

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ PLÁSTICA Y REFUERZOS DE FIBRAS NATURALES MEDIANTE COMPRESIÓN TÉRMICA

Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico

Presentada por:

DANTE ITALO LUCANA MASIAS

Mayo 2008

Lima - Perú

RESUMEN

El presente trabajo expone la necesidad ambiental de reciclar, recuperar y re-utilizar los residuos sólidos que se generan actualmente en las ciudades e industrias del país; para ello, el objetivo de este trabajo es el diseño de un molde capaz de fabricar, por medio de compresión térmica, probetas de ensayo conformadas por un material compuesto de matriz plástica y refuerzos celulósicos que pueda ser compatible con la gran variedad de residuos plásticos reciclados y desechos de la industria maderera, para así obtener tableros y paneles que sean utilizados en la construcción de viviendas, muebles y accesorios ecológicos de bajo costo. Asimismo, se ha establecido que las probetas estén compuestas por una matriz plástica y refuerzos celulósicos, principalmente; PET y desechos madereros, respectivamente.

El diseño se ha basado en los requerimientos que establece la norma internacional ASTM 1037 - 06a *“Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials”*.

El procedimiento metodológico adoptado para este trabajo ha sido, en primer lugar, el análisis individual de las propiedades mecánicas y físicas de los elementos constituyentes de la probeta y su comportamiento bajo las condiciones de procesamiento. Seguidamente, se elaboró una comparación cuantitativa de posibles alternativas de diseño para obtener la mejor posibilidad tecnológica; a continuación, mediante un análisis mecánico y térmico del molde y demás accesorios necesarios, se ha diseñado el equipo de moldeo: tanto planos de despiece y fabricación, como los costos involucrados en materiales y manufactura.

Finalmente, el trabajo concluye que es posible diseñar un molde capaz de cumplir con las especificaciones de fabricación de probetas de madera compuesta, en lo referente a dimensiones y tolerancias, según la norma internacional ASTM D 1037 – 06a. Asimismo, los refuerzos de madera no se degrada instantáneamente a altas temperaturas, sino que existe un período de tiempo que posibilita conservar, de forma parcial, las propiedades mecánicas y físicas de aquellas, durante del proceso de fabricación de la probeta.

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

TÍTULO : **DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ PLÁSTICA Y REFUERZOS DE FIBRAS NATURALES MEDIANTE COMPRESIÓN TÉRMICA**

ÁREA : Materiales

PROPUESTO POR : Dr. Ing. Julio Acosta Sulcahuamán.

ASESOR : Dr. Ing. Julio Acosta Sulcahuamán.

TESISTA : Dante Italo Lucana Masias

CÓDIGO : 20020569

FECHA : 25 de Febrero del 2008

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Los residuos sólidos plásticos y los residuos de las industrias madereras de transformación secundaria forman parte de los residuos sólidos urbanos que sin reciclar o reutilizar generan un grave problema ambiental y que, consecuentemente, afectan a la salud y a las condiciones de vida de las personas. Por ello, se hace imprescindible la necesidad de desarrollar una tecnología adecuada con métodos y procedimientos adecuados para fabricar materiales compuestos reciclados a partir de estos desechos.

Desde este contexto, el objetivo del presente trabajo es el diseño de un molde para la fabricación de probetas de ensayo por compresión térmica de un material compuesto de matriz plástica y refuerzos celulósicos que pueda ser compatible con la gran variedad de residuos sólidos municipales plásticos reciclados y con los residuos de la industria maderera, para así obtener tableros y paneles que sean utilizados para la fabricación de viviendas, muebles y accesorios ecológicos y de bajo costo.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ PLÁSTICA Y REFUERZOS DE FIBRAS NATURALES MEDIANTE COMPRESIÓN TÉRMICA

Introducción

1. Fundamentos teóricos
2. Determinación del proyecto óptimo
3. Diseño del molde
4. Planos y costos de fabricación

Planos

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

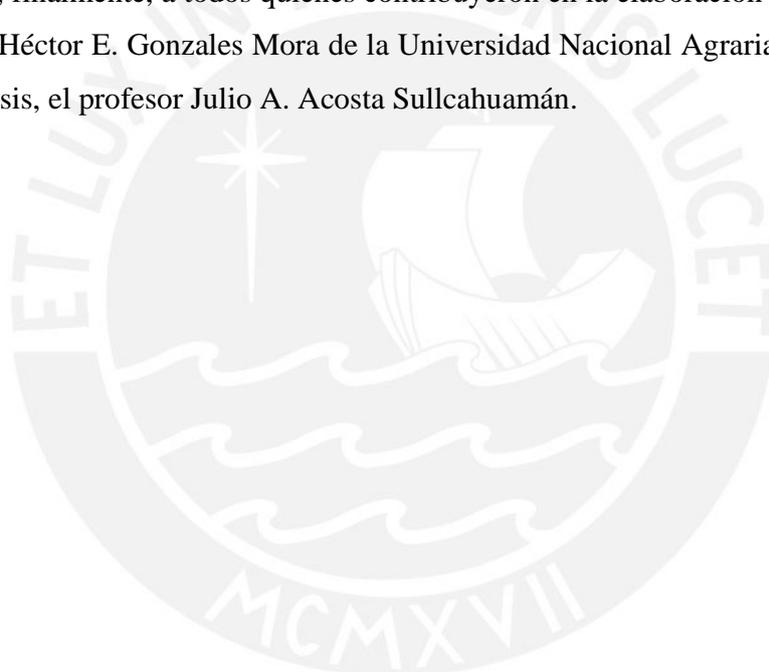
Dr. Ing. Julio A. Acosta Sullcahuamán
Asesor



Este trabajo está dedicado a todos mis hermanos pobres del país, de tal manera, que los logros y resultados obtenidos contribuyan a mejorar sus condiciones de vida actuales.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por la vida y el haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera profesional; en segundo lugar, a mis padres por su apoyo y motivación constante y, finalmente, a todos quienes contribuyeron en la elaboración directa del trabajo: al profesor Héctor E. Gonzales Mora de la Universidad Nacional Agraria La Molina y a mi asesor de tesis, el profesor Julio A. Acosta Sullcahuamán.



INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	i
APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
INDICE DE TABLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
1.1 El producto.....	3
1.2 Materiales compuestos.....	4
1.3 Compuestos de matriz plástica y refuerzos naturales	5
1.3.1 Matrices plásticas.....	6
1.3.1.1 Clasificación.....	6
1.3.1.2 Propiedades térmicas.....	10
1.3.2 Fibras naturales de origen vegetal.....	12
1.3.2.1 La madera.....	14
1.3.2.2 La celulosa	14
1.3.2.3 Propiedades y características de la celulosa.....	16
1.3.2.4 Reacciones degradantes de la celulosa.....	17
1.3.3 La interfase.....	20
1.4 Recuperación y reciclado de residuos sólidos.....	22
1.5 Proceso de fabricación mediante moldeo por compresión.....	25
2. DETERMINACIÓN DEL PROYECTO ÓPTIMO	27
2.1 Planteamiento de la necesidad	27
2.1.1 Lista de exigencias y/o deseos	27
2.1.2 Estructura de funciones.....	31
2.2 Datos de entrada.....	33
2.3 Alternativas de solución.....	33
2.3.1 Moldes.....	34

2.3.1.1	Clasificación según el manejo durante el ciclo de moldeo	34
2.3.1.2	Clasificación según el diseño del conjunto macho/hembra	37
2.3.2	Evaluación del sistema de aplicación de fuerza.....	41
2.3.3	Evaluación del sistema de calentamiento.....	43
2.3.4	Evaluación del sistema de enfriamiento.....	47
2.4	Proyecto óptimo y bosquejo del equipo.....	47
3.	DISEÑO DEL MOLDE	50
3.1	Diseño del molde para compresión térmica.....	50
3.1.1	Deformación permisible del molde.....	51
3.1.2	Comportamiento del molde bajo la acción de una carga centrada.....	52
3.1.2.1	Análisis de la deflexión de los platos superior y inferior.....	53
3.1.2.2	Análisis de la deflexión de las paredes laterales	54
3.1.3	Deflexión por efecto de la presión	56
3.1.4	Dilatación por efecto de la temperatura	61
3.1.4.1	Dilatación superficial de los platos superior e inferior	62
3.1.4.2	Dilatación del espesor de los platos superior e inferior	63
3.1.5	Cálculo de resistencia mecánica del molde.....	64
3.2	Diseño de las plataformas de calentamiento	67
3.2.1	Plataforma de calentamiento rígida.....	67
3.2.2	Calentamiento de las plataformas	69
3.2.2.1	Resistencias eléctricas.....	70
3.3	Diseño de las plataformas de enfriamiento	70
3.3.1	Dimensionamiento de los canales internos de las plataformas	72
3.3.2	Análisis de las variables del proceso de transferencia de calor	74
3.3.2.1	Geometría del molde y de las plataformas de enfriamiento.....	75
3.3.2.2	Mecanismos de transferencia de calor más relevantes.....	77
3.3.3	Modelo matemático global de transferencia de calor	79
3.3.4	Análisis tiempo de enfriamiento	84
3.3.5	Caída de presión del agua de enfriamiento	86
4.	PLANOS Y COSTOS DE FABRICACIÓN	91
4.1	Listado de planos	91
4.2	Costos de fabricación	92
	CONCLUSIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA	97

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1: Propiedades principales del material de moldeo PET	8
Tabla 1.2: Entalpía de procesamiento de algunos polímeros	9
Tabla 1.3: Composición y dimensiones de algunas fibras naturales	13
Tabla 1.4: Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales	17
Tabla 2.1: Variables de operación para la fabricación de probetas	33
Tabla 2.2: Evaluación técnico-económica de moldes según su manejo.....	37
Tabla 2.3: Evaluación técnico-económica de moldes según su diseño.....	41
Tabla 2.4: Características de operación de los sistemas de fuerza.....	42
Tabla 2.5: Evaluación técnico-económica de los tipos de prensa.....	42
Tabla 2.6: Evaluación técnico-económica de los tipos de calentamiento.....	45
Tabla 2.7: Matriz morfológica del molde	48
Tabla 3.1: Precisión de probetas según la norma ASTM 1037 – 06a.....	52
Tabla 3.2: Deflexiones producidas para varios espesores del molde.....	60
Tabla 3.3: Valores de α para varias relaciones de a/b	69
Tabla 3.4: Análisis del tiempo de enfriamiento vs. Caudal de agua.....	85
Tabla 3.5: Longitudes equivalentes para cada tramo del sistema	88
Tabla 3.6: Altura manométrica para cada tramo de tubería	90
Tabla 4.1: Listado de planos del equipo	92
Tabla 4.2: Costo de materiales del equipo por sistema.....	93
Tabla 4.3: Costo de manufactura totales	94
Tabla 4.4: Resumen de gastos totales.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS

a	: Longitud característica de la plataforma [mm]
a_0	: Longitud inicial [mm]
A	: Área [mm ²]
A_{efect}	: Área efectiva de transferencia [mm ²]
A_L	: Área lisa [m ²]
A_E	: Área con espesor constante [m ²]
b_{canal}	: Ancho del canal de enfriamiento [mm]
B	: Ancho de plataforma de enfriamiento [mm]
c_p	: Calor específico [J/kg.°C]
C	: Constante de pérdidas en las tuberías.
D	: Diámetro de La tubería [m]
D_h	: Diámetro hidráulico [mm]
e	: Espesor de la plataforma [mm]
e_{PET}	: Energía para la fusión del PET por unidad de volumen [J/cm ³]
E	: Módulo de Elasticidad [N/mm ²]
E_{fus}	: Energía de fusión del PET [J]
f	: Factor de fricción de Darcy-Weisbach
F_T	: Fuerza total ejercida por la prensa [N]
FS	: Factor de seguridad
g	: Aceleración de la gravedad [m/s ²]
Gr	: Número adimensional de Grashof
h_W	: Pérdidas de presión [m.c.a.]
H_{man}	: Altura manométrica [m]
I	: Momento de inercia [mm ⁴]
k	: Coeficiente de conductividad térmica [W/m.°C]
L	: Longitud [mm]
L_P	: Longitud media de la pared [mm]
M	: Momento flector [N.mm]
n	: Número de canales de enfriamiento
p	: presión [m.c.a.]
Pr	: Número adimensional de Prandtl
Q	: Calor transferido por el molde [W]
Q_a	: Caudal de agua [m ³ /s]
R_a	: Reacción en el punto A [N]
R	: Resistencia térmica equivalente [°C/W]
Re	: Número adimensional de Reynolds
R_t	: Índice de rugosidad [μm]
t	: Ancho de soportes internos [mm]
t_{enf}	: Tiempo de enfriamiento del molde [s]
T	: Temperatura [°C]
T_g	: Temperatura de transición vítrea [°C]
T_m	: Temperatura de fusión [°C]
ν	: Viscosidad cinemática [m ² /s]
V	: Volumen [m ³]
V_a	: Velocidad del agua de enfriamiento [m/s]
w	: Carga lineal [N.m]
Z	: Punto de entrega de agua [m]

α	: Coeficiente de expansión lineal del Alumold [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
$\alpha_{\text{conv_forz}}$: Coeficiente de convección forzada [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$]
$\alpha_{\text{conv_nat}}$: Coeficiente de convección natural [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$]
δ	: Deflexión [mm]
δ_{CALOR}	: Dilatación producida por el incremento de la temperatura [mm]
ρ	: Densidad [kg/m^3]
μ	: Viscosidad dinámica [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]
σ	: Esfuerzo [N/mm^2]
Δa	: Dilatación térmica lineal [mm]
ΔT	: Diferencia de temperaturas [$^{\circ}\text{C}$]
Δy	: Espesor de material en el proceso de conductividad [μm]



INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 50 años, el Perú ha experimentado un proceso de cambios masivos políticos, culturales y sociales que están intrínsecamente relacionados con el desarrollo y evolución de la economía nacional a través de la industria. En este contexto, el país se ha visto inmerso en un crecimiento acelerado de la población en las ciudades, en especial Lima; en consecuencia, se ha generado un importante aumento del consumo de productos naturales e industriales, los que han traído consigo un incremento abismal y descontrolado de los desechos sólidos que se generan en las urbes diariamente.

Los residuos plásticos y los de las industrias madereras de transformación secundaria forman parte de los residuos sólidos urbanos que se generan en casas, comercios, industrias y áreas públicas a nivel mundial. En la actualidad, su inadecuado manejo constituye uno de los problemas ambientales que afectan a la gran mayoría de los países del mundo, por la cantidad de recursos económicos y tecnológicos que es necesario invertir para su evacuación hacia lugares apropiados.

A nivel mundial, el desarrollo de una tecnología adecuada para elaborar materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzos de fibras celulósicas ha tenido más de medio siglo de investigación. Los intentos para elaborar procesos y métodos de reutilización y reciclado de los desechos plásticos y madereros han concluido en la obtención de nuevos materiales compuestos, los cuales se comercializan en el mercado internacional a un alto costo debido al valor agregado que se da, principalmente, en su fabricación, transporte y

distribución. Hasta antes de los últimos diez años, en el Perú se ha presentado un desinterés en la investigación, elaboración de métodos y desarrollo de una tecnología adecuada para el reciclaje; por ello, el mercado peruano se ve en la necesidad de importar productos a un alto costo que no están al alcance de la mayoría de peruanos que se dedican a la elaboración artesanal y micro-industrial de accesorios domésticos, tableros y muebles.

Dentro de este marco, este trabajo pretende continuar y contribuir a la investigación iniciada en la PUCP sobre la fabricación de materiales compuestos reciclados a partir de desechos urbanos; para ello se quiere desarrollar una tecnología alternativa de bajo costo para la producción de planchas y tableros que posean buenas propiedades, es decir, que sean ligeros, resistentes a la acción de agentes atmosféricos, químicamente inertes, moldeables de manera rápida y precisa y, además, que posean un alto grado de versatilidad; en síntesis, se pretende que posean una amplia gama de características que pueden ser adaptables a los requerimientos en diferentes aplicaciones y usos comerciales.

Por lo planteado anteriormente, el objetivo de este trabajo es el diseño de un molde para la fabricación de probetas de ensayo por compresión térmica de un material compuesto de matriz plástica y refuerzos celulósicos que pueda ser compatible con la gran variedad de residuos plásticos reciclados y desechos de la industria maderera, para así obtener tableros y paneles que sean utilizados para la fabricación de viviendas, muebles y accesorios ecológicos de bajo costo.

El trabajo estará estructurado de la siguiente forma: El primer capítulo presentará las principales propiedades de las matrices plásticas y fibras naturales. El segundo capítulo expondrá los criterios y parámetros de diseño más importantes y mostrará el bosquejo óptimo del molde. El tercer capítulo comprenderá el análisis mecánico y térmico del molde y demás accesorios, en función a los materiales de procesamiento. El cuarto capítulo listará los planos obtenidos y detallará los costos necesarios de fabricación. Finalmente, este trabajo se dará por terminado con la exposición de las principales conclusiones a las que se han llegado.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 EL PRODUCTO

En las últimas décadas, el continuo desarrollo del sector construcción ha tenido un avance tecnológico importante en Sudamérica. Este avance va acompañado con el desarrollo y la aplicación de nuevos sistemas y productos constructivos llamados “prefabricados”, los cuales a su vez han generado productos alternativos en búsqueda de la máxima productividad.

Hacia fines de los años 70 en Norteamérica se desarrolla un tablero de láminas de madera alternativo para la construcción de edificaciones, principalmente viviendas, con sistemas modulares livianos de estructuras del mismo origen. Actualmente, este tipo de tablero es llamado panel estructural debido a las características de resistencia que le otorga su composición por capas entretrejidas o superpuestas, se ofrece en el mercado internacional bajo diversas presentaciones y características, todas ellas apuntan a su buen desempeño en diversas aplicaciones en la industria de la construcción, y no deja de ser una variante muy productiva en la aplicación para la industria del mueble [ACI, 2004].

