales). Además, se puede establecer el caudal conociendo la densidad del fluido:

$$\dot{m}_{agua/T} = 6 \cdot 2 \cdot \dot{m}_{agua/P} = 6 \times 2 \times 0,0134 \approx 0,16 \text{ kg/s} \quad [3.40]$$

$$\dot{V}_{agua} = \frac{\dot{m}_{agua/T}}{\rho_{20^\circ C}} = \frac{0,16}{998} = 1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \approx 0,16 \text{ l/s} \approx 10 \text{ l/m} \quad [3.41]$$

Con los datos anteriores y considerando una velocidad de flujo de 0,5 m/s, podemos determinar el diámetro de la tubería principal:

$$\dot{V}_{agua} = v_{agua} \cdot A_{tub} = v_{agua} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_T^2 \rightarrow d_T = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{agua}}{\pi \cdot v_{agua}}} \quad [3.42]$$

Reemplazando los valores en la expresión [3.39]:

$$d_T = \sqrt{\frac{4 \times 1,6 \times 10^{-4}}{\pi \times 0,5}} = 20,2 \text{ mm}$$

Escogiendo un diámetro de tubería normalizado:  $d_T = 25,4 \text{ mm} = 1''$ .

### Cálculo de altura manométrica total

La altura manométrica total ( $H_t$ ) es aquella energía contra la cual trabajará la bomba durante su funcionamiento y comprende los siguientes factores: alturas estáticas de succión y descarga y las pérdidas por rozamiento en las tuberías y accesorios.

$$H_t = H_{man-estático} + H_{man-dinámico} \quad [3.43]$$

$$\rightarrow H_{man-estático} = Z_s - Z_i \quad [3.44]$$

$$\rightarrow H_{man-dinámico} = h_{w_{tub}} + h_{w_{accesorios}} \quad [3.45]$$

Donde,

$Z_s$  : Altura del punto superior de entrega de caudal [m. c. a.]

$Z_i$  : Altura del punto inferior de entrega de caudal [m. c. a.]

$h_{w_{tub}}$  : Pérdidas en las tuberías [m. c. a.]

$h_{w_{accesorios}}$  : Pérdidas en los accesorios [m. c. a.]

Analizando la configuración de la instalación propuesta, se puede observar que existen dos rutas por las cuales circulará el agua. Por ese motivo, debemos analizar estas rutas y determinar las alturas manométricas en cada caso. Los análisis se realizarán desde la succión del agua (tanque de reservorio) hasta el punto de salida de las plataformas.

En la siguiente tabla se muestran los accesorios de cada tramo de tubería. De igual forma, se muestran las longitudes equivalentes de estos componentes, los cuales nos permitirán cuantificar las pérdidas.

**Tabla 3.3:** Longitudes equivalentes en cada tramo de tubería

Tramo	Caudal (l/s)	Diámetro (in)	Accesorios	Longitud equivalente unitaria (m)	Cant.	Longitud equivalente total (m)
0 – 1	0,2	1	Acople	0,7	1	0,7
2 – 3	0,2	1	Reductor	0,65	1	0,65
3 – 4	0,2	1	Codo 90°	0,7	2	1,4
			Unión T	1,4	1	1,4
4 – 5	0,1	¾	Reductor	0,5	1	0,5
5 – 6	0,1	¾	Unión T	1,0	1	1,0
6 – 7	0,05	½	Codo 90°	0,5	2	1,0
			Acople	0,4	1	0,2
6 – 8	0,05	½	Codo 90°	0,5	3	1,5
			Acople	0,4	1	0,4
4 – 9	0,1	¾	Codo 90°	0,7	1	0,7
			Reductor	0,5	1	0,5
9 – 10	0,1	¾	Unión T	1,0	1	1,0
10 – 11	0,05	½	Acople	0,4	1	0,4
11 – 12	0,05	½	Codo 90°	0,5	1	0,5
			Acople	0,4	1	0,4

Las pérdidas en las tuberías y los accesorios se pueden obtener mediante las siguientes expresiones:

$$hw_{tub} = \xi \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad [3.46]$$

$$hw_{accesorios} = \xi \frac{L_{eq} \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad [3.47]$$



Donde,

$\xi$  : Coeficiente de fricción

$L$  : Longitud de la tubería [m]

$L_{eq}$  : Longitud equivalente de accesorios [m]

$v_{agua}$  : Velocidad del flujo de agua [m/s]

$D$  : Diámetro de la tubería

El valor del coeficiente de fricción ( $\xi$ ) se obtiene del diagrama de Moody, ingresando como parámetros el número de Reynolds y la rugosidad relativa ( $k_s/D$ ). Para las tuberías de PVC el valor de  $k_s$  es 0,02 mm. En la siguiente tabla, se muestran los valores de pérdidas según las rutas planteadas para el análisis.

**Tabla 3.4:** Pérdidas en tuberías y accesorios

Tramo	Reynolds	Long. Tubería (m)	Pérdidas tuberías ( $hw_{tub}$ )	Long. Equivalente (m)	Pérdidas accesorios ( $hw_{accesorios}$ )
0 – 1	$1,01 \times 10^4$	0,16	0,00097	0,7	0,00425
2 – 3	$1,01 \times 10^4$	0,107	0,00065	0,65	0,00394
3 – 4	$1,34 \times 10^4$	0,688	0,01876	2,8	0,07634
4 – 5	$6,72 \times 10^3$	0,12	0,00089	0,5	0,00373
5 – 6	$1,01 \times 10^4$	0,105	0,00509	1,0	0,04852
6 – 7	$5,04 \times 10^3$	0,748	0,01059	1,4	0,01981
6 – 8	$5,04 \times 10^3$	0,908	0,01285	1,9	0,02689
4 – 9	$6,72 \times 10^3$	0,595	0,00444	1,2	0,00895
9 – 10	$1,01 \times 10^4$	0,079	0,00383	1,0	0,04852
10 – 11	$5,04 \times 10^4$	1,412	0,01998	0,4	0,00566
10 – 12	$5,04 \times 10^4$	1,624	0,02298	0,9	0,01274

Entonces, los resultados para altura manométrica total son los siguientes:

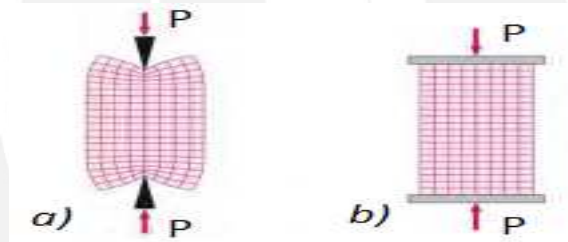
**Tabla 3.5:** Altura manométrica total de tramos analizados

Tramo	$H_{man-estático}$ (m.c.a.)	$H_{man-dinámico}$ (m.c.a.)	$H_t$ (m.c.a.)
0 – 4	0,61	0,23	0,84
0 – 5	0,9	0,36	1,26

La bomba es seleccionada en función a la altura manométrica total crítica (1,26 m.c.a) y el caudal requerido (10 l/min). Según el catálogo de bombas periféricas del fabricante Pedrollo, seleccionamos el modelo PK 60 de 0,5 HP el cual cumple con las condiciones de operación planteadas (ver anexo 5).

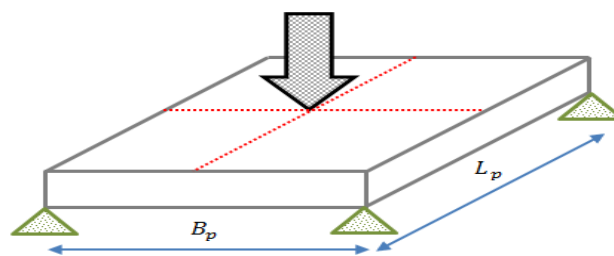
### 3.2.7 Dimensionamiento de la placa de acople

En el proceso de moldeo por compresión planteado en la sección 1.5.2 se establece que durante el enfriamiento se aplique presión para garantizar la obtención de una pieza moldeada con buenas propiedades mecánicas. Esta presión se aplica a través de una prensa hidráulica y la podemos representar por medio de una fuerza puntual. Es de vital importancia el empleo de una placa rígida para garantizar que la fuerza puntual aplicada se transfiera al molde en forma de carga distribuida, de tal manera que sea uniforme la presión aplicada sobre la pieza moldeada. Se propone el empleo de acero AISI 1045 para el mecanizado de esta placa rígida (ver anexo 6). En la Figura 3.16 se puede apreciar claramente el efecto que se desea obtener utilizando la placa de acople [Beer 2010].



**Figura 3.16.** Efecto de una fuerza aplicada: a) sin placa y b) con placa rígida.

Sin embargo, cuando se aplique la carga puntual sobre la placa de acople, inevitablemente, esta sufrirá una deformación, la cual no debe exceder las tolerancias planteadas pues de lo contrario se verá afectada la pieza que se está moldeando. Para el análisis cuantitativo de la deformación se empleará la teoría de placas y láminas propuesta por Timoshenko y se asume que la placa de acople está simplemente apoyada en sus extremos.