De la base actual de patentes se recoge una gran diversidad de esfuerzos hechos en el estudio de materiales compuestos de madera y plástico. Al respecto, cabe mencionar el trabajo de Takada y Takayoshi [Takada, et al., 1988], quienes desarrollaron un tablero compuesto principalmente de fibras de madera, fibras

termoplásticas y resinas termoestables que son sometidas a calor y presión en un molde con forma definida; también se han desarrollado paneles de baja densidad mezclando aserrín y resinas, que con la aplicación de presión y calor se logra que la resina cure y el panel se consolide.

El diseño y la potencial fabricación del molde pretenden producir tableros compuestos por una matriz termoplástica y fibras naturales de madera, los cuales deben de poseer características geométricas adecuadas que permitan realizar el estudio y análisis de sus propiedades físicas y mecánicas, según los estándares que establecen las normas para este tipo de tableros.

1.2 MATERIALES COMPUESTOS

El desarrollo tecnológico de los materiales compuestos responde a la necesidad de mejorar y optimizar el empleo de los materiales tradicionales y, además, lograr una reducción de su peso y costo. Los materiales compuestos se fabrican con la aportación de dos o más materiales simples, al conjunto se le denomina material multifase. En este material destacan una o más propiedades características de las fases constituyentes, de tal forma que las propiedades del conjunto resulten las mejores posibles. Se caracterizan principalmente los compuestos reforzados con fibras y los compuestos cargados con partículas, figura 1.1.

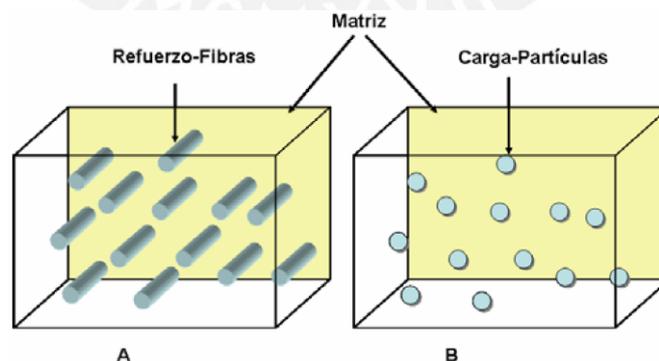


Figura 1.1. Materiales compuestos reforzados A) con fibras y B) con partículas.

Frecuentemente, el material compuesto está formado por dos fases: la matriz que es continua y que rodea a la otra fase que se denomina dispersa. Las propiedades

resultantes dependen de las proporciones de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de la fase dispersa¹ [Callister, 2003].

Las fibras de refuerzo o fase dispersa en una matriz polimérica tienen como objeto soportar, tanto como sea posible, el esfuerzo aplicado al conjunto; mientras que a la matriz polimérica le corresponde transmitir de forma efectiva las solicitaciones al esfuerzo. En la figura 1.2 se observa la comparación de las propiedades mecánicas de algunos compuestos.

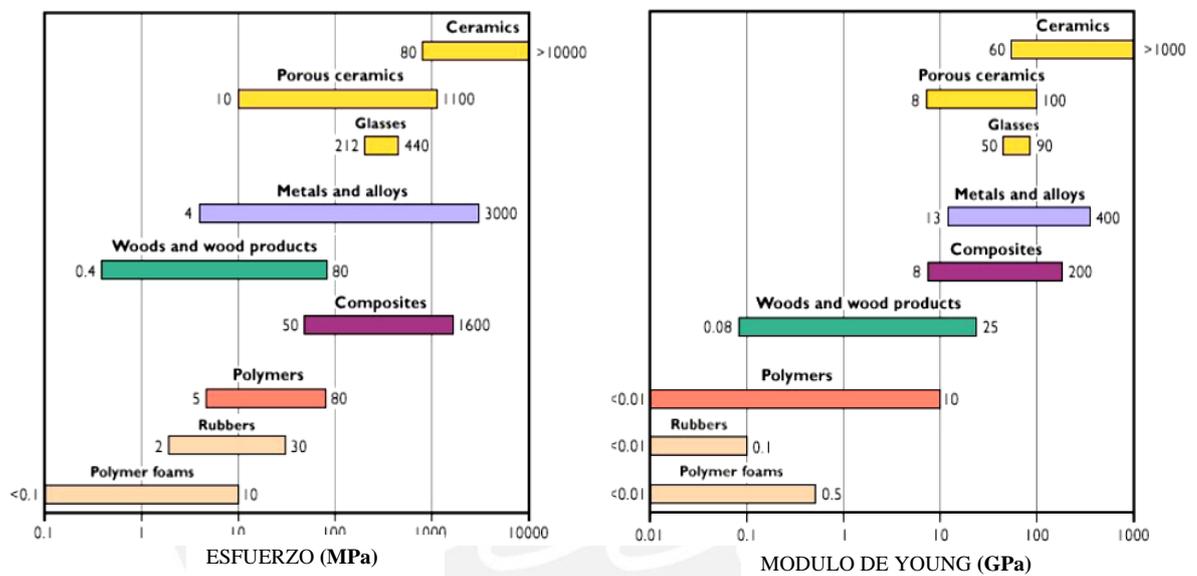


Figura 1.2. Comparación de la resistencia a la tracción y módulo de Young de distintos materiales [University of Cambridge, 2007].

1.3 COMPUESTOS DE MATRIZ PLÁSTICA Y REFUERZOS NATURALES

Un polímero reforzado con fibra natural es un material compuesto conformado por una matriz de plástica y fibras naturales de alta resistencia. El empleo de estos componentes se debe, principalmente, a la necesidad actual de reciclar los residuos sólidos plásticos y, además, a la asequible y económica forma de obtenerlos.

¹ **Geometría de la fase dispersa** significa características de la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas [Callister, Jr. 2003].

1.3.1 MATRICES PLÁSTICAS

La matriz plástica de la probeta, en primer lugar, une las fibras y actúa como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados; es decir, solo una pequeña fracción del esfuerzo total aplicado es resistida por la matriz. Por ello, en su gran mayoría, la matriz debe ser dúctil y; por otro lado, el módulo elástico de la fibra debe ser mayor. En segundo lugar, la matriz protege a las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de las reacciones químicas con el medio ambiente. Estas interacciones podrían ocasionar defectos en las fibras naturales capaces de originar grietas que podrían traer como consecuencia el colapso, sólo con esfuerzos de tracción relativamente bajos.

Finalmente, la matriz plástica separa las fibras y, en virtud de su relativa blandura y plasticidad, ésta impide la propagación de grietas de una fibra a otra, que originaría fallas catastróficas; en otras palabras, la matriz actúa como una barrera que evita la propagación de grietas. Aunque algunas fibras individuales se rompan, la rotura total del material compuesto no ocurrirá hasta que se hayan roto gran número de fibras adyacentes [Callister, 2003].

Los plásticos más fabricados son el polietilén-tereftalato (PET), el polietileno en sus diversas variantes (alta y baja densidad, copolímeros, etc.), el polipropileno, el policloruro de vinilo y materiales relacionados, el poliestireno, los derivados acrílicos, los cauchos, las poliamidas y poliésteres. Este tipo de productos pueden ser reciclados, fundidos y utilizados como fase matriz; la eficiencia de cada uno de ellos como matriz del compuesto será analizada en investigaciones posteriores.

1.3.1.1 CLASIFICACIÓN

Según su comportamiento a altas temperaturas y a la estructura que forman sus cadenas macromoleculares, los polímeros pueden ser clasificados en tres grupos: materiales termoplásticos, termoestables y elastómeros. La figura 1.3 muestra las estructuras de las cadenas poliméricas de estos tres tipos de polímeros.

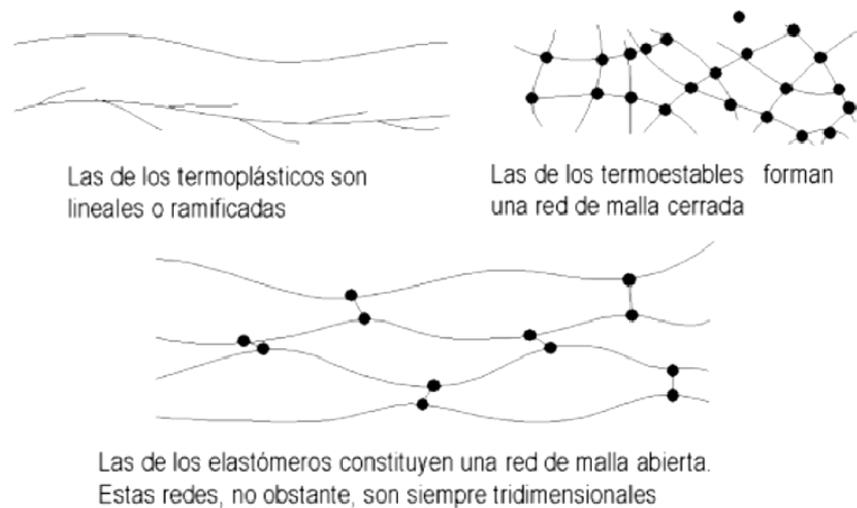


Figura 1.3. Diferencias entre las estructuras de los polímeros termoplásticos, termoestables y elastómeros [Curso de Inyección de plásticos, 2006].

A continuación, sólo se describen las características de los polímeros termoplásticos y termoestables debido a que éstos conforman un gran porcentaje de la contaminación ambiental por plásticos.

- **TERMOPLÁSTICOS**

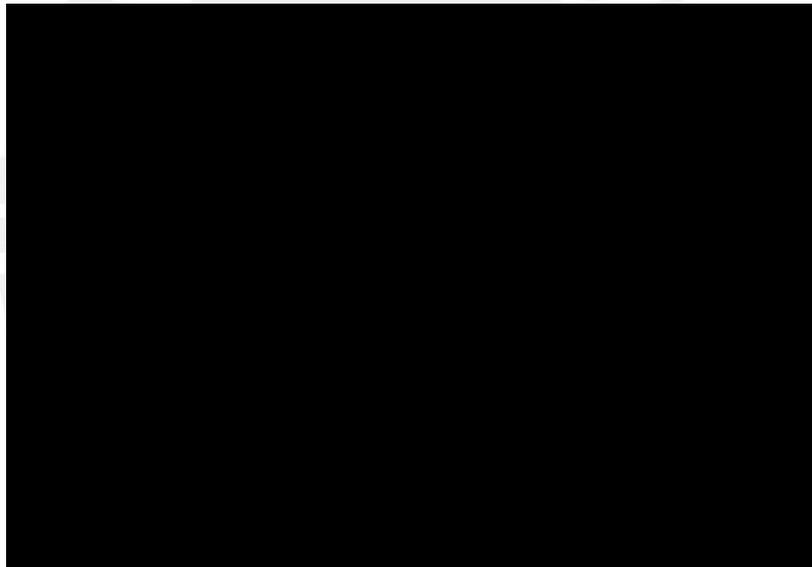
En muchas de las reacciones de polimerización, las unidades estructurales se colocan en forma de una cadena totalmente lineal. Tal es el caso de polímeros como el polietileno, el polipropileno, el policloruro de vinilo o el poliestireno. Los polímeros de estas características topológicas son materiales termoplásticos, esto es, reblandecen o funden por acción del calor, lo que permite darles forma mediante moldes, forma que posteriormente se estabiliza al enfriarlos, fabricando así multitud de objetos útiles [Areizaga, et al., 2002].

Los polímeros termoplásticos son reciclados físicamente, para ello, generalmente son recolectados, lavados y molidos. Una vez molidos se les calienta para ser fundidos, tras sobrepasar la más alta de sus transiciones térmicas, y darles la forma que se desea para su nueva aplicación. Este proceso es relativamente sencillo, pero no puede aplicarse a todos los plásticos ni realizarse numerosas veces, ya que los plásticos reciclados son de menor calidad que un material nuevo o material virgen.

Cada vez que el material es reciclado, éste sufre un proceso de degradación con lo cual disminuyen sus propiedades [Nakamatsu, et al., 2002].

El trabajo pretende utilizar el termoplástico PET, polietilén-tereftalato, el cual es una resina poliéster de glicol etilénico y ácido tereftálico y está clasificado como polímero termoplástico semicristalino. Las propiedades físicas y mecánicas del PET, tabla 1.1, y su capacidad para satisfacer varias especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material ha alcanzado un alto desarrollo en la fabricación de fibras textiles y en la producción de una gran variedad de envases, especialmente en la fabricación de botellas, bandejas, flejes y láminas [Cervantes, et al., 2006].

Tabla 1.1. Propiedades principales del material de moldeo PET [ASTM, 2006].



La razón principal por la que se ha escogido al PET como elemento para la matriz es porque éste es un plástico de uso muy difundido en el país y es utilizado en la fabricación de botellas para gaseosas y alimentos, debido a que se le considera no reactivo y no tóxico; su abundancia y fácil forma de obtención lo llevan a ser un elemento idóneo para ser utilizado como matriz de la probeta. Por otro lado, el diseño de un equipo de moldeo capaz de fundir el PET, al alcanzar su alta temperatura de fusión, permite trabajar con otros termoplásticos muy usados, tales como: Polietileno de baja densidad LDPE (200°C), Polietileno de alta densidad HDPE (260°C), Polipropileno (170°C) y Policloruro de vinilo (170°C).

Para el diseño del molde, en la tabla 1.2 se muestra la entalpía necesaria para llevar a los polímeros desde una temperatura de 20°C hasta sus temperaturas de procesamiento o temperaturas de fusión.

Tabla 1.2. Entalpía de procesamiento de algunos polímeros [J. A. Brydson,1995].

Polymer	Melt temperature (°C)	Mould temperature (°C)	Specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Heat required to melt		Heat removed on cooling	
				J/g	J/cm ³	J/g	J/cm ³
PEP	350	220	1600	528	240	240	109
Polyethersulphone	360	150	1150	391	285	242	177
Polyether ether ketone	370	165	1340	469	361	275	212
Polyethylene terephthalate (crystalline)	275	135	2180	556	403	305	221
Polystyrene	200	20	1720	310	295	310	295
Polyacetal	205	90	3000	555	394	345	245
Polycarbonate	300	90	1750	490	408	368	307
ABS	240	60	2050	451	434	369	355
Polymethyl methacrylate	260	60	1900	456	386	380	322
Polyphenylene sulphide	320	135	2080	624	446	385	275
PPO (Noryl-type)	280	80	2120	551	520	434	409
Polysulphone	360	100	1675	570	459	436	351
Polyethylene terephthalate (amorphous)	265	20	1970	483	360	483	360
Nylon 11/12	260	60	2440	586	568	488	474
LDPE	200	20	2780	500	543	500	543
Nylon 6	250	80	3060 *	703	623	520	460
Nylon 66	280	80	3075	800	701	615	539
Polypropylene	260	20	2790	670	736	670	736
HDPE	260	20	3375	810	843	810	843

- **TERMOESTABLES**

Un termoestable incluye uno o dos componentes que, en las condiciones de uso, son susceptibles de sufrir un proceso químico conocido como curado, en el que se genera una nueva estructura de carácter tridimensional que hace que el producto presente una alta resistencia térmica, rigidez, estabilidad dimensional, resistencia a disolventes, etc., que no tenía el compuesto de partida. Esas reacciones de reticulación hacen también que el producto curado no sea susceptible de utilización posterior mediante reprocesado [Areizaga et al., 2002].

Se propone, para una etapa posterior de investigación a este trabajo, el uso del monómero bis-hiroxietilen-tereftalato (BHET), el cual proviene del reciclaje del PET, para la obtención de una resina termoestable como elemento para la matriz en la fabricación de probetas. Para obtener esta resina termoestable es necesario el empleo del reciclaje químico, el cual ha sido poco utilizado para reciclar plásticos. A diferencia del reciclaje físico, el reciclaje químico sí involucra cambios en la estructura química del material.

El uso del BHET como constituyente de la matriz es una alternativa importante para la fabricación de probetas, ya que actualmente, el costo del reciclaje químico apunta a reducirse.

1.3.1.2 PROPIEDADES TÉRMICAS

Los termoplásticos en estado sólido pueden representarse como amorfos y cristalinos. Estructuralmente, un sólido polimérico en estado amorfo puede verse como un conjunto de cadenas entremezcladas al azar, carentes de orden, mientras que un polímero en estado cristalino tiene las cadenas orientadas en direcciones preferentes o colocadas, en definitiva, ordenadas de alguna forma.

En los polímeros amorfos, el cambio más importante en las propiedades de los mismos ocurre en la denominada temperatura de transición vítrea T_g . Por debajo de esta temperatura los movimientos de los segmentos de la cadena están prácticamente

“congelados” mientras que, al llegar a dicha temperatura, comienzan los movimientos moleculares de largo alcance, es decir, de un número amplio de segmentos de cadena, lo que tiene una gran influencia en las propiedades del material y en sus aplicaciones. Por encima de esta región de temperaturas, el polímero es blando; éste se comporta como un líquido más o menos viscoso con propiedades elásticas semejantes a las de los cauchos, mientras que por debajo de ella el polímero es duro, rígido y quebradizo con propiedades análogas a los vidrios.

Por otro lado, al incrementar la temperatura y acercarse a la T_m , temperatura de fusión, y mayores, las cadenas poliméricas se deslizan y separan causando un flujo viscoso irreversible. El material se comporta como un líquido muy viscoso. Los cambios físicos que sufre el polímero por efecto de la temperatura se traducen, para efectos mecánicos, en una variación considerable del módulo de elasticidad E , figura 1.4.