**Figura 3.17.** Placa rectangular con carga puntual apoyada en sus extremos.

Para la situación planteada, la deformación de la placa puede ser hallada mediante la siguiente expresión [Timoshenko 1987]:

$$\delta_{pa} = \alpha' \cdot \frac{P_M \cdot A_E \cdot B_p^2}{E_p I_p} = \alpha' \cdot \frac{P_M \cdot A_E \cdot B_p^2}{E_p \cdot \frac{B_p \cdot e_{pa}^3}{12}} \quad [3.48]$$

Donde,

$\delta_{pa}$  : Deformación máxima permisible = 1 mm

$\alpha'$  : Factor de relación entre los lados de la placa ( $L_p/B_p$ )

$P_M$  : Presión de moldeo = 7 N/mm<sup>2</sup>

$A_E$  : Área del émbolo de la prensa = 31416 mm<sup>2</sup>

$B_p$  : Ancho de la placa = 420 mm

$E_p$  : Módulo de elasticidad del acero AISI 1045 = 200 000 N/mm<sup>2</sup>

$I_p$  : Momento de inercia de la placa [mm<sup>4</sup>]

$e_{pa}$  : Espesor de la placa de acople [mm]

En la siguiente tabla podemos apreciar los valores de  $\alpha$  propuestos por Timoshenko para distintas relaciones entre los lados de la placa ( $L_p/B_p$ ).

**Tabla 3.6:** Factor de deflexión ( $\alpha'$ ) para placa rectangular con carga centrada

L/B	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	$\infty$
$\alpha'$	0,01160	0,01265	0,01353	0,01484	0,01570	0,01620	0,01651	0,01690	0,01695

Para  $L_p = 528$  mm, la relación  $L_p/B_p$  es 1,25. Interpolando entre los valores propuestos tenemos que el coeficiente  $\alpha'$  es 0,01386.

Despejando la ecuación [3.48] en función del espesor y reemplazando los valores previamente determinados, tenemos que:

$$e_{pa} \geq 2.29 \cdot \sqrt[3]{\frac{\alpha' \cdot P_M \cdot A_E \cdot B_p}{E \cdot \delta_{pa}}} = 2.29 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,01386 \times 7 \times 31,416 \times 420}{200\,000 \times 1}} \text{ mm}$$

En base al resultado obtenido, podemos determinar que el espesor mínimo de la placa de acople necesario para garantizar la deformación dentro de los límites establecidos es 4,25 mm.

## CAPÍTULO 4

### PLANOS Y COSTOS DE FABRICACIÓN

#### 4.1 PLANOS DE FABRICACIÓN

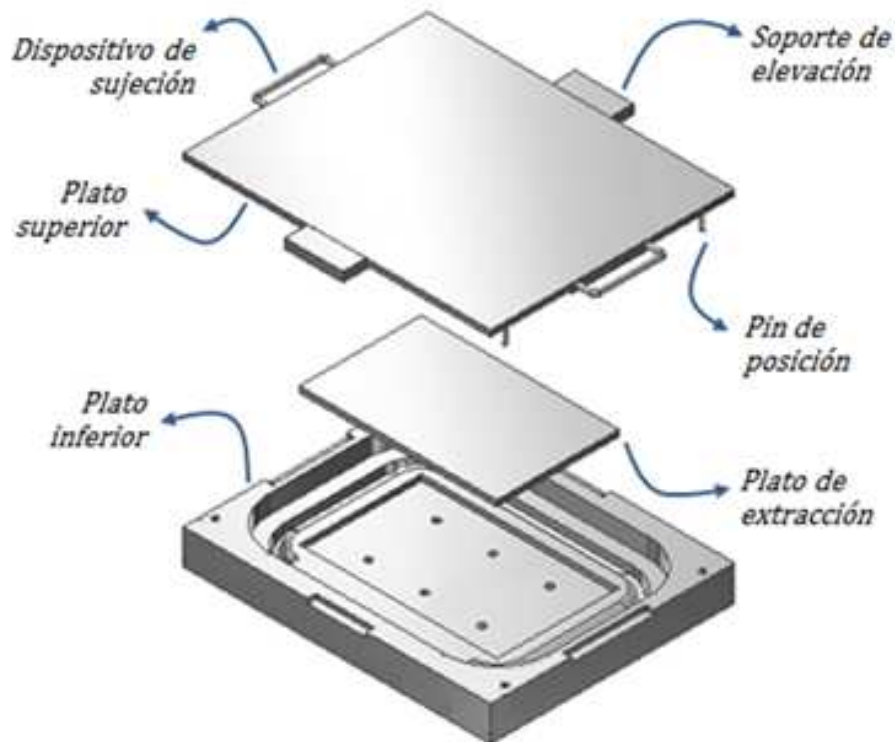
En base a los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se elaboraron los planos de fabricación de los moldes para cada superficie. La presentación de estos planos se rige bajo la norma ISO 216.