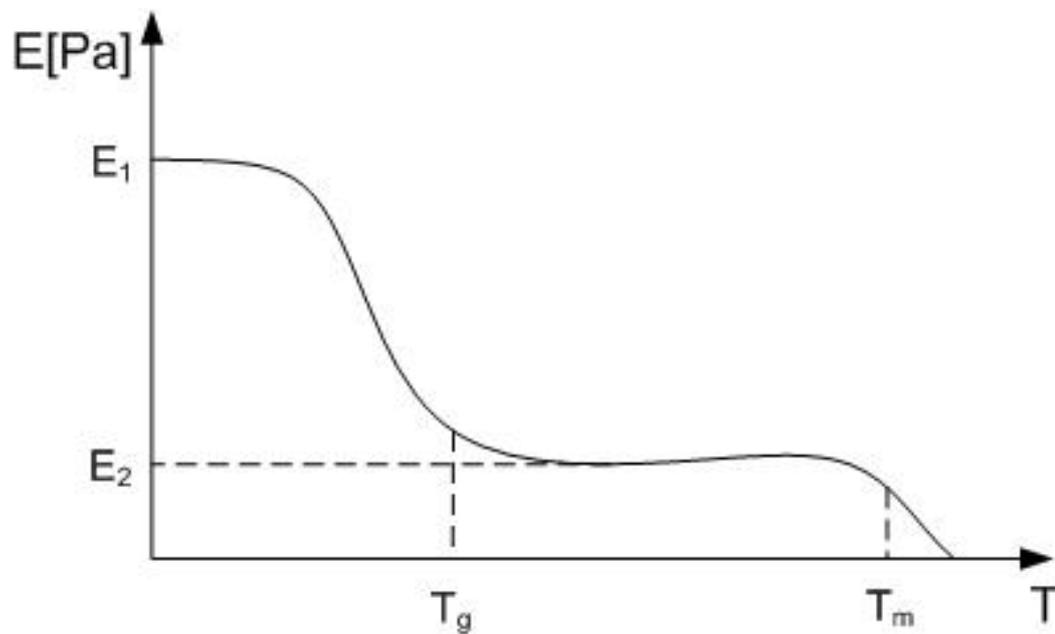


Figura 1.4. Relación entre el módulo elástico de los polímeros y la temperatura de calentamiento.

Debido a que la matriz de la probeta estará compuesta por el termoplástico PET es importante conocer tanto su T_g y T_m , ya que éstas condicionarán los parámetros de entrada de diseño del molde. Es así que, encontramos que el PET posee una T_g igual a 67°C y una T_m de a 265°C [J. A. Brydson, 1995].

1.3.2 FIBRAS NATURALES DE ORIGEN VEGETAL

Se denominan fibras naturales vegetales a un amplio rango de materiales fibrosos localizados en diferentes partes de las plantas, como por ejemplo, las fibras del tallo de cáñamo, las de las hojas de sisal y las de las semillas de algodón. Todas las plantas tienen como elemento constitutivo las fibras, las cuales son responsables de su estructura. Las dimensiones de cada fibra tienen diferentes variaciones según el tipo de plantas, éstas pueden poseer una forma alargada y una alta relación longitud/diámetro.

Actualmente, se conoce las características físicas, químicas y mecánicas de las fibras estudiadas por empresas madereras, ya que éstas son la materia prima de la industria papelera, y muchas de las referencias y teorías disponibles están basadas en estos patrones de fibras. En consecuencia, para efecto del análisis de las fibras de maderas peruanas, se asume que estos estudios pueden ser fuente de información para el análisis del comportamiento de éstas en la probeta compuesta.

Las fibras naturales, utilizadas como refuerzo, presentan ventajas comparativas con otros materiales (fibra de vidrio, acero, etc.) debido a su bajo costo, baja densidad, altos valores de resistencia a la tracción, buenas propiedades térmicas, fácil separación, biodegradabilidad, fácil reciclaje, no presentan fracturas en su procesamiento, no son abrasivas, se pueden encontrar en gran variedad y su utilización implica un bajo consumo de energía. Por otro lado, las desventajas como su capacidad de absorción de humedad, que puede resultar en un hinchamiento de las fibras, así como su baja adherencia pueden ser mejoradas con procedimientos físicos y químicos, como por ejemplo: secado, explosión de vapor, acetilado e impregnación [Aragón, 2004].

La pared de las fibras de madera está principalmente compuesta por tres tipos de polímeros: la celulosa, las hemicelulosas y la lignina. Estos tipos de polímeros se

diferencian en su composición y estructura, por lo tanto, presentan diferentes propiedades físicas. El contenido de estos polímeros varía considerablemente según los tipos de plantas. En la tabla 1.3 se presenta las composiciones y dimensiones de algunos tipos de fibra.

Tabla 1.3. Composición y dimensiones de algunas fibras naturales [Vallegos, 2006].

Fibra	Diámetro (μm)	Longitud (mm)	L/D	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Cañamo	5 - 55	10 - 51	1000	57 - 77	14 - 17	9 - 13
Lino	9 - 70	5 - 38	1750	-	-	-
Yute	2 - 5	10 - 25	100	-	-	-
Ramio	60 - 250	11 - 80	2400	-	-	-
Sisal	1 - 8	8 - 41	150	42 - 62	21 - 24	7 - 9
Algodón	10 - 40	12 - 38	900	85 - 96	1 - 3	0,7 - 1,6
Trigo	0,4 - 3,2	8 - 34	90	29 - 51	26 - 32	16 - 21
Madera:						
Coníferas	3,3	33	100	38 - 49	7 - 26	23 - 34
Fronosas	1,0	20	50			

1.3.2.1 LA MADERA

El Perú alberga una parte importante de las selvas tropicales del planeta; sólo los bosques húmedos tropicales de la región selvática colocan al país en el segundo lugar de Ibero América y en el séptimo lugar del mundo en cuanto a extensión forestal. Además, los bosques peruanos contienen una impresionante población arbórea que supera las 2.500 especies, con medias de más de 200 por hectárea, así como la mayor diversidad genérica existente en el planeta, como lo atestiguan los bosques Yanamono y Mishana (Loreto), con 300 y 289 especies de árboles por hectárea, respectivamente. En el país existen más de 2.500 especies forestales, de las cuales alrededor de 250 han sido estudiadas para fines industriales. El comercio nacional de maderas se limita a apenas 120 especies maderables, de las cuales sólo 20 han sido debidamente estudiadas e identificadas, por lo que un elevado porcentaje de las maderas que se comercian ingresan al mercado como maderas corrientes o robles. Entre las especies que tienen valor comercial a escala industrial, así como una mayor demanda, destacan la Caoba, el Cedro, el Tornillo, el Ishpingo, la Catahua, la Copaiba, la Cumul, la Bolaina, la Capirona y la Moena como maderas de múltiples usos [CIDEIBER, 1999].

La madera es un compuesto conformado por diferentes células biológicas y sus paredes celulares están constituidas por arreglos complejos de fibras de celulosa. Estas fibras reforzadas con una matriz de polímeros tales como la lignina y otros compuestos orgánicos, además de cantidades variables de cristales inorgánicos, le otorgan dureza. [Flinn, et al., 1994].

A continuación se describen las características físicas de la celulosa y su conducta bajo la influencia de altas temperaturas y presiones, sollicitaciones a las que estará sometida dentro del molde.

1.3.2.2 LA CELULOSA

En 1838, Anselme Payen sugirió que las paredes celulares de un gran número de plantas estaban constituidas de la misma sustancia, a la cual le dio el nombre de celulosa. La celulosa es la sustancia orgánica más abundante y el principal componente de las plantas leñosas y componente esencial de las fibras naturales. Las

fibrillas de celulosa son un constituyente esencial de los tejidos vegetales, cuya función es dar sostén y resistencia a los mismos, figura 1.5.

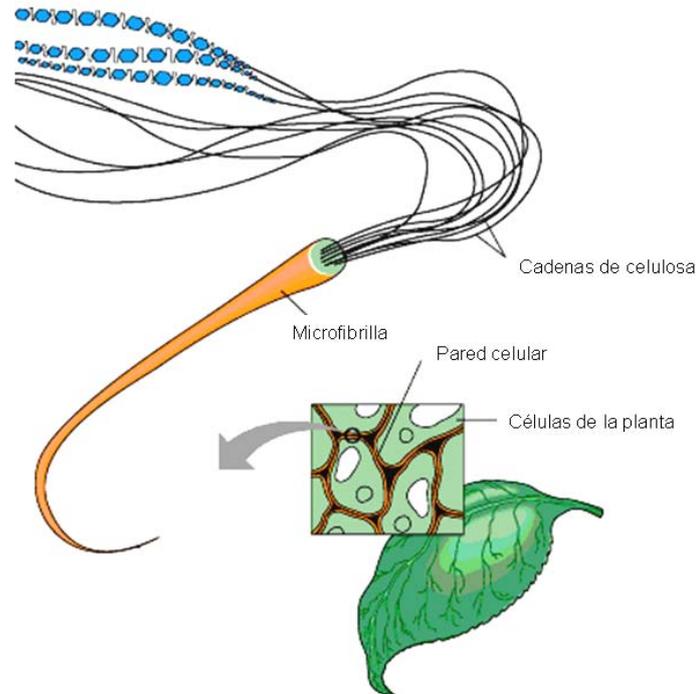


Figura 1.5. Microfibrillas de celulosa en las paredes celulares de las plantas [Sancho, 2007].

La molécula de celulosa forma enlaces de hidrógenos intra e intermoleculares. Estos enlaces tienen una gran importancia en lo que respecta a la morfología, rigidez, orientación, resistencia y reactividad de las cadenas celulósicas. La celulosa sólida forma una estructura microcristalina, con una estructura compuesta por parte cristalina y parte amorfa [López, 2004].

Estas unidades contienen en su estructura tres hidroxilos de alcohol (-OH) que forman uniones de hidrógeno dentro de la misma macromolécula (intramolecular), entre otras macromoléculas de celulosa (intermolecular) y con los grupos hidroxilos provenientes del aire, figura 1.6. Por este motivo, todas las fibras de origen vegetal son de naturaleza hidrófila, alcanzando un contenido de humedad del 8 al 12,6 % [Flink, et al., 1994].

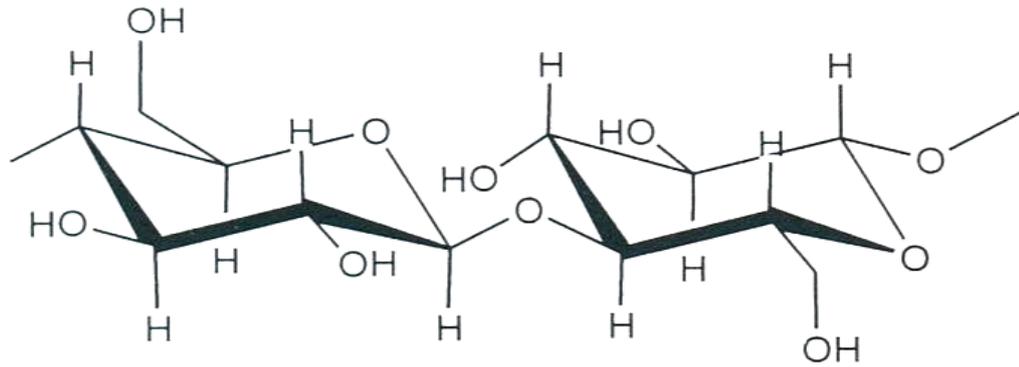


Figura 1.6. Estructura de la celulosa [Pastor, 2004].

La lignina ocupa los espacios existentes entre las cadenas de celulosa. Es un polímero estructural en el que a diferencia de la celulosa tiene enlaces covalentes adicionales entre las unidades monoméricas. Sus propiedades mecánicas son menores que las de la celulosa. El contenido de lignina en la fibras afecta a su estructura, morfología y propiedades [López, 2004].

1.3.2.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA CELULOSA

La estructura molecular de la celulosa es responsable de su estructura macromolecular y determina las propiedades químicas y físicas de la fibra. Las fibras naturales pueden ser consideradas en sí mismas como materiales compuestos reforzados por microfibrillas rígidas y resistentes de celulosa dentro de una matriz viscoelástica formada por un complejo hemicelulosa/lignina. Considerando las energías de enlace entre los átomos en la estructura molecular de la celulosa, el módulo de Young y la resistencia a tracción de la celulosa cristalina se ha estimado en el orden de 60-120 GPa y 12-19 GPa, respectivamente [Vallegos, 2006].

Las propiedades mecánicas de las fibras dependen del tipo de celulosa, debido a que las celdas de cada tipo tienen su propia geometría y éstas condicionan sus propiedades mecánicas [Fuentes, 2006]. Las características estructurales contribuyen a que tales resistencias no puedan ser alcanzadas en la práctica, entre las cuales destacan: el grado de cristalinidad de la celulosa, el ángulo microfibrilar y el contenido de la celulosa. En la tabla 1.4 se comparan las propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales [Vallegos, 2006].

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a rotura (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación a rotura (%)	Módulo específico
Cañamo	1,48	600 - 1100	32 - 70	1,6	47
Lino	1,54	344 - 1035	27 - 80	2,7 - 3,2	43 - 57
Sisal	1,45	510 - 850	9 - 38	2,0 - 2,5	9 - 29
Yute	1,3 - 1,5	393 - 1000	10 - 59	1,5 - 1,8	7 - 38
Algodón	1,5 - 1,6	287 - 597	5,5 - 12,6	7,0 - 8,0	-
Ramio	1,5	400 - 398	24 - 128	3,6 - 3,8	-
Coco	1,20 - 1,44	175	4 - 6	30,0	-
Conífera Kraft	1,5	1000	40	-	-
Bagazo	1,25	290	17	-	-
Bambú	1,50	575	27	3,0	-
Banana	1,35	500	12	5,9	-
Fibra de vidrio tipo E	2,5	2000 - 3500	70 - 73	2,5	28 - 29

1.3.2.4 REACCIONES DEGRADANTES DE LA CELULOSA

El hecho de que la celulosa se degrade en una variedad de circunstancias es importante desde varios puntos de vista. Durante la fabricación de las probetas compuestas, la degradación de la celulosa, las hemicelulosas y la lignina debe mantenerse al mínimo para conservar las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales.

La degradación de la celulosa puede ser de distintos tipos:

- Hidrolítica
- Oxidante
- Alcalina
- Térmica
- Microbiológica
- Mecánica

Debido a las condiciones de temperatura y presión elevada a las que estará afectado el molde, sólo se analiza la degradación térmica y la degradación mecánica, siendo la primera la más determinante. Es indispensable establecer los parámetros y condiciones límites en cada una de ellas, de tal manera, que las propiedades de la celulosa no se vean deterioradas.

La **degradación térmica** de la celulosa pasa por dos tipos de reacciones: primero, una degradación gradual, descomposición y tostado al calentamiento a baja temperatura; y segundo, una rápida volatilización acompañada por la formación de levoglucosana y una variedad de productos orgánicos con calentamiento a altas temperaturas. A temperaturas más bajas, desde la ambiental hasta 220°C, existe una despreciable degradación térmica y envejecimiento normal de la celulosa, el que resulta acelerado por el calentamiento. Según varios investigadores, cuando el papel de trapo, cuya resistencia depende de la calidad de la celulosa que contiene, se calienta a 38°C durante casi seis meses, el envejecimiento acelerado se traduce en una pérdida de 19% de la resistencia al plegado. Otros investigadores calentaron algodón crudo durante 4 a 24 horas a temperatura de 75 a 220°C en aire y nitrógeno y observaron una pérdida de resistencia menor a la anterior debido a una velocidad mayor de la temperatura. [James, 1990].

Por otro lado, la pirólisis rápida de la celulosa ocurre a temperaturas por encima de los 250°C y da levoglucosana y productos termolísicos, entre ellos varias cantidades de carbón, alquitrán y productos volátiles, sin embargo, en particular se ha encontrado que las fibras de madera tienen una temperatura de carbonización de aproximadamente 275°C [Ronden, et al., 1999]. En vista que la T_m del PET es 265°C y la temperatura de carbonización de la madera es 275°C, se propone que la temperatura máxima a la cual llegue la probeta compuesta sea 270°C.

Tal como muestran los resultados de las investigaciones realizadas, la velocidad de degradación de la madera es directamente proporcional a la temperatura a la cual se encuentra y al tiempo de permanencia en ésta, principalmente. Sin embargo, no existe información específica de la magnitud de degradación para el rango de temperaturas críticas desde 220°C a 275°C, por ello se plantea que la celulosa debe permanecer el menor tiempo posible a estas temperaturas para garantizar una pérdida mínima de propiedades; la eficacia de este proceso se obtendrá en base a los materiales y métodos de calentamiento y enfriamiento que existen en la actualidad.

Con lo desarrollado anteriormente, podemos elaborar algunas tendencias y relaciones entre las variables de temperatura de calentamiento, tiempo de permanencia a elevadas temperaturas y temperaturas críticas para la celulosa, figura 1.7 y figura 1.8. Tales tendencias, podrán ser analizadas mediante pruebas posteriores a las probetas a diferentes temperaturas y tiempo de permanencia.

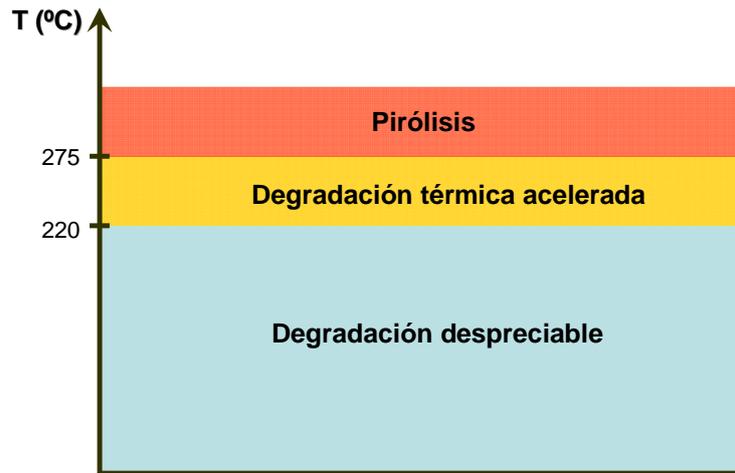


Figura 1.7. Temperaturas críticas de la celulosa.

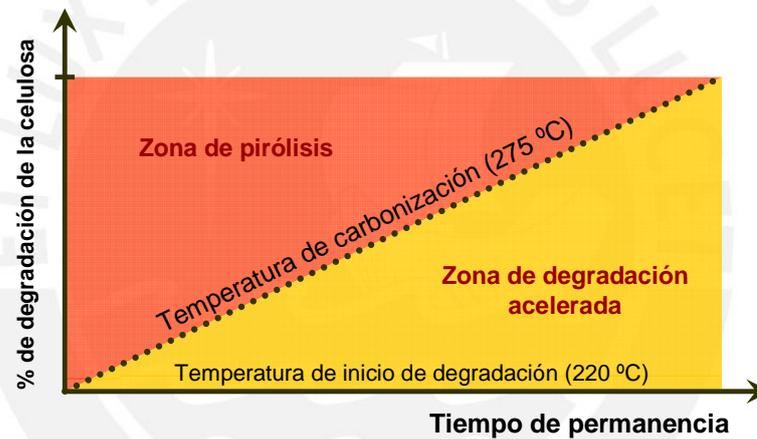


Figura 1.8. Porcentaje de degradación de la celulosa respecto al tiempo de permanencia a temperaturas críticas.

Así mismo, encontrar los máximos tiempos de permanencia, según el tipo de fibra de madera, para los cuales la celulosa no presente un nivel de degradación elevado, tal que, pierda sus propiedades de resistencia mecánica, compete a una etapa posterior de investigación.

Luego del calentamiento a alta temperatura para fundir el PET, se pretende enfriar la probeta hasta una temperatura en la cual madera vuelva a un estado de condiciones iniciales de rigidez, pues al elevar la temperatura también se incrementa la plasticidad de ésta debido al comportamiento termoplástico de la lignina. Se ha demostrado que la lignina seca en la madera no se reblandece a temperaturas inferiores de 125°C, no

obstante, puede entrar agua en la estructura de la lignina y plastificarse. A temperaturas superiores a los 75°C la lignina húmeda comienza a reblandecerse [Conrad, 1964]; por ello, para los efectos de la preservación de las propiedades mecánicas de la fibra y un estado de rigidez elevado de la madera, la probeta se enfriará por debajo de los 75°C.

Por otro lado, la **degradación mecánica** de la celulosa se genera en la etapa procesamiento: astillado; la calidad de la celulosa y, consecuentemente, la calidad de la fibra puede afectarse mucho a causa del proceso de astillado de la madera debido a las presiones que se ejercen sobre ésta. Existen diferentes tipos de astilladotes comerciales que trabajan con presiones desde los 689 kPa hasta 1720 kPa aplicados sobre la madera por muelas giratorias; es así que el trabajo de las fibras a una presión no superior a 1720 kPa garantiza la conservación de las propiedades mecánicas de las fibras de manera apreciable [James, 1990].

1.3.3 LA INTERFASE

Un concepto fundamental a la hora de plantearse el empleo de las fibras naturales como refuerzo de un material polimérico es la compatibilidad existente entre estos dos materiales. Esta compatibilidad normalmente se caracteriza por tener un cierto grado de incompatibilidad, ya que las fibras tienen un marcado carácter hidrofílico, mientras que los polímeros lo tienen de carácter antagonista como hidrófobo. [López, 2004].

Esta situación hace que una parte importante de las investigaciones de los materiales compuestos se centre en cómo mejorar esta compatibilidad por la vía de modificar el carácter hidrofílico de las fibras para lograr la mejor unión fibras-matriz en su zona de interfase ya que si queremos aprovechar la gran resistencia y la rigidez de las fibras, éstas deben estar fuertemente unidas a la matriz.

La adhesión entre las fibras de refuerzo y la matriz polimérica puede ser atribuida a una serie de mecanismos que se pueden dar en la interfase, como fenómenos aislados o por interacción entre ellos. El rasgo más importante de la interfase es la adhesión del material de la matriz al refuerzo; en ausencia de esta adhesión las fibras serán arrancadas de la matriz sin romperse, lo que anula el efecto del refuerzo.

Debido a las características físicas de los termoplástico y la fibra de madera, se espera que el mecanismo de adhesión mecánica de la interfase sea el predominante. La interacción se producirá únicamente por la interpenetración mecánica de dos superficies; el termoplástico, una vez líquido, moja cada detalle de la superficie de la fibra. La resistencia a la tracción de esta interfase probablemente no será alta a menos que haya un gran número de entrantes y salientes en la superficie de la fibra, es decir, ésta dependerá del grado de rugosidad de la superficie, tal y como se muestra en la figura 1.9.

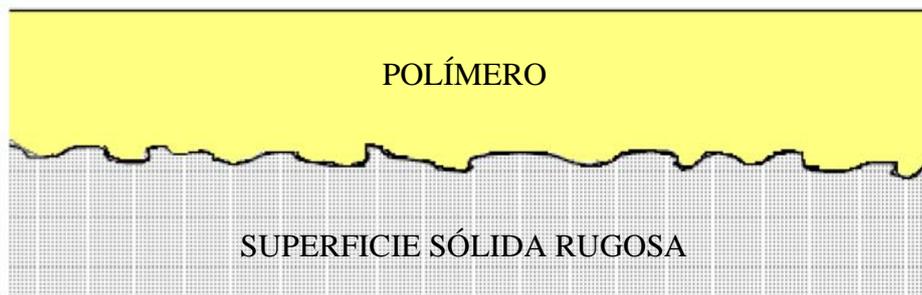


Figura 1.9. Unión mecánica formada cuando un polímero líquido moja una superficie sólida rugosa [Vallegos, 2006].

Desde la década de los 70 se han considerado diferentes posibilidades para el uso de materiales lignocelulósicos residuales de diferentes procedencias para la fabricación de tableros. Una técnica es la de realizar un pretratamiento termomecánico en el que se hidrolizan una buena parte de las hemicelulosas y se plastifica la lignina. Esta técnica tiene su origen en el proceso de pulpeo propuesto por Mason, el cual dio origen a la llamada pulpa Masonite que se utiliza para fabricar tableros por vía húmeda, de forma similar a la fabricación del papel [Velásquez, 2002]. Otra alternativa para mejorar la interfase es la impregnación de las fibras de refuerzo con matrices poliméricas compatibles [Nevell, et al., 1985]. El quitosano puede ser empleado como polímero de impregnación, pues éste presenta una excelente adhesión a diferentes tipos de superficie, una buena elasticidad y una gran resistencia al agua [Pastor, 2004].

Durante la etapa de elaboración y evaluación de los tableros es fundamental encontrar la mejor alternativa que brinde una adhesión compatible entre la matriz y la fibra. Un tratamiento adecuado de la fibra, así como los aditivos que mejoren las características

de la interfase, conllevará a obtener buenas propiedades mecánicas del producto final.

1.4 RECUPERACIÓN Y RECICLADO DE RESIDUOS SÓLIDOS

En el Perú, la composición de los residuos presenta la preponderancia de la materia orgánica putrescible con 54,5% en peso, mientras que los materiales altamente reciclables como el papel, cartón, maderas, plásticos, metales, textiles, cueros y cauchos representan el 20,3% y el resto de materiales no reciclables constituyen el 25,2% en peso [CONAM, 2005].

En las zonas de tala y corte, principalmente en las regiones selváticas, se estima que durante el proceso de elaboración de la madera se genera una cantidad de residuos madereros superior al 30%. Entre estos: aserrín de 5-8% y corteza de 10-14% [Alvarez, 2005]. La acumulación de los residuos en los aserraderos puede llegar a obstaculizar el desarrollo del proceso productivo, por lo que es necesario que sean evacuados a su debido tiempo. Generalmente, éstos se envían a los vertederos o se queman, pero antes permanecen en grandes pilas en las instalaciones industriales o cercanas a ellas. El destino que se les da a los diferentes residuos madereros no es el más racional; algunas entidades generadoras de estos residuos las venden o regalan a otras empresas que les dan diferentes usos y en muchas ocasiones se envían a los vertederos o se incineran indiscriminadamente.

Para el proceso de fabricación de las probetas, se plantea la recuperación de las mermas madereras (aserrín, despuntes, nudos y corteza), de las especies mencionadas en la sección 1.3.2.1, que se generan en el proceso productivo y su utilización como refuerzos dentro de la matriz polimérica. Es así, que para obtener un resultado eficiente como fibras de refuerzo es necesaria la clasificación, selección y acondicionamiento posterior de estos residuos, a fin lograr una adherencia óptima entre matriz y fibra.

En la figura 1.10 se presenta el diagrama de flujo del proceso de obtención y astillado de la madera.

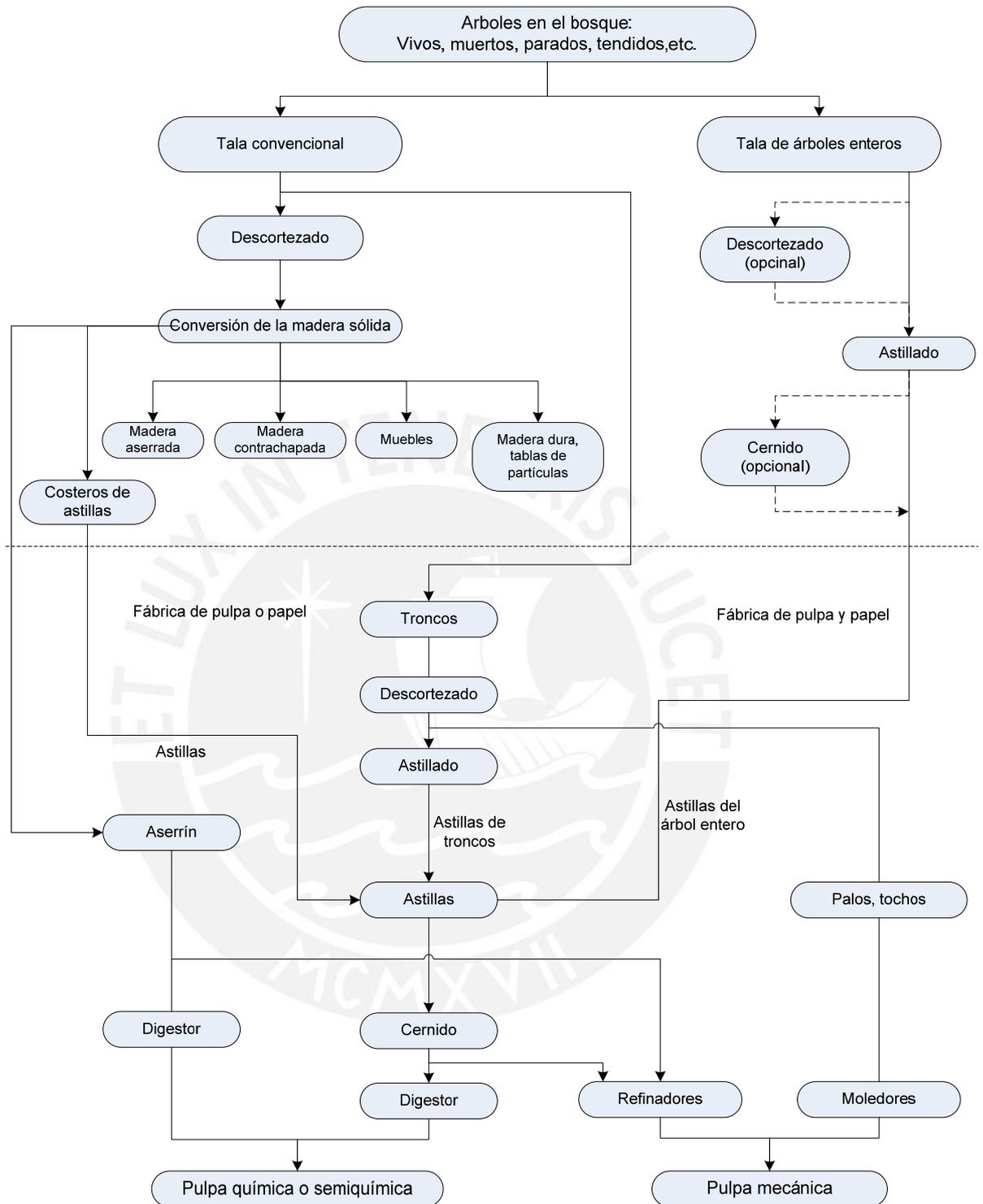


Figura 1.10. Diagrama de obtención de la fibra para las máquinas de pulpa [James, 1990].

Por otro lado, existen una gran cantidad de polímeros termoplásticos que son reciclados físicamente, para ello, generalmente son recolectados, lavados y molidos. Los termoplásticos más fabricados son el PET, el polietileno, el polipropileno, el

policloruro de vinilo y materiales relacionados, el poliestireno, los derivados acrílicos y los cauchos. A pesar de ser considerados no tóxicos, potencialmente representan un peligro si no son desechados de manera adecuada; además de ocupar espacio en los rellenos municipales, si son incinerados pueden producir sustancias sumamente tóxicas, como por ejemplo, dioxinas.

En el caso del PET, los recipientes que se producen son 100% reciclables. Para dar origen a un nuevo producto, los recipientes usados deben de ser coleccionados y enviados a fabricas, las cuales los transforman en hojuelas de PET como material base para productos reciclados. En la figura 1.11 se puede ver el ciclo de vida de un recipiente compuesto a base de PET.



Figura 1.11. Ciclo de vida del PET [APREPET, 2007].

Para su acondicionamiento, con el propósito de integrarlo nuevamente a un ciclo productivo como materia prima, es necesario un reproceso de reciclado mecánico. Se plantea la utilización de hojuelas seleccionadas de PET, provenientes principalmente de embases para gaseosas y otras bebidas (botellas plásticas) como materia prima para la matriz de las probetas; la forma, tamaño y porcentaje de participación en el material compuesto serán determinados posteriormente por otras investigaciones.

1.5 PROCESO DE FABRICACIÓN MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESIÓN

En la actualidad, los mecanismos de moldeo más utilizados para el procesamiento de termoplásticos son los sistemas por compresión, transferencia e inyección, figura 1.12.

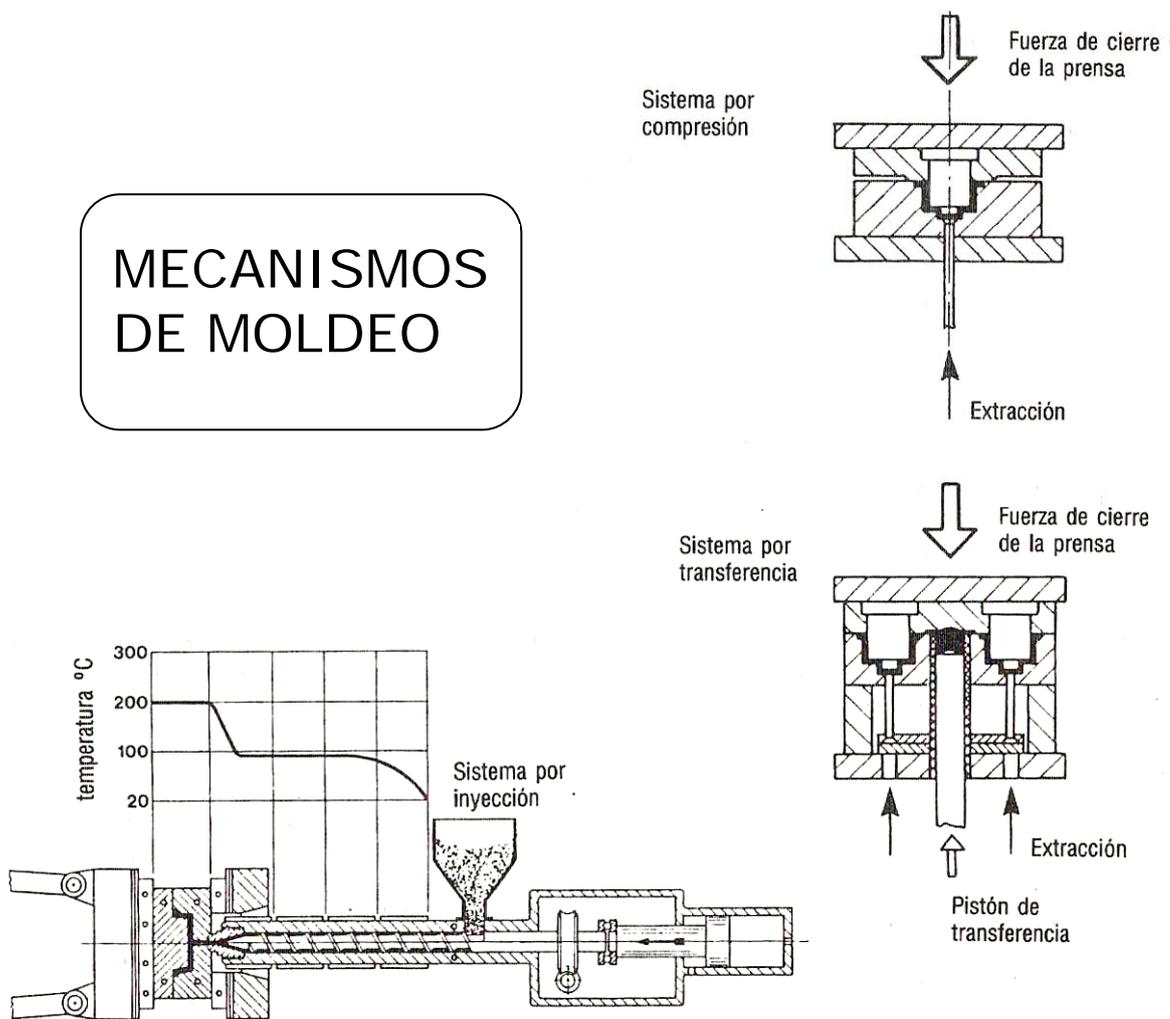


Figura 1.12. Esquema de los sistemas por compresión, transferencia e inyección para la fabricación de termofijos y termoplásticos [Bodini, et al., 1993].