**Tabla 4.1:** Listado de planos de fabricación de los moldes

N° Lámina	Título	Formato	Medidas (mm)
1	Ensamble molde tablero	A1	841 x 594
2	Ensamble molde asiento	A1	841 x 594
3	Ensamble molde respaldo	A1	841 x 594
4	Plato inferior tablero	A1	841 x 594
5	Plato superior tablero	A1	841 x 594
6	Placa extracción tablero	A3	420 x 297
7	Plato inferior asiento	A1	841 x 594
8	Plato superior asiento	A1	841 x 594
9	Placa extracción asiento	A4	297 x 210
10	Plato inferior respaldo	A2	594 x 420
11	Plato superior respaldo	A2	594 x 420
12	Placa extracción respaldo	A4	297 x 210
13	Pin guía	A4	297 x 210
14	Soporte elevación	A4	297 x 210
15	Dispositivo de sujeción	A3	420 x 297

#### 4.2 COMPONENTES DEL MOLDE

En la sección 1.4.5 se determinó el empleo de un molde manual (según el grado de automatización del proceso) y positivo (de acuerdo a la configuración de los platos superior e inferior). Sin embargo, cada molde es un ensamble el cual está formado por varios componentes (Ver Figura 4.1). A continuación, se describe la función de cada una de estas partes.



**Figura 4.1.** Componentes del molde del tablero.

#### **Plato inferior**

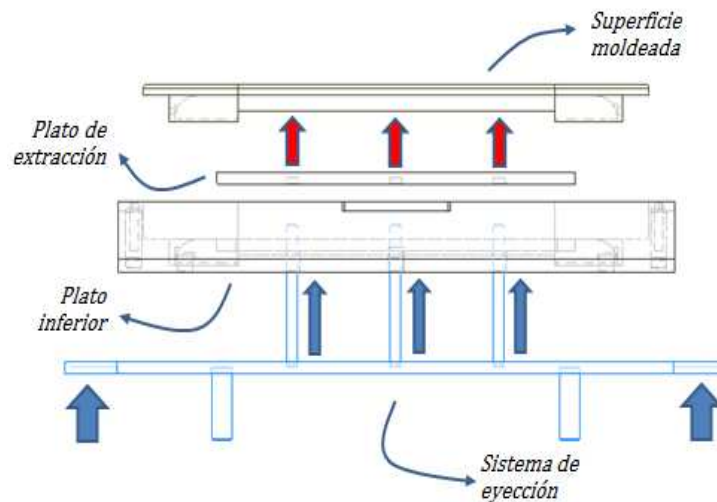
En el plato inferior se deposita el material compuesto. En la parte superior, tiene 4 agujeros que sirven para el posicionamiento de los pines del plato superior. La longitud de estos pines está determinada por la cantidad de materia prima; cuando se realiza la carga, el compuesto ocupa un mayor volumen, por lo cual, se debe asegurar que el plato superior siempre este sujetado al plato inferior, Por otro lado, dentro de la cavidad, se ha realizado un mecanizado de sección rectangular, en el cual se acopla el plato de extracción. A su vez, en dicha cavidad se han taladrado 6 agujeros pasantes para los pines de extracción. Cabe señalar, que en las zonas laterales, el plato inferior tiene 6 agujeros (3 a cada lado) que sirven para el sistema de transporte del molde.

#### **Plato superior**

El plato superior aplica la presión sobre el material compuesto y su geometría representa la forma de la superficie que se desea obtener. Tiene 4 pines de posicionamiento para su acople al plato inferior. También, consta de dispositivos de sujeción que permiten mayor facilidad para su manipulación durante la carga del material y el retiro de la pieza moldeada. En las zonas laterales, tiene placas que permiten su acople a la prensa (ver soporte de elevación).

### Plato de extracción

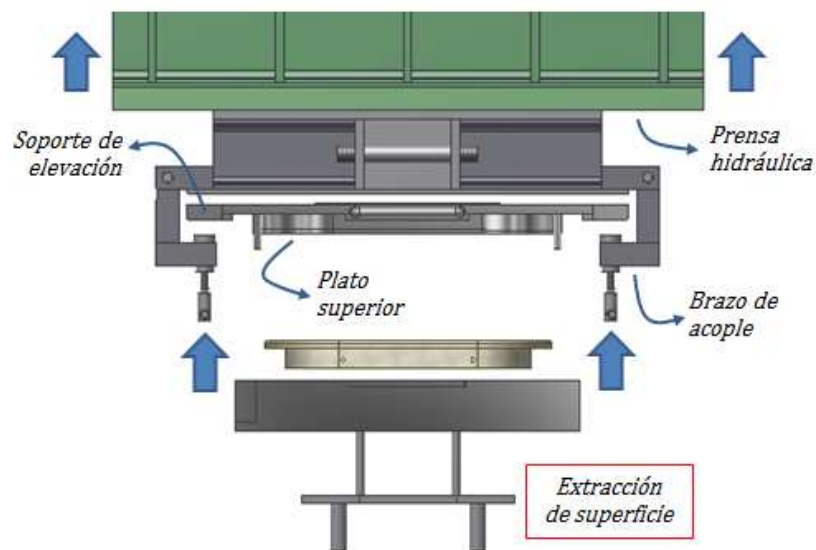
El sistema de moldeo tiene un mecanismo de eyección de superficie moldeada. Cuando este se activa, 6 pines ejercen presión sobre el plato de extracción, lo cual genera una fuerza capaz de retirar la superficie moldeada de la cavidad del plato inferior (Ver Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Sistema de eyección de superficie moldeada.