Para la fabricación de las probetas se selecciona el moldeo por compresión, ya que este no modificaría ni dañará mecánica ni físicamente las fibras naturales; mientras que los otros dos mecanismos sí, debido a que la carga debe de ingresar al molde de manera forzada. En general, el proceso de moldeo por compresión es el siguiente:

- Se coloca en el molde una cantidad fija de compuesto de moldeo llamada *carga*.
- Se unen las mitades del molde para comprimir la carga y forzarla a tomar la forma de la cavidad.
- Se calienta la carga a través del molde para que funda el material y toma la forma interna del molde.
- Se enfría la carga a fin de conservar la geometría.
- Se abre el molde y se retira el polímero sólido.

La cantidad de polímero, temperatura y presión debe controlarse con toda precisión para obtener una consistencia uniforme en el producto moldeado. Se ha vuelto una práctica común precalentar la carga antes de colocarla en el molde; esto suaviza el polímero y acorta la duración del ciclo de producción. Los métodos de calentamiento incluyen calentadores infrarrojos, calentadores por convección en estufa y el uso de tornillos giratorios dentro de un cilindro calentado. Para efecto del proceso de fusión del PET, en la tabla 1.2 se recomienda precalentar el molde a una temperatura de 20°C, sin embargo, debido a que esta temperatura es una temperatura muy parecida a la ambiental, no será necesario incluir un sistema de precalentamiento en el equipo.

Las prensas de moldeo por compresión están orientadas verticalmente y contienen dos placas a las cuales se sujetan las mitades de molde. El proceso involucra dos tipos de actuación:

- Carrera ascendente de la placa de fondo.
- Carrera descendente de la placa superior, esta última es la configuración más común y económica, por lo que será utilizada en el equipo.

Finalmente, para el trabajo, los parámetros de operación, presión y temperatura están establecidos por las características físicas de los materiales del compuesto. Sin embargo, la particularidad de la velocidad de degradación de la madera (debido al tiempo de permanencia a una alta temperatura), demanda la exigencia de un sistema de enfriamiento acelerado para la probeta.

CAPÍTULO 2

DETERMINACIÓN DEL PROYECTO ÓPTIMO

2.1 PLANTEAMIENTO DE LA NECESIDAD

El objetivo del trabajo consiste en el diseño de un molde que, por medio de compresión térmica, fabrique probetas de un material compuesto por plástico y madera, con diferentes cantidades de composición y parámetros de fabricación; y, de esta manera, poder someterlas a distintos ensayos mecánicos, físicos y químicos que brinden información acerca de sus propiedades más resaltantes. En primer lugar, se elabora una lista de exigencias (E) y/o deseos (D) que deben de ser cumplidos.

2.1.1 LISTA DE EXIGENCIAS Y/O DESEOS

En base a la necesidad mencionada anteriormente se presenta la siguiente lista de exigencias y/o deseos E/D.

CARACTERÍSTICAS DE PRODUCCIÓN

- E El molde deberá calentarse hasta una temperatura máxima de 270°C. Esta temperatura debe mantenerse durante el proceso de fusión del PET.
- E El tiempo de permanencia a 270°C y el tiempo de enfriamiento del molde hasta

los 75°C deben ser lo más cortos posible, a fin de reducir la degradación de la madera.

- E El equipo deberá tener la capacidad de fabricar probetas rectangulares de 25x152x305mm, para satisfacer con las dimensiones requeridas para los ensayos mecánicos, físicos y químicos según la norma ASTM D 1037 – 06a.
- E El equipo deberá fabricar probetas que cumplan con las exigencias de tolerancia según la norma ASTM D 1037 – 06a.
- D El equipo debe permitir preparar una mezcla de los componentes de la probeta lo más homogénea posible antes de ser calentados.
- D El equipo debe requerir el menor número de operarios posibles durante el proceso de fabricación.

GEOMETRÍA

- E La geometría del equipo debe permitir una fácil admisión y expulsión de los componentes primarios de fabricación y la probeta, respectivamente.
- E La expulsión de la probeta debe ser sencilla, en caso de presentarse problemas de adhesión entre el material plástico y las paredes del molde.
- E Todos los componentes deben acomodarse de tal manera que su configuración se acomode dentro de una prensa estándar, según la capacidad de la misma.
- E El equipo debe garantizar la no contaminación de la probeta, debido al ingreso de agentes o cuerpos externos durante su proceso de fabricación. Por ello, es necesaria la hermeticidad del molde.

FABRICACIÓN

- E Las máquinas y herramientas necesarias para la fabricación deben de estar disponibles en la ciudad de Lima, Perú.
- D El equipo debe poder ser fabricado por partes, en lo posible, en el taller mecánico de la PUCP.

MATERIALES

- E Los materiales de cada componente del equipo serán seleccionados teniendo en cuenta lo siguiente:
- El no deterioro a causa de las velocidades de calentamiento y enfriamiento aceleradas del proceso.
 - Propiedades mecánicas adecuadas.
 - Facilidad de adquisición en el mercado peruano.
 - Costos.
 - Fácil mantenimiento.
- E Los materiales que entren en contacto con la probeta deben ser tales que eviten la adhesión de ésta.

SEGURIDAD

- E El equipo debe ofrecer seguridad contra posibles accidentes. A este efecto se deben evitar formas con salientes o aristas y mecanismos que sin la debida protección representen algún peligro a los operarios que la estén usando o transiten por la zona.
- E Toda regulación del equipo, si las tiene, deberá quedar bien asegurada en la posición que se deje.
- E Deberá haber avisos de peligro e indicaciones de precaución en las zonas donde hubiere tensión eléctrica o partes y elementos, que por su incorrecto empleo, pudieran representar peligro alguno para los operarios.
- E Los elementos que se encuentren a una alta temperatura deberán poseer mangos o asas que faciliten su operación y maniobrabilidad.
- E El equipo deberá tener una base soporte lo suficientemente rígida y estable, de tal manera que quede bien asegurada en el lugar de operación.

ERGONOMÍA

- E El calentamiento y enfriamiento del molde será de manera semi-automática.
- D Las regulaciones del equipo se harán manualmente y deberán poder ser realizadas con el equipo en operación.
- E El equipo deberá poseer una fácil regulación de los parámetros de operación según el porcentaje de componentes de la probeta.

MANTENIMIENTO

- E El equipo deberá requerir un mínimo de mantenimiento.
- D El mantenimiento no debe implicar la programación de una parada durante el proceso de producción. Éste deberá ser realizado en los tiempos muertos que se presentan en la extracción y llenado del material de la probeta, el cual tendrá una duración máxima de 20 minutos.
- E Deberá haber un fácil acceso a las diferentes partes que requieran de mantenimiento.
- D Será necesario un solo operario para realizar las tareas de mantenimiento.
- E El equipo deberá poseer por lo menos un juego de repuestos indispensables, tales como, empaquetaduras, cables u otros que requieran de recambio continuo.

SEÑALES

- E El equipo deberá indicar, en una zona de fácil observación, las pautas que se deben de seguir para su correcto empleo.
- E Deberá haber avisos preventivos de seguridad (Ver SEGURIDAD).

NORMAS

- E Para efectos del cálculo, diseño y selección de componentes se deberán seguir las normas internacionales que rigen estos procedimientos.
- D De preferencia se seguirán las normas DIN.

MONTAJE

- E Debe tener un diseño que permita un fácil montaje y desmontaje.
- E Todos los elementos del equipo deberán ser colocados o retirados con el uso de herramientas comunes en un taller.

TRANSPORTE

- E El equipo debe desarmarse en partes fácilmente transportables para su traslado al lugar donde será empleado.

ENERGÍA

- E Se empleará energía eléctrica disponible en la sección de Mecánica de la PUCP, línea trifásica de 220V y 60 Hz.
- E El diseño energético debe permitir el empleo mínimo necesario de energía eléctrica, por ello, se buscará el máximo rendimiento del equipo.

2.1.2 ESTRUCTURA DE FUNCIONES

En la figura 2.1 se grafica la estructura de funciones de todo el equipo. Todo lo que está dentro del recuadro de línea negra forma parte del equipo.

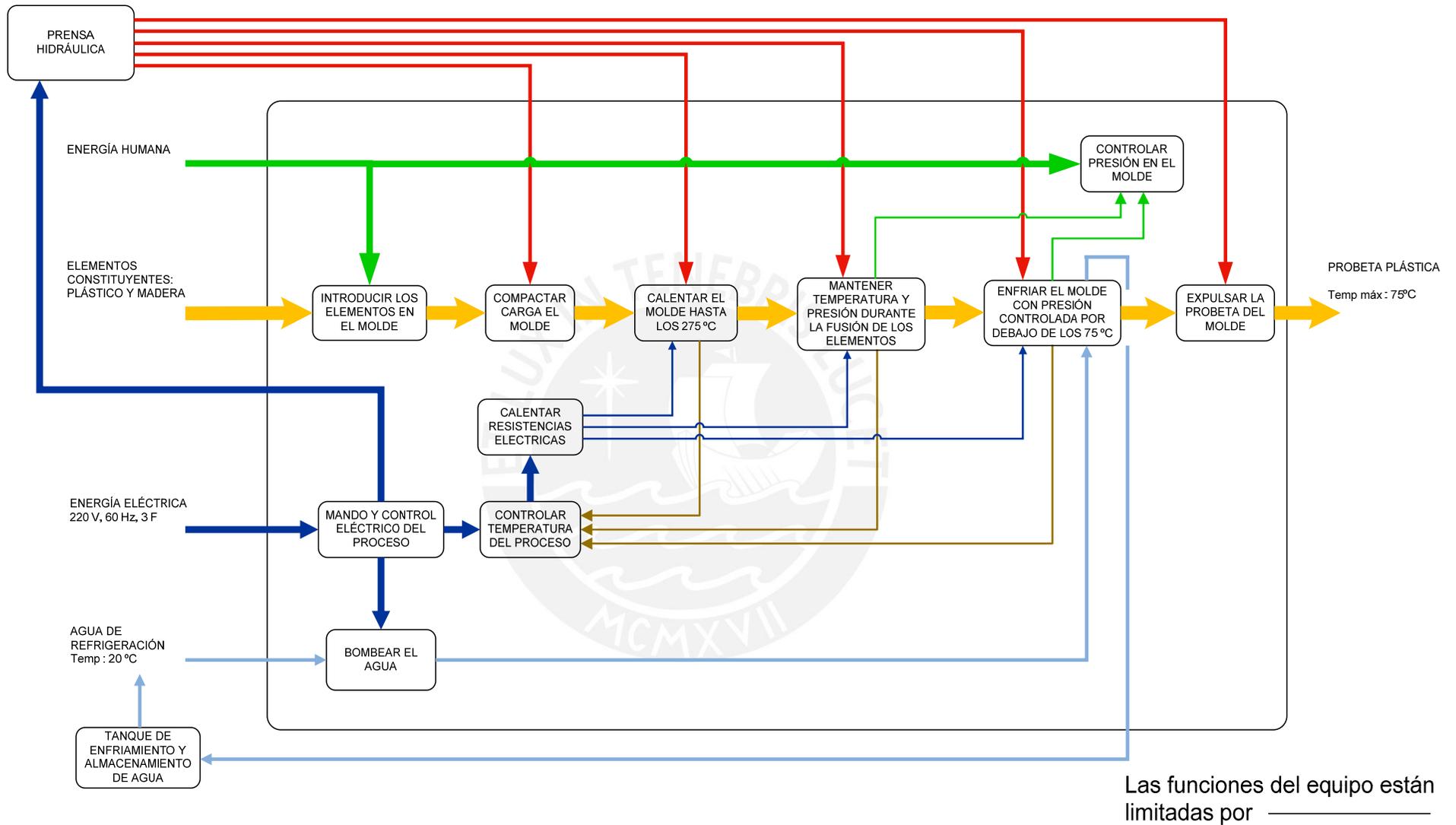


Figura 2.1. Estructura de funciones del equipo.

2.2 DATOS DE ENTRADA

Las variables de operación más importantes para el proceso de moldeo por compresión térmica del presente trabajo son las siguientes:

- **Temperatura:** Necesaria para elevar los polímeros hasta su temperatura de fusión.
- **Presión:** Indispensable para minimizar la presencia de discontinuidades debidas al aire, bolsas y cavidades y; además, para controlar el espesor de la probeta.
- **Velocidad de enfriamiento:** Esta variable se hace determinante debido a la presencia de las fibras de madera a alta temperatura.

Las variaciones no controladas en estos parámetros pueden causar efectos negativos evidentes en las propiedades de las probetas fabricadas.

Actualmente, existen diferentes normas que establecen valores para las variables del proceso según el tipo de polímero; sin embargo, debido a las características especiales de la matriz plástica y de las fibras de madera se establecen lo siguientes parámetros, en base a lo analizado en el capítulo anterior, tabla 2.1.

Tabla 2.1. Variables de operación para la fabricación de probetas.

Variable	Valor	Unidades
- Temperatura del molde	75 - 275	°C
- Presión específica sobre el material	0.689 - 1.72	MPa
- Tiempo de calentamiento	el más corto posible	seg.
- Tiempo de calentamiento	el más corto posible	seg.

2.3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Aún cuando el moldeo de materiales plásticos puede parecer a primera vista una operación muy simple, en seguida se podrá apreciar mejor cuales son las alternativas disponibles que respondan a la exigencia de precisión y calidad del producto final, en base a las partes que comprende todo el equipo: molde, sistema de aplicación de fuerza, sistema de calentamiento y sistema de enfriamiento.

2.3.1 MOLDES

El éxito o fracaso en el proceso de fabricación de moldeo descansa, principalmente, en el diseño y construcción del molde. El molde debe producir un número indefinido de probetas, siendo cada pieza un duplicado muy exacto de la precedente.

El molde de compresión consta fundamentalmente de dos elementos principales, el macho o núcleo y la hembra o matriz; estos dos elementos acoplan perfectamente entre sí, dejando un espacio o cavidad de moldeo cuya forma se corresponde con la del objeto que debe ser moldeado. En la figura 2.2 se muestra la construcción normalizada de un molde de compresión; en este esquema se observan las partes principales y su respectiva ubicación.

1. Cajas extractoras superior e inferior.
2. Placas extractoras superior e inferior.
3. Tetones guías de alineación con sus casquillos.
4. Platos principales del molde donde se ubican el machos y la hembra.

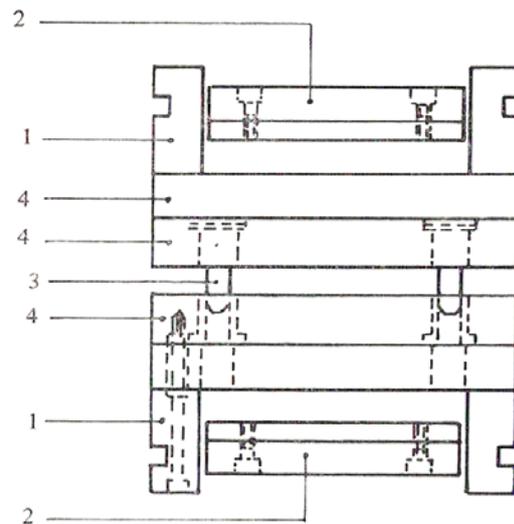


Figura 2.2. Módulo de compresión normalizado [Bodini, et al., 1993].

2.3.1.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL MANEJO DURANTE EL CICLO DE MOLDEO

Los moldes de compresión se pueden clasificar atendiendo a cómo se manejan durante el ciclo de moldeo en: moldes manuales, semiautomáticos y automáticos.

Un **molde manual** se designa así porque todas las operaciones del ciclo de moldeo: respiración del molde, apertura y separación de sus dos mitades, extracción de las piezas, así como retirada del molde de la prensa, deben de realizarse manualmente.

VENTAJAS

Son más económicos que los demás tipos de moldes, debido a que no llevan sistema extractor.

Bajos costos de operación.

Fácil mantenimiento.

Recomendados para series cortas de producción, con una sola cavidad.

Recomendados cuando la prensa de moldeo no está equipada con dispositivos para la extracción.

DESVENTAJAS

Es necesario colocar a mano el compuesto del moldeo dentro de las cavidades de moldeo y deben limpiarse con un chorro de aire, dirigido también manualmente, al final del ciclo de moldeo.

Los **moldes semiautomáticos** son moldes de múltiples cavidades, proyectados para largas series de producción. El número de cavidades que se pueden colocar en un molde está determinado por la capacidad de la prensa disponible y por el tamaño de las piezas a moldear.

VENTAJAS

Pueden ser actuados con los dispositivos de la prensa para separar las dos mitades del molde (apertura) y extraer las automáticamente las piezas moldeadas.

Recomendables para largas series de producción.

DESVENTAJAS

Como en el uso de los moldes manuales, es necesario colocar a mano el compuesto del moldeo dentro de las cavidades de moldeo y deben limpiarse con un chorro de aire, dirigido también manualmente, al final del ciclo de moldeo.

Difícil mantenimiento.

Ocupa gran espacio.

Los **moldes automáticos** son análogos a los anteriores, aunque naturalmente más complejos, pues tienen elementos y dispositivos para conseguir que la operación de moldeo se realice de un modo totalmente automático.

VENTAJAS

Tiempo de producción menor que los anteriores.

No requiere una intervención de control humano constante.

Recomendables para largas series de producción.

DESVENTAJAS

Costo elevado por los elementos electrónicos y sistemas automáticos de control que posee.

Costo elevado de operación.

Difícil mantenimiento.

Ocupa gran espacio.

La solución más adecuada del tipo de molde se obtiene mediante una evaluación técnico-económica comparada de los tipos de moldes, ver la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Evaluación técnico-económica de moldes según su manejo.

Criterios de evaluación	Factor de ponderación	Puntaje
A: Costo de instalación	4: Determinante	3: Muy bueno
B: Costo de operación	3: Muy importante	2: Bueno
C: Seguridad	2: Importante	1: Regular
D: Versatilidad	1: Prescindible	0: Malo
E: Mantenimiento		

Criterios de evaluación	A	B	C	D	E	
Factor de ponderación	2	3	3	4	2	Suma ponderada
1. Molde manual	3	3	1	1	3	28
2. Molde semiautomático	1	1	2	2	1	21
3. Molde automático	0	1	3	3	1	26

En la primera fila se encuentran los criterios de evaluación y en la segunda, su respectivo factor de ponderación, el cual da la importancia relativa a cada uno de ellos.

Finalmente, observando los valores obtenidos, la alternativa que obtiene la calificación más alta establece el tipo de molde a utilizarse, un molde manual.

2.3.1.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL DISEÑO DEL CONJUNTO MACHO/HEMERA

Atendiendo al diseño del conjunto macho y hembra, los tres tipos básicos de moldes de compresión para los plásticos se clasifican en positivos, semipositivos y planos [Anguita, 1975].

El **molde plano** es adecuado para la producción de piezas en las que es permisible la variación en el espesor o excentricidad de las piezas y cuando no es importante conseguir la máxima densidad en la pieza moldeada. Cuando en los bordes exteriores de las piezas se desean aristas vivas o radios relativamente pequeños y cuando la profundidad de la cavidad es suficiente para recibir la cantidad de material para el moldeo se aconseja este molde. Además, éstos son adecuados para moldear piezas poco profundas, figura 2.3.

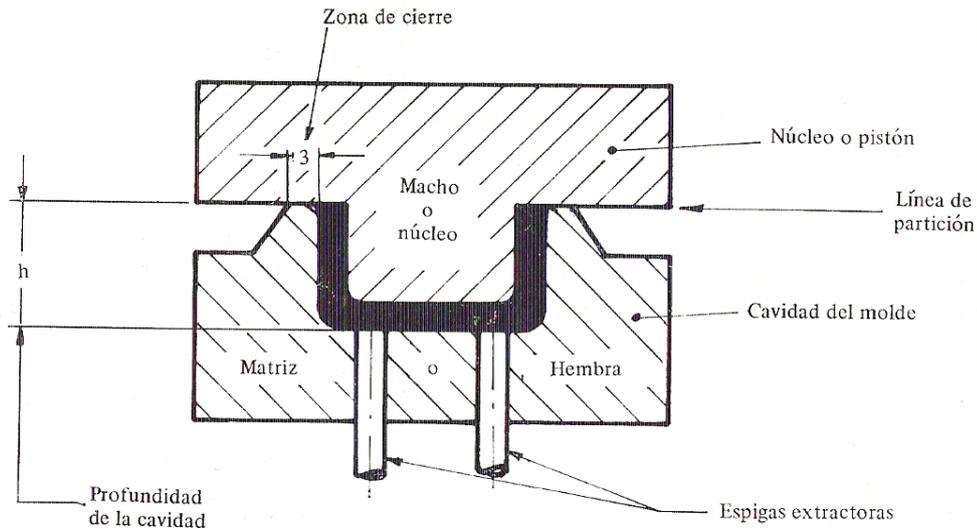


Figura 2.3. Molde plano [Anguita, 1975].

VENTAJAS

Bajo costo de fabricación del molde.

Facilidad de uso.

DESVENTAJAS

Permite escapar fácilmente el material de moldeo cuando se aplica presión al molde y se cierra el molde.

Probabilidad que se presente cavidades o bolsas de aire en la probeta.

Dificultad de conseguir alineación entre las dos placas del molde.

El **molde positivo** es análogo a un conjunto cilindro-pistón que equivale a la cavidad y al núcleo, respectivamente. En el caso de este molde se consigue una alineación con toda seguridad. Se ejerce la presión total de la fuerza para hacer que el material llene totalmente el molde. Por otro lado, la cantidad de carga debe de controlarse en forma muy exacta para producir una probeta de tamaño específico, principalmente respecto al espesor, figura 2.4.

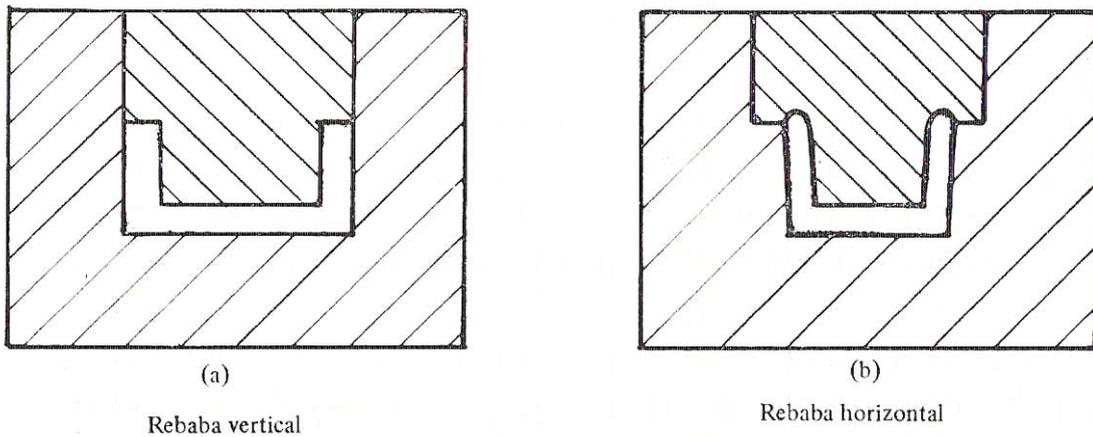


Figura 2.4. Molde positivo con rebaba a) vertical y b) horizontal [Anguita, 1975].

VENTAJAS

Alineación entre las dos mitades del molde.

Facilidad de uso.

DESVENTAJAS

Alto costo de fabricación del molde.

Pesar cuidadosamente la carga para moldeo para obtener probetas con idénticas dimensiones.

Dificultad de aplicar una misma presión, sobre todo en la carga de moldeo cuando se presentan múltiples cavidades.

El tipo de **molde semipositivo** es el intermedio de los dos considerados anteriormente. La característica principal de este molde es la holgura que lleva entre el macho y la hembra para permitir el escape de material en exceso y de gases. Para conseguir esto se da una conicidad de 2 a 3 grados a las paredes laterales de la hembra, por otro lado, el exceso de carga se controla fácilmente con rebabas que se hacen en el macho. Finalmente, se recomienda el uso de columnas o guías auxiliares, figura 2.5.

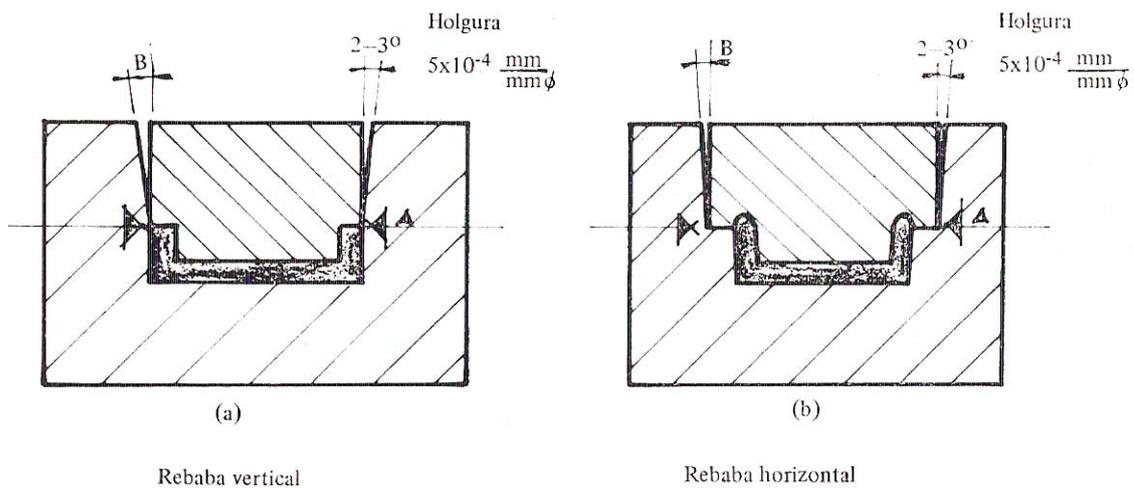


Figura 2.5. Molde semipositivo con rebaba a) vertical y b) horizontal [Anguita, 1975].

VENTAJAS

Asegura la producción de probetas de espesor correcto.

Permite disponer de la cavidad con un volumen suficiente para usar cargas con un elevado factor de compresión y reducir la formación de bolsas de aire en el producto.

Permite moldear piezas relativamente grandes.

Útil para piezas que tengan mucho espesor.

DESVENTAJAS

Alto costo de producción del molde.

Permite obtener piezas de mayor densidad que con un molde plano.

De la misma manera, la evaluación técnico económica comparada se aprecia en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Evaluación técnico-económica de moldes según su diseño.

Criterios de evaluación	Factor de ponderación	Puntaje
A: Costo de fabricación	4: Determinante	3: Muy bueno
B: Rigidez	3: Muy importante	2: Bueno
C: Seguridad	2: Importante	1: Regular
D: Calidad de trabajo	1: Prescindible	0: Malo
E: Facilidad de manejo		
F: Buen uso de energía		

Criterios de evaluación	A	B	C	D	E	F	
Factor de ponderación	2	3	3	4	2	1	Suma ponderada
1. Molde plano	3	1	1	1	2	3	19
2. Molde positivo	1	3	2	2	2	1	26
3. Molde semipositivo	0	3	3	3	2	1	31

De la misma forma, observando los valores obtenidos, la alternativa que obtiene la calificación más alta establece el tipo de molde a utilizarse, un molde semipositivo.

En conclusión, de los dos puntos previos analizados según la forma de manejo durante el ciclo de moldeo y según el diseño del conjunto macho/hembra, se obtiene que el nuestro **molde será del tipo manual y semipositivo**, respectivamente.

2.3.2 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE FUERZA

El diseño y construcción del equipo de aplicación de fuerza están fuera de los alcances del presente trabajo, sin embargo, es necesario evaluar las características de los tipos existentes más comunes, a fin de que no se presenten efectos desfavorables sobre los elementos constituyentes de la probeta durante la fabricación. Por otro lado, debido a que el molde será usado en la sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP, se presente la posibilidad de seleccionar una prensa de las ya existentes; el uso de ésta debe de procurar la efectividad del proceso de fabricación.

A continuación, se presentan las características tanto de un equipo de compresión hidráulico, mecánico y manual, tabla 2.4.

Tabla 2.4. Características de operación de los sistemas de fuerza [Bledzki, 1999].

Característica de la prensa	Hidráulico	Mecánico	Manual
Variación en la fuerza	La fuerza es constante en cualquier punto de la carrera.	La fuerza varía con la posición del cigüeñal.	La fuerza es constante con el uso de pesas.
Longitud de la carrera	Se varía y controla fácilmente.	Se regula con el largo de la biela.	Se regula con el brazo de palanca.
Variación de la velocidad	Regulable en un amplio rango.	Limitada por la velocidad del fuente mecánica.	Constante.
Sobrecargas	Suministra sólo una fuerza predeterminada.	Puede ser sobrecargada contando con sistemas de protección.	Puede ser sobrecargadas utilizando pesas extras.
Velocidad	Ciclo lento.	Ciclo muy rápido, ideal para alta producción.	Ciclo lento.
Energía o potencia	Elevada, puede ser hasta 2,5 veces mayor que el de un sistema mecánico.	Reducida.	Nula.

De manera general, se cumple que todos los tipos de prensa satisfacen con los requerimientos mínimos de operación, aunque cada una en diferente grado. Para la selección de la prensa se construye la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Evaluación técnico-económica de los tipos de prensa.

Criterios de evaluación	Factor de ponderación	Puntaje
A: Disponibilidad de uso	4: Determinante	3: Muy bueno
B: Rigidez	3: Muy importante	2: Bueno
C: Seguridad	2: Importante	1: Regular
D: Calidad de trabajo	1: Prescindible	0: Malo
E: Facilidad de manejo		
F: Buen uso de energía		

Criterios de evaluación	A	B	C	D	E	F	
Factor de ponderación	4	3	3	4	2	1	Suma ponderada
1. Prensa hidráulica	3	2	3	3	2	2	41
2. Prensa mecánica	0	2	3	1	3	2	21
3. Prensa manual	1	2	3	1	1	1	24

Se obtiene que la alternativa más adecuada para la producción de probetas es la utilización de una prensa hidráulica. Finalmente, en base a las dimensiones de la probeta que se desea fabricar y a la presión de trabajo admisible, se concluye que la prensa debe tener una capacidad mínima de 5 toneladas y máxima de 10 toneladas.

2.3.3 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

El proceso de suministro de calor y constante control de temperatura del molde son fundamentales durante el proceso de elaboración de las probetas debido a las características térmicas especiales de las fibras naturales, por ello es necesario una evaluación de los diferentes sistemas de calentamiento existentes.

A continuación, se mencionan los sistemas y métodos de calentamiento que podrían utilizarse:

- Calentamiento por vapor.
- Calentamiento eléctrico (resistencias).
- Calentamiento por inducción.
- Calentamiento por semiconductores.

Para el **calentamiento por vapor** se emplea vapor saturado que se obtiene de una caldera de vapor.

VENTAJAS

Bajo costo de operación.

Se puede elevar rápidamente la temperatura del molde al valor deseado.

Permite comunicar una temperatura uniforme a la plataforma.

DESVENTAJAS

Alto costo de fabricación debido a la caldera, tuberías, válvulas, etc.

La regulación de temperatura se dificulta para diferentes prensas en un taller.

El **calentamiento eléctrico** es el más utilizado debido por su gran simplicidad. Los elementos de calefacción consisten en un alambre de cromo-niquel encrustado en un material refractario y el conjunto encerrado en una camisa de acero al cromo. Cada “plataforma” de calefacción está conectada a una unidad de calentamiento independiente, en la que la temperatura se controla por medio de un termostato.

VENTAJAS

- Bajo costo de operación.
- Alta simplicidad de diseño.
- Seguridad durante el uso.
- Alto control de temperatura por medio de los termostatos.

DESVENTAJAS

- Alto costo de fabricación.
- Lentitud en la elevar la temperatura al inicio.
- Dificultad de enfriamiento posterior del molde si es necesario.

El **calentamiento por inducción** consiste en inducir fuerzas electromotrices en el seno de un material magnético situado en un campo magnético variable, lo que da lugar a la aparición de corrientes inducidas en el seno de la carga.

VENTAJAS

- Alta simplicidad de diseño.
- Alto control de temperatura en todo el volumen de la carga.
- Seguridad durante el uso.
- Alta rapidez de calentamiento inicial del molde.

DESVENTAJAS

- Alto costo de fabricación.

Alto costo de operación.

El **calentamiento por semiconductores** consiste principalmente en el uso de un anillo metálico que se ajusta estrechamente en la mitad del macho del molde; análogamente en la cavidad de la hembra se monta otro anillo con película semiconductor.

VENTAJAS

Eficiencia en el consumo de energía por encima del uso de resistencias eléctricas.

Alto control uniforme de temperatura en todo el volumen de la carga.

Seguridad durante el uso.

Alta rapidez de calentamiento inicial del molde.

DESVENTAJAS

Alto costo de fabricación.

Alto costo de operación.

A continuación, la evaluación técnico económica comparada se aprecia en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Evaluación técnico-económica de los tipos de calentamiento.

Criterios de evaluación	Factor de ponderación	Puntaje
A: Costo de fabricación	4: Determinante	3: Muy bueno
B: Costo de operación	3: Muy importante	2: Bueno
C: Seguridad	2: Importante	1: Regular
D: Buen uso de energía	1: Prescindible	0: Malo
E: Calidad de trabajo		
F: Facilidad de manejo		

Criterios de evaluación	A	B	C	D	E	F	
Factor de ponderación	3	2	3	1	4	2	Suma ponderada
1. Calentamiento por vapor	0	3	2	3	2	1	17
2. Calentamiento eléctrico	3	1	3	1	3	3	27
3. Calentamiento por inducción	1	2	3	1	2	2	21
4. Calentamiento por semiconductores	1	2	3	2	2	2	22

Observando los valores obtenidos, la alternativa que obtiene la calificación más alta es el calentamiento eléctrico con el uso de resistencias.

En base a lo anterior, el equipo utilizará un calentamiento indirecto por medio de plataformas de calefacción con resistencias eléctricas instaladas dentro de éstas, pues ello es recomendable para moldes pequeños [Anguita, 1975], como es el caso del trabajo.

Se denominan “plataformas” a los platos de calentamiento para distinguirlos de los platos de la prensa. El calentamiento eléctrico se efectúa por medio de resistencias, las cuales pueden ser planas y estar colocadas en los alojamientos fresados de las plataformas, recubiertas por otra placa atornillada sobre la plataforma, con esta disposición el calor emitido por las resistencias debe de atravesar la plataforma hasta alcanzar el molde. Es preferible taladrar las plataformas y ajustar las resistencias eléctricas bobinadas sobre piezas aislantes de material cerámico o empotradas en un tubo metálico. Este tipo de resistencias son de pequeño diámetro y permiten utilizar plataformas de poco espesor. Para tener un mejor control de temperatura sobre la probeta, durante la etapa de calentamiento, se utilizará un sensor de temperatura en cada plataforma de calentamiento y otro en el molde, el cual tenga contacto con la probeta.

Además, se recomienda que las plataformas sean de acero forjado. El metal debe de ser lo suficientemente duro (80 kg/mm^2) para que los moldes no marquen su señal. Así mismo, las plataformas deben de ser lo suficientemente gruesas para poder ser rebajadas después de un largo uso [Anguita, 1975].