### Soporte de elevación

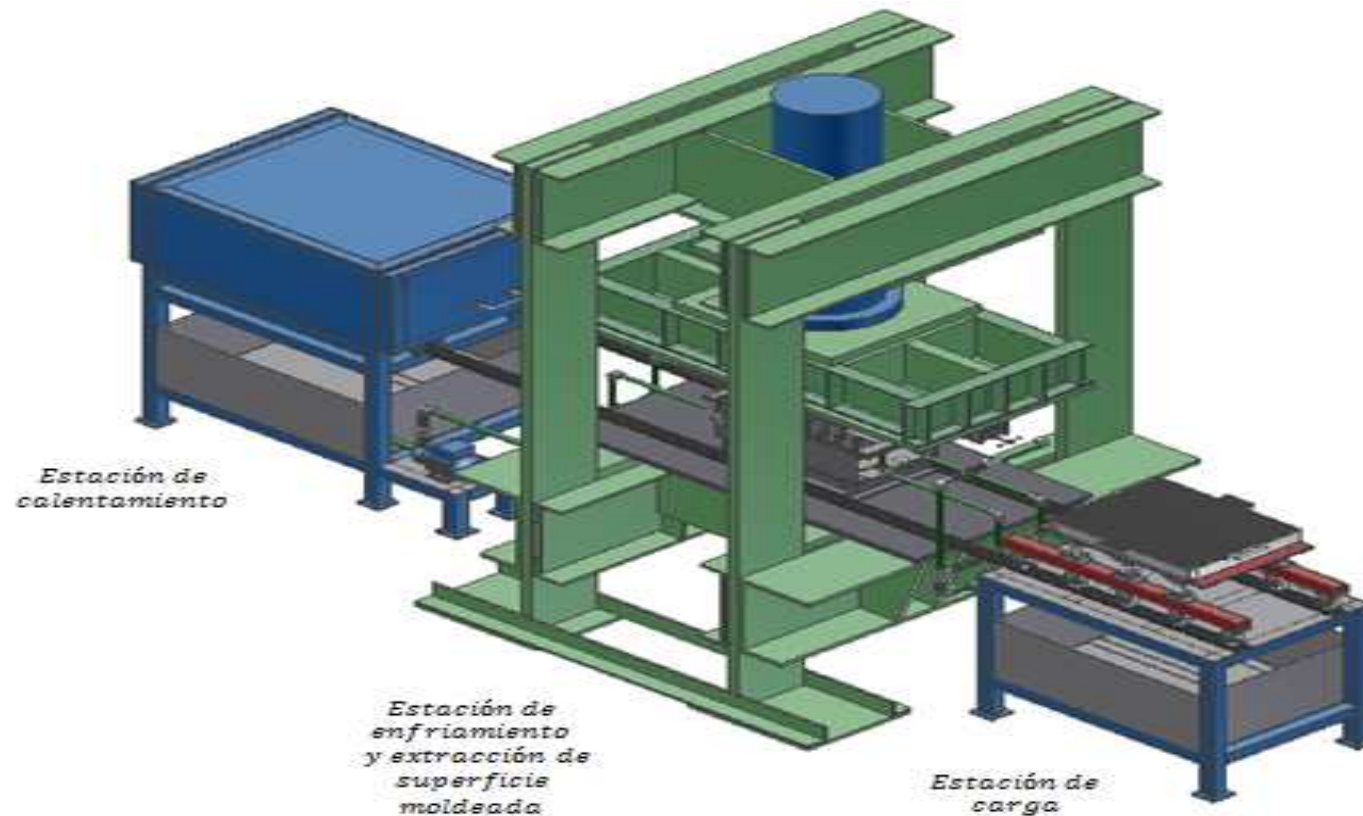
El plato superior tiene dos soportes de elevación laterales que permiten levantarlo mientras se realiza la extracción de la superficie. Esto se logra mediante un brazo de acople ensamblado a la prensa hidráulica (Ver Figura 4.3).



**Figura 4.3.** Mecanismo de soportes de elevación y brazos de acople.

### 4.3 MODELO CAD DEL SISTEMA DE MOLDEO

Tal como se ha señalado anteriormente, este trabajo pretende complementar un proyecto de investigación cuyo objetivo es el diseño de un sistema de moldeo. En ese sentido, se muestra el modelo CAD de dicho sistema para mayor referencia.



**Figura 4.4.** Vista isométrica del modelo CAD del equipo de moldeo.

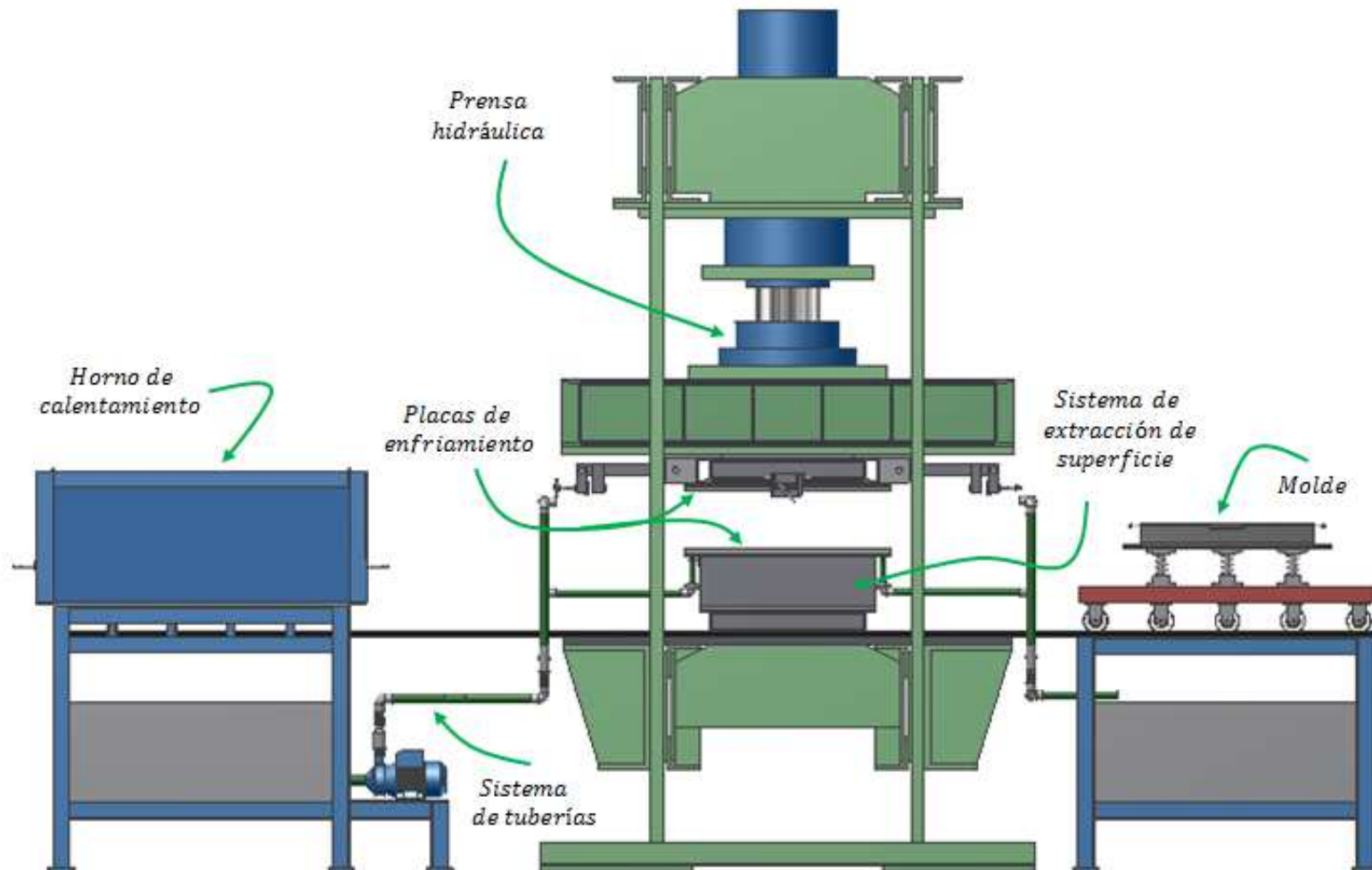


Figura 4.5. Vista frontal del modelo CAD del equipo de moldeo.



#### 4.4 COSTOS Y METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN

Este acápite se divide en dos partes. En la primera de ellas se analizan los costos de fabricación de los moldes. Mientras que en la segunda parte se analiza el costo de los materiales requeridos para la elaboración del material compuesto.

##### 4.4.1 Costos de fabricación de los moldes

Los costos de fabricación incluyen los costos de los materiales requeridos y de operación (manufactura) de cada componente.

##### Costos de materiales

**Tabla 4.2:** Costos de materiales de los moldes

Item	Descripción	Costo unitario (S/.)	Cantidad	Costo total (S/.)
1	Placa Alumold 528x420x60	1751	1	1751
2	Placa Alumold 528x420x32	934	1	934
3	Placa Alumold 340x210x10	94	1	94
4	Placa Alumold 447x420x60	1483	1	1483
5	Placa Alumold 447x420x30	741	1	741
6	Placa Alumold 260x210x10	72	1	72
7	Placa Alumold 420x256x60	849	1	849
8	Placa Alumold 420x256x30	425	1	425
9	Placa Alumold 230x80x10	24	1	24
10	Barra calibrada Acero Plata Ø9x2 m	62	1	62
11	Placa AISI 1045 100x40x16	42	6	253
12	Barra AISI 1045 Ø10x230	2	6	15
			<b>TOTAL</b>	<b>S/. 6,703</b>

##### Costos de manufactura

Ahora, es necesario determinar el proceso de mecanizado para cada componente y el tiempo requerido para su fabricación. Con esos datos y costo de operación de cada máquina-herramienta podemos establecer los costos por este concepto.