2.3.4 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Es esencial que el tiempo de enfriamiento sea lo más corto posible, por ello, se plantea implementar un sistema de enfriamiento que pueda extraer el calor de manera muy acelerada. Actualmente, los fluidos más utilizados en la refrigeración son el aire y el agua, cada una con diferentes propiedades según la aplicación.

Para el trabajo se utilizará agua potable como fluido de enfriamiento ya que ésta presenta un alto grado de absorción de calor; y, además, su costo de suministro y operación son bajos frente a un enfriamiento por aire forzado, debido a que en este último es necesario un equipo de ventilación que consumen gran potencia para obtener un enfriamiento rápido. Un contacto directo entre el agua y el molde puede generar defectos en la probeta, debido a la rápida absorción de humedad por parte de las fibras de madera, a través de las pequeñas ranuras entre el macho y hembra del molde; por ello, se plantea utilizar plataformas de acero con canales internos por los cuales circule el agua.

El agua potable se tomará de un recipiente de aproximadamente 1 m³ y, por medio de una bomba centrífuga, se le hará circular a través de las plataformas de enfriamiento, luego retornará al recipiente.

Finalmente, para acelerar la transferencia de calor, se plantea utilizar por separado un par de plataformas de calentamiento y otro par de plataformas de enfriamiento, de tal manera que no sea necesario enfriar las de calentamiento para enfriar el molde. Además, una configuración de este tipo permitirá producir probetas en serie, es decir, mientras una se calienta, otra se enfría de manera simultánea; sin embargo, será necesario disponer de más de un molde.

2.4 PROYECTO ÓPTIMO Y BOSQUEJO DEL EQUIPO

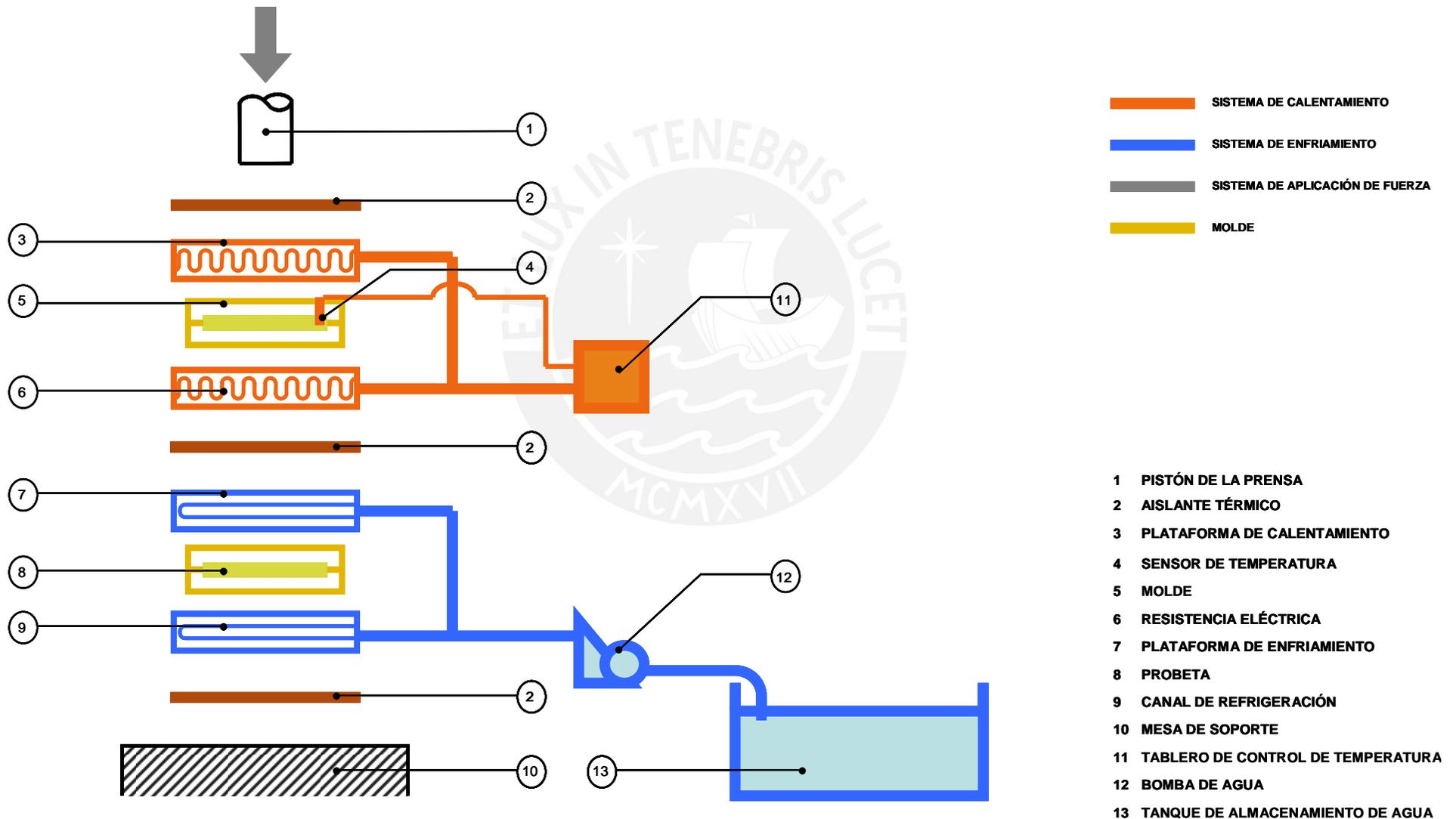
Después del análisis y evaluación realizados, mediante una matriz morfológica se obtiene el proyecto óptimo, tabla 2.7. Finalmente, se grafica un bosquejo general de la geometría del equipo. Este dibujo no obedece a cálculos energéticos ni muestra dimensión alguna, en él se describen las partes concebidas anteriormente y se numeran en el mismo orden allí mencionado, figura 2.6.

Tabla 2.7. Matriz morfológica del molde.

MOLDES	Según manejo durante el ciclo	Manual	Semiautomático	Automático	
	Según diseño del conjunto	Molde plano	Molde Positivo	Molde Semipositivo	
SISTEMA DE APLICACIÓN DE FUERZA		Hidráulico	Mecánico	Manual	
SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL MOLDE		Vapor	Eléctrico	Inducción	Semiconductores
PLACAS DE CALENTAMIENTO		Sin plataforma	Con plataforma		
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL MOLDE		Agua	Aire		

PROYECTO
ÓPTIMO

Figura 2.6. Bosquejo de la geometría del concepto de solución del equipo.



CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL MOLDE

3.1 DISEÑO DEL MOLDE PARA COMPRESIÓN TÉRMICA

Tal como se mostró en capítulos anteriores, para obtener una probeta de material compuesto son necesarios, además del molde, otros sistemas complementarios; por ello, desde ahora a este conjunto se le denominará **equipo de moldeo**, el cual está compuesto por los siguientes elementos:

- El molde.
- Las plataformas de calentamiento.
- Las plataformas de enfriamiento.

En una primera fase, para establecer el óptimo diseño del equipo, es necesario analizar los tipos de agentes externos a los cuales estará expuesto, para luego definir las dimensiones y materiales más adecuados que puedan satisfacer los requerimientos de esfuerzos, deformaciones permisibles y condiciones de funcionamiento.

A continuación, en la figura 3.1 se presenta un esquema con todos los elementos que conforman el equipo y los ejes referenciales para el análisis.

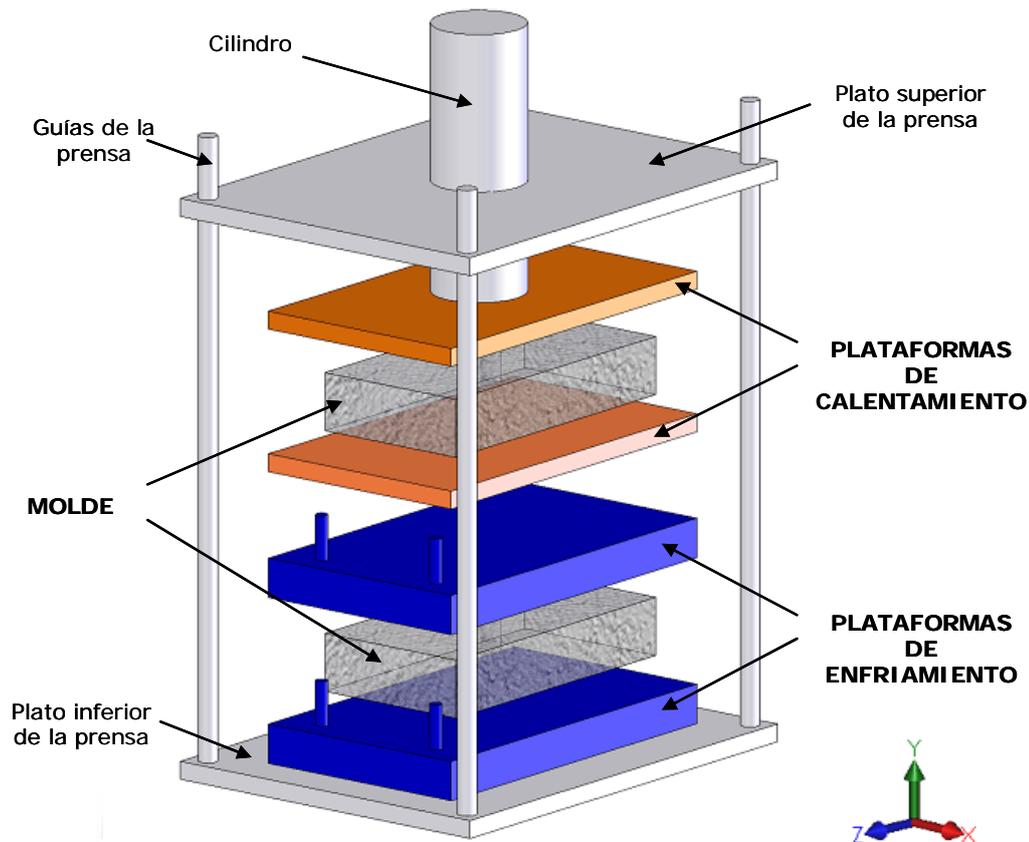


Figura 3.1. Componentes del equipo y ejes referenciales.

En esta sección en particular, se detallan los parámetros de diseño del molde. En su mayoría, los moldes están diseñados de tal manera que no se presenten diferencias dimensionales que excedan los límites permitidos en los productos finales; en consecuencia, aquellos deben de ofrecer una alta rigidez con un uso reducido de material. Muchas veces los esfuerzos a los que están expuestos son muy bajos pues la característica fundamental es garantizar una pequeña deformación en su estructura.

3.1.1 DEFORMACIÓN PERMISIBLE DEL MOLDE

En el moldeo por compresión de termoplásticos se aplican presiones elevadas que garantizan un producto final con características mecánicas uniformes, sin embargo, para el trabajo, una de las principales limitaciones es la presión máxima a la cual puede estar sometida la fibra de madera para no alterar su estructura macromolecular y, en consecuencia, su resistencia mecánica. Como se mencionó en la sección

1.3.2.1, en la producción industrial de astillas de madera de buena calidad, la presión de trabajo varía desde los 689 kPa hasta los 1720 kPa, esta última será la presión de trabajo máxima de todo el equipo.

Asimismo, la norma ASTM D 1037 – 06a “*Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials*”, establece los siguientes límites dimensionales del producto final para los diferentes ensayos que se requieren, tabla 3.1:

Tabla 3.1. Precisión de probetas según la norma ASTM 1037 – 06a.

Precisión de las dimensiones de los paneles finales	
Del ancho y largo	$\pm 2 \text{ mm}$
Del espesor	$\pm 1 \text{ mm}$

Por otro lado, es necesario considerar el efecto del incremento de la temperatura en la deformación final del molde, el cual hará variar las dimensiones terminales de la probeta. Como se mostró en la sección 1.3.1.2, es necesario alcanzar una temperatura de 265 °C para fundir el PET, para ello, se requiere que las paredes del molde alcancen una temperatura final de calentamiento de 270 °C, lo cual garantiza una transferencia de calor óptima que mantenga al PET caliente durante el tiempo necesario para su fusión.

3.1.2 COMPORTAMIENTO DEL MOLDE BAJO LA ACCIÓN DE UNA CARGA CENTRADA

El objetivo del presente análisis es estudiar el comportamiento del molde bajo la acción de una carga centrada, producida por el cilindro de una prensa, y los efectos de deformación que se podrían producir en la probeta.

Para ello, el estudio del molde se divide en el análisis de la deflexión de los platos superior e inferior y en el análisis de deflexión de las paredes laterales.

3.1.2.1 ANÁLISIS DE LA DEFLEXIÓN DE LOS PLATOS SUPERIOR E INFERIOR

En el diseño se plantea que tanto las paredes laterales del molde como el plato inferior del molde formarán un solo elemento, unidos por pernos; mientras que el plato superior del molde será un solo elemento separado, figura 3.2.

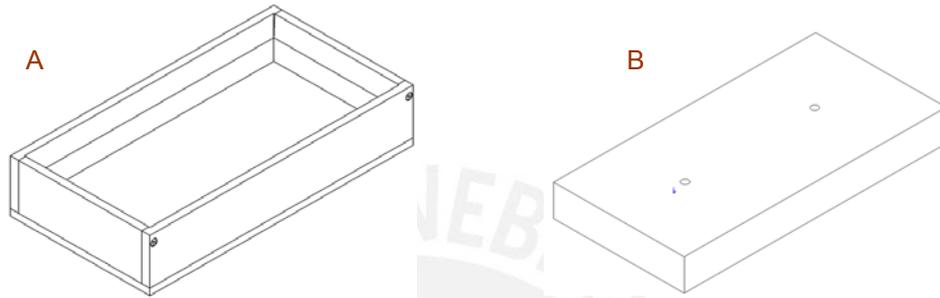


Figura 3.2. Distribución de elementos del molde A) plato inferior y paredes laterales
B) plato superior.

Tal como se aprecia en la figura 3.1, la transmisión de fuerza al molde se realiza por medio de la plataforma superior de calentamiento, la cual recibe, a su vez, la fuerza del cilindro de la prensa.

En la figura 3.3 se aprecia el efecto de una carga puntual y una carga uniformemente distribuida, debido al uso de una placa rígida, sobre un cuerpo cualesquiera en los esfuerzos y deformaciones.

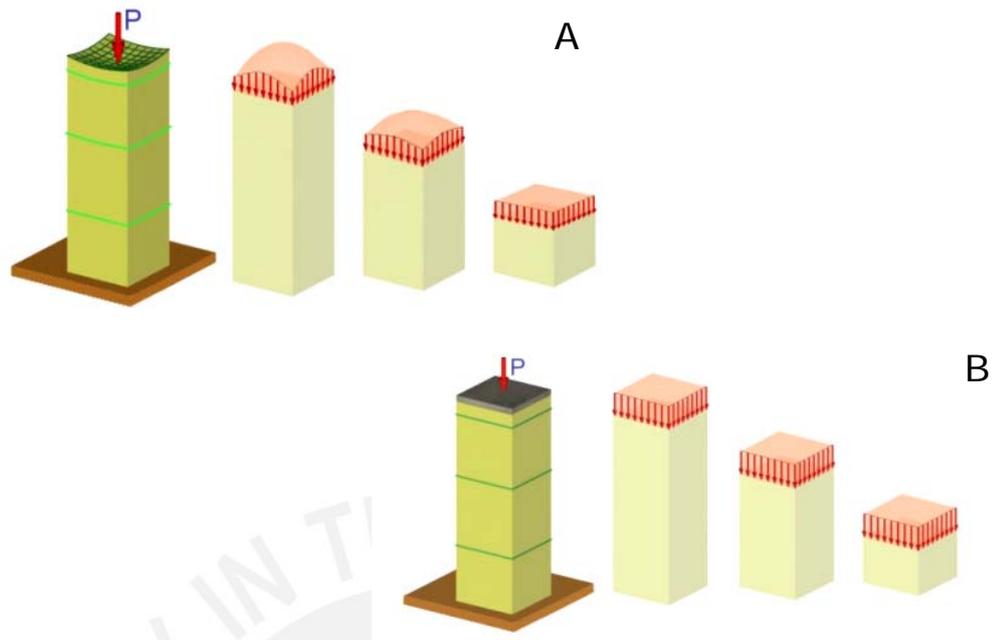


Figura 3.3. Efectos de una carga centrada A) sin placa rígida y B) con placa rígida [Resistencia de Materiales, 2003].

Para el diseño del molde se considera a la plataforma superior de calentamiento lo suficientemente rígida, de tal manera, que la carga puntual entregada del cilindro de la prensa se convierta en una carga uniformemente distribuida sobre todos los elementos inferiores, en especial sobre el molde, de tal manera que el espesor de la probeta no sea afectado por las cargas desiguales. Esta suposición se comprobará en la sección 3.2.

3.1.2.2 ANÁLISIS DE LA DEFLEXIÓN DE LAS PAREDES LATERALES

Al final del proceso de calentamiento de los elementos constituyentes, el PET se encuentra fundido; de esta forma, se presenta una presión homogénea dentro del molde debido al polímero en estado líquido, consecuentemente, se genera una fuerza en las paredes laterales del molde, la cual producirá en éstas deflexiones considerables.

Para el análisis de las deflexiones producidas y su efecto en la deformación de la probeta es necesario simplificar el comportamiento de las paredes del molde frente a la fuerza producida por la presión del PET. Fácilmente se pueden encontrar las zonas

críticas de deformación mediante un análisis visual de la geometría del molde, figura 3.4.