**Tabla 4.3:** Costos de manufactura de los moldes

Item	Descripción	Cant.	Proceso de fabricación	Tiempo de fabricación (horas)	Costo por hora (S/.)	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
1	Plato inferior tablero	1	MECANIZADO CNC	30	75	2250	2250
2	Plato superior tablero	1	MECANIZADO CNC	12	75	900	900
3	Placa extracción tablero	1	MECANIZADO CNC	4	75	300	300
4	Plato inferior asiento	1	MECANIZADO CNC	26	75	1950	1950
5	Plato superior asiento	1	MECANIZADO CNC	24	75	1800	1800
6	Placa extracción asiento	1	MECANIZADO CNC	6	75	450	450
7	Plato inferior respaldo	1	MECANIZADO CNC	28	75	2100	2100
8	Plato superior respaldo	1	MECANIZADO CNC	24	75	1800	1800
9	Placa extracción respaldo	1	MECANIZADO CNC	4	75	300	300
10	Pin guía	12	TORNEADO	2	20	40	480
11	Soporte elevación	6	TORNEADO CNC	4	60	240	1440
12	Dispositivo de sujeción	6	TORNEADO	1	20	20	120
						<b>TOTAL</b>	<b>S/.13,890</b>

Finalmente, se muestran los costos totales de la fabricación de los moldes.

**Tabla 4.4:** Costos totales de fabricación

Descripción	Costo total (S/.)
Costos de materiales	6,703
Costos de manufactura	13,890
<b>TOTAL</b>	<b>S/. 20,683</b>

Para un cambio de 2.8 nuevos soles por dólar americano a setiembre de 2014, el costo total en dólares es \$ 7,386.

#### 4.4.2 Costos de materia prima

Las partes de la carpeta se realizarán con el material compuesto Qauchu Kullu, el cual está formado por partículas de madera capirona y polipropileno. Previamente, se determinó que las cantidades relativas serían de 40% y 60% respectivamente, considerando un tamaño de partícula de capirona de 1,9 mm (malla MR3).

Bajo esas condiciones, podemos determinar el costo de cada material según la pieza que será moldeada.

**Tabla 4.5:** Cantidad de materia prima requerida para el moldeo

Superficie	Volumen total (m <sup>3</sup> )	Volumen Cap. (m <sup>3</sup> )	Volumen PP (m <sup>3</sup> )	Cantidad Cap. (kg)	Cantidad PP (kg)
Tablero	0,00243	0,00097	0,0015	0,51	1,31
Asiento	0,00219	0,00088	0,0013	0,46	1,18
Respaldo	0,00116	0,00046	0,0007	0,24	0,63

**Tabla 4.6:** Costo de materia de prima

Superficie	Cantidad Cap. (kg)	Costo unitario cap. (S./kg)	Cantidad PP (kg)	Costo unitario PP (S./kg)	Costo total (S./.)
Tablero	0,51	0,5	1,31	2,9	4,1
Asiento	0,46	0,5	1,18	2,9	3,7
Respaldo	0,24	0,5	0,63	2,9	1,9

Según los resultados obtenidos, podemos decir que la utilización de materiales reciclados es una alternativa viable, económica y de mayor rentabilidad para el moldeo de las carpetas ergonómicas, en comparación con la fabricación tradicional con madera o plástico.

## CONCLUSIONES

- Se ha modificado el proceso de moldeo por compresión convencional para polímeros, estableciendo las estaciones de carga, calentamiento y enfriamiento bajo presión del material compuesto de plástico y madera; cuya implementación permitirá trabajar en paralelo las tres superficies de la carpeta (tablero, asiento y respaldo), con el objetivo de facilitar el diseño del molde y, a la vez, ahorrar tiempo y energía, con la consecuente reducción de costos de operación.
- Se ha diseñado un molde para cada una de las superficies de la carpeta ergonómica: tablero, asiento y respaldo; los cuales pueden soportar una presión de moldeo equivalente a 7 MPa con un factor de seguridad de 2,5. Dichos moldes tienen las siguientes dimensiones generales: 528x420x70 mm (tablero), 447x420x70 mm (asiento) y 420x256x70 mm (respaldo). El material seleccionado para la fabricación de los moldes es una aleación de Al, Cu y Mg, denominada comercialmente como *“Alumold”*, la cual permite obtener moldes de bajo peso y facilita la transferencia de calor durante los procesos de calentamiento y enfriamiento.
- Las paredes de los moldes han sido diseñadas con el objetivo de lograr que las dimensiones de las superficies moldeadas no sobrepasen los límites de tolerancia establecidos (2 mm para el largo o ancho y 1 mm para el espesor). Para ello, se ha considerado el efecto de la presión del compuesto y la dilatación del molde por incremento de la temperatura. Con esto, se garantiza que las mencionadas superficies podrán ser ensambladas en los bastidores metálicos de la estructura de las carpetas.
- De acuerdo al diseño térmico elaborado, se ha establecido que el calentamiento del molde se realizará en un horno de resistencias eléctricas de las siguientes características: 450°C de temperatura de trabajo, 6 kW de potencia requerida total y un volumen mínimo de 900x670x360 mm de la cámara interna del horno. Con los parámetros antes mencionados se estima que el tiempo total del proceso de calentamiento será de 30-40 minutos aproximadamente para el caso crítico, que es el molde del tablero conteniendo el material compuesto.

- El enfriamiento del molde es por contacto directo con dos placas de aluminio, que cuentan con 20 canales de 10 mm de diámetro hidráulico para la circulación de agua de refrigeración. Este sistema tiene la capacidad de reducir la temperatura del molde del tablero (caso crítico) desde 200°C hasta 65°C en un tiempo aproximado de 15 minutos, lo cual garantiza la obtención de una superficie rígida y uniforme. El flujo de agua necesario para cumplir con ese objetivo es de 10 l/m.
- El costo total de fabricación de los tres moldes se estima en S/. 20,683.00 nuevos soles, el cual está dividido en S/. 6,703.00 para la compra de materiales y S/. 13,890 para los costos de manufactura que incluyen el costo de la mano de obra, el costo de máquina-herramienta y los gastos generales de taller.
- Los moldes de las superficies de carpetas ergonómicas fueron diseñados para moldear un material compuesto de *polipropileno* reciclado y madera *capirona* recuperada. Sin embargo, estos moldes también pueden ser utilizados para otros materiales cuya temperatura de moldeo sea menor que 200°C.

## BIBLIOGRAFÍA

[**Askeland 1998**] Askeland, Donald (1998). Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thomson editores. México DF. México.

[**Barrantes 2011**] Barrantes, Enrique (2011). Separatas de transferencia de calor. PUCP. Lima. Perú.

[**Beer 2010**] Beer, Ferdinand (2010). Mecánica de materiales. Editorial McGraw-Hill. Quinta edición. México DF. México.

[**Bohler 2012**] Aceros Bohler del Perú (2012). Lima. Perú. [Fecha de consulta: 20 de octubre de 2012]. Disponible en: <http://www.bohlerperu.com/>.

[**Brydson 1999**] Brydson, J.A. (1999). Plastics Materials. Editorial Butterworth-Heinemann. Séptima Edición. Massachusetts. Estados Unidos.

[**Callister 2007**] Callister, William (2007). Ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial John Wiley & Sons. Séptima edición. Nueva York. Estados Unidos.

[**Clemons 2002**] Clemons, Craig (2002). Wood Plastic Composites in the US. Forest products journal. Vol 52. N°6. Madison. Estados Unidos.

[**Groover 2007**] Groover, Mikell (2007). Fundamentos de manufactura moderna. Editorial John Wiley & Sons. Tercera edición. Nueva York. Estados Unidos.

[**Holman 2010**] Holman, J.P. (2010). Transferencia de calor. Décima edición. Editorial McGraw-Hill. Nueva York. Estados Unidos.

[**Karassik 1983**] Karassik, Igor J (1983). Manual de bombas: Diseño, aplicación y mantenimiento. Editorial McGraw-Hill. México DF. México.

[**Lucana 2008**] Lucana, Dante (2008). Diseño de un molde para la fabricación de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica. PUCP. Lima. Perú.

**[Panero 1996]** Panero, Julius (1996). Las dimensiones humanas en los espacios interiores. Editorial Gustavo Gili. Barcelona. España.

**[Sierra 2012]** Smith, Sierra (2012). Estudio de materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzos de partículas de madera obtenidos a partir de polipropileno reciclado y capirona recuperada. PUCP. Lima. Perú.

**[SME 1998]** Society of manufacturing engineers (1998). Tool and manufacturing engineers handbook knowledge base. Michigan. Estados Unidos.

**[Smith 2006]** Smith, Paul (2006). Opportunities for WPC in residential and industrial applications. Forest products journal. Vol 56. N°3. Madison. Estados Unidos.

**[Sors 1967]** Sors, Laszlo (1967). Plastic mould engineering. Editorial Akademiai Kiado. Budapest. Bulgaria.

**[Timoshenko 1987]** Timoshenko, Stephen (1987). Teoría de placas y láminas. Bilbao, España.

**[Vidosic 1957]** Vidosic, J.P. (1957). Machine Design Projects. Ronald Press. Nueva York. Estados Unidos.

**[Wolcott 2002]** Wolcott, Michael (2002). A technology review of Wood Plastic Composites. Washington state university. Washington. Estados Unidos.