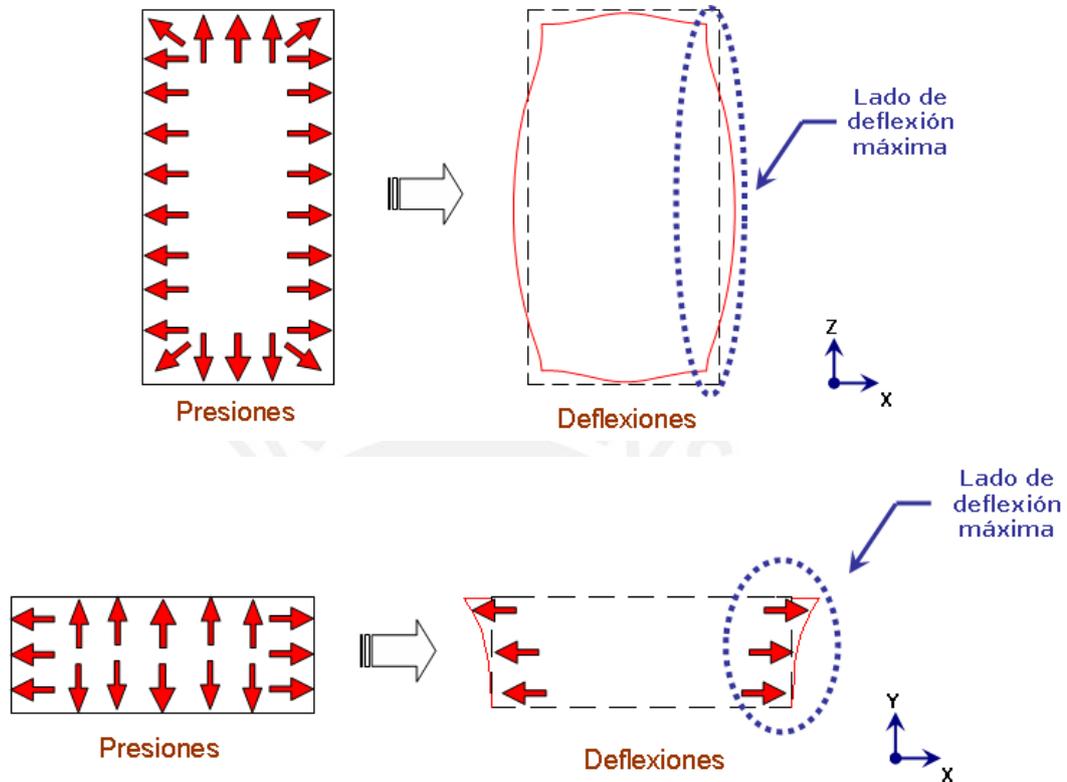


Figura 3.4. Deflexiones de las paredes laterales debido a la presión.

Se divide el análisis en dos zonas diferentes: una vista desde la parte superior y otra desde la frontal. En primer lugar, debido a que los extremos longitudinales de las paredes no están articulados en las esquinas, sino están unidos rígidamente por pernos, aquellas se asumen como barras empotradas en sus extremos bajo una carga uniforme lineal; en segundo lugar, debido a que las paredes están firmemente unidas al plato inferior del molde se puede asumir que la deflexión es producida por una carga lineal uniforme sobre una barra empotrada por uno de sus extremos. Es necesario hallar la suma de estas deflexiones individuales para determinar la deflexión total.

Tal como se aprecia, los sectores críticos de deformación se sitúan en diferentes zonas de las paredes laterales del molde, por ello, el análisis de resistencia de materiales se concentrará en encontrar los espesores mínimos necesarios de pared que puedan satisfacer los límites dimensionales permitidos en la probeta.

3.1.3 DEFLEXIÓN POR EFECTO DE LA PRESIÓN

Como se mencionó anteriormente, para el análisis de deflexiones se considera que la presión de trabajo máxima del equipo es de 1720 kPa y, por otro lado, una carga uniformemente distribuida en las paredes del molde.

Mediante el uso de la técnica de Superposición de efectos podemos obtener el comportamiento real de las paredes del molde. En la figura 3.5 se aprecia las deflexiones máximas de dos modelos de análisis de resistencia mecánica: carga lineal sobre una barra empotrada un extremo y sobre una barra empotrada en sus dos extremos. Luego podemos distinguir la suma de estas deflexiones individuales, figura 3.6.

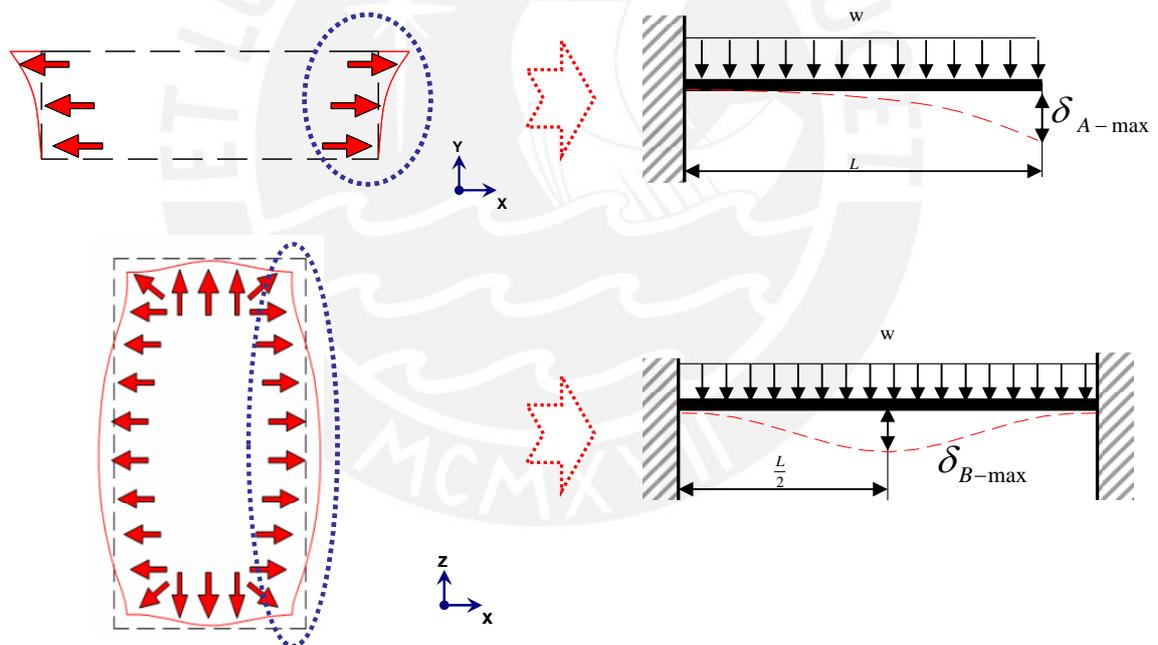


Figura 3.5. Deflexiones de las paredes del molde y aproximación a modelos matemáticos.

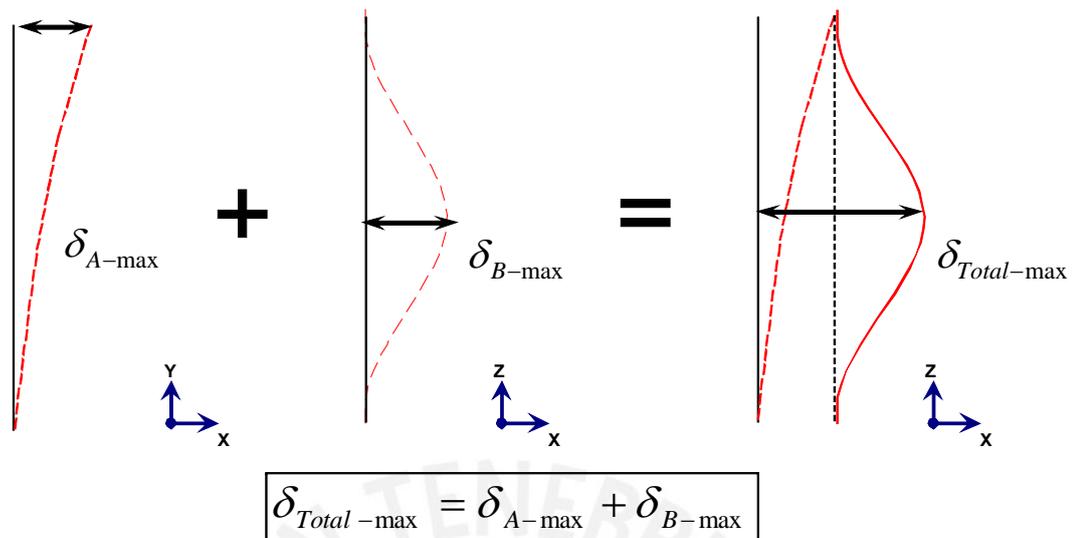


Figura 3.6. Deflexión total máxima en las paredes laterales producida por la presión.

Para determinar la deflexión total máxima utilizamos el primer teorema de Castigliano. En primer lugar, se halla la deflexión δ_{A-max} del extremo en voladizo de la viga; para ello es necesario colocar una fuerza ficticia en la dirección del desplazamiento que queremos calcular, en este caso la fuerza vertical $F = 0$, figura 3.7.

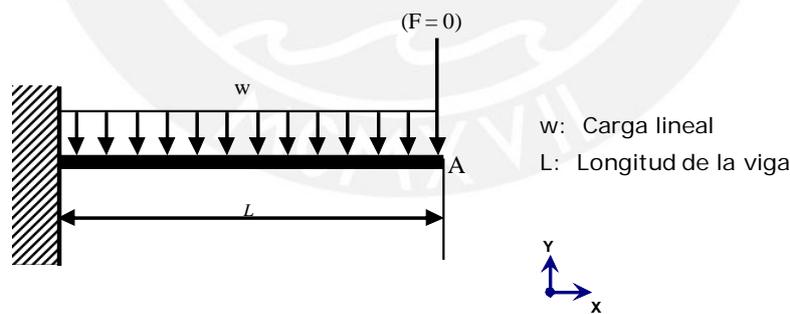


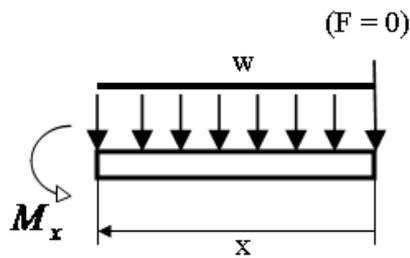
Figura 3.7. Deflexión máxima producida en una viga en voladizo debido a una carga uniforme.

De Castigliano, en el plano (x-y):

$$\delta_{A-max} = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{\partial}{\partial F} \int_0^L \frac{M_x^2}{2EI} dx = \int_0^L \frac{M}{EI} \left(\frac{\partial M_x}{\partial F} \right) dx$$

Donde,

- U : Energía de deformación.
- M : Momento flector.
- E : Módulo de elasticidad del material.
- I : Momento de inercia de la viga.



El momento flector para una sección genérica de la viga a una distancia genérica x del extremo, figura 3.8:

$$M_x = F \cdot x + \frac{w \cdot x^2}{2}, \quad \frac{\partial M_x}{\partial F} = x$$

Figura 3.8. Momento flector para una sección de la viga.

Reemplazando en la expresión de Castigliano y recordando que $F = 0$ se obtiene:

$$\delta_{A-\max} = \int_0^L \frac{1}{EI} \left(\frac{w \cdot x^2}{2} \right) x \cdot dx = \frac{1}{2EI} \left[\frac{w \cdot x^4}{4} \right]_0^L$$

$$\delta_{A-\max} = 0.125 \frac{wL^4}{EI} \quad (PLANO_X-Y) \tag{3.1}$$

Por otro lado, para hallar la deflexión vertical $\delta_{B-\max}$ de la viga es necesario, de igual forma, colocar una fuerza ficticia en dirección del desplazamiento que queremos calcular, en este caso la fuerza vertical $Q = 0$, figura 3.9.

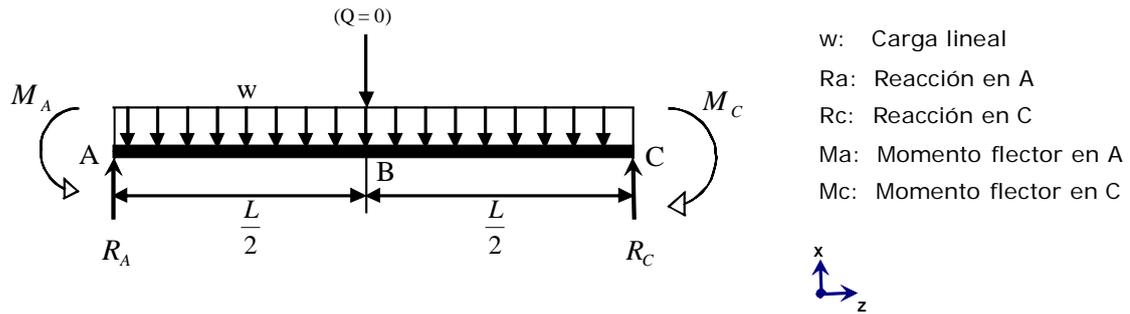
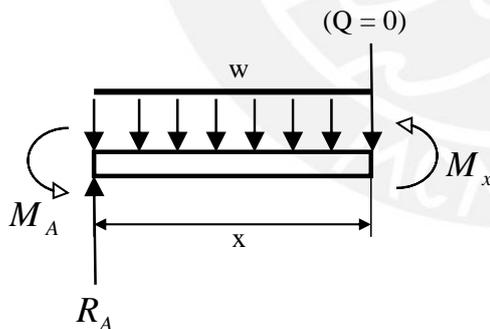


Figura 3.9. Deflexión máxima producida en una viga empotrada debido a una carga uniforme.

Es evidente que la deflexión máxima ocurrirá en la mitad de la viga, por ello se desarrolla el primer teorema de Castigliano para la mitad de la viga, figura 3.10.

Según Castigliano en el plano (x-z):

$$\delta_{B-\max} = \int_0^L \frac{M_x}{EI} \left(\frac{\partial M_x}{\partial Q} \right) dx = \int_A^B \frac{M}{EI} \left(\frac{\partial M_x}{\partial Q} \right) dx + \int_B^C \frac{M}{EI} \left(\frac{\partial M_x}{\partial Q} \right) dx$$



Así obtenemos:

$$R_A = R_C = \frac{wL}{2} + \frac{Q}{2}, \quad \frac{\partial M_x}{\partial Q} = \frac{x}{2}, \quad M_A = \frac{wL^2}{12}$$

$$M_x = R_A \cdot x - \frac{w \cdot x^2}{2} - M_A$$

$$M_x = \left(\frac{wLx}{2} + \frac{Q \cdot x}{2} \right) - \frac{w \cdot x^2}{2} - \frac{wL^2}{12}$$

Figura 3.10. Momento flector para la mitad de la viga.

Debido a la simetría geométrica y de cargas, la energía de deformación en la mitad izquierda de la viga es igual a la energía de deformación en la mitad derecha. Por consiguiente, reemplazando en la expresión de Castigliano y recordando que $Q = 0$:

$$\delta_{B-\max} = \int_A^B + \int_B^C = 2 \int_0^{L/2} \frac{M}{EI} \left(\frac{\partial M}{\partial Q} \right) dx$$

$$\delta_{B-\max} = 2 \int_A^C \frac{M_x}{EI} \left(\frac{\partial M_x}{\partial Q} \right) dx = \frac{2}{EI} \int_0^{L/2} \left[\frac{w.L.x}{2} - \frac{w.x^2}{2} - \frac{w.L^2}{12} \right] \cdot \frac{x}{2} dx$$

$$\delta_{B-\max} = \frac{2}{EI} \left[\frac{w.L.x^3}{12} - \frac{w.x^4}{16} - \frac{w.L^2.x^2}{48} \right]_0^{L/2}$$

$$\delta_{B-\max} = 0.00261 \frac{w.L^4}{EI} \quad (PLANO - X-Z) \quad (3.2)$$

Con las expresiones obtenidas 3.1 y 3.2 y, mediante la superposición de efectos, obtenemos la expresión de deflexión máxima total que se produce en las paredes laterales del molde $\delta_{TOTAL-MAX}$ y, en base a los límites permitidos según la tabla 3.1, se obtiene que:

$$\delta_{TOTAL_MAX} = 2 \left(0.125 \frac{wL^4}{EI} \quad (X-Y) + 0.00261 \frac{w.L^4}{EI} \quad (X-Z) \right) \leq 2mm \quad (3.3)$$

En base a la ecuación 3.3, la tabla 3.2 muestra los valores de deflexión máxima total obtenidos para varios espesores de pared del molde. Se plantea el uso del material Alumold, el cual es un material especial para la aplicación de moldes a compresión térmica de alta resistencia mecánica, con un $E = 7,1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ [Bohler, 2008].

Tabla 3.2. Deflexiones producidas para varios espesores del molde.

Espesor de pared (mm)	Inercia A (mm4)	Inercia B (mm4)	Presión (N/mm2)	wA (N/mm)	wB (N/mm)	dA (mm)	dB (mm)	d Total $\leq 2mm$
6.00	5490	540	1.72	524.60	51.60	0.135	1.882	4.035
9.00	18529	1823	1.72	524.60	51.60	0.040	0.558	1.196
10.00	25417	2500	1.72	524.60	51.60	0.029	0.407	0.872
12.00	43920	4320	1.72	524.60	51.60	0.017	0.235	0.504
16.00	104107	10240	1.72	524.60	51.60	0.007	0.099	0.213

Para ratificar los resultados obtenidos, se desarrolla un análisis de resistencia mecánica complementario mediante un estudio por elementos finitos con el programa

AutoDesk Inventor Professional 2008; para ello, se modelan las condiciones carga en el molde: materiales, presión y restricciones. El análisis se realiza para un espesor de pared de 10 mm con lo cual se obtiene una deformación máxima de 0,39 mm, esto muestra la confiabilidad de los resultados obtenidos en la tabla, pues se obtendría un factor de seguridad más elevado, figura 3.11.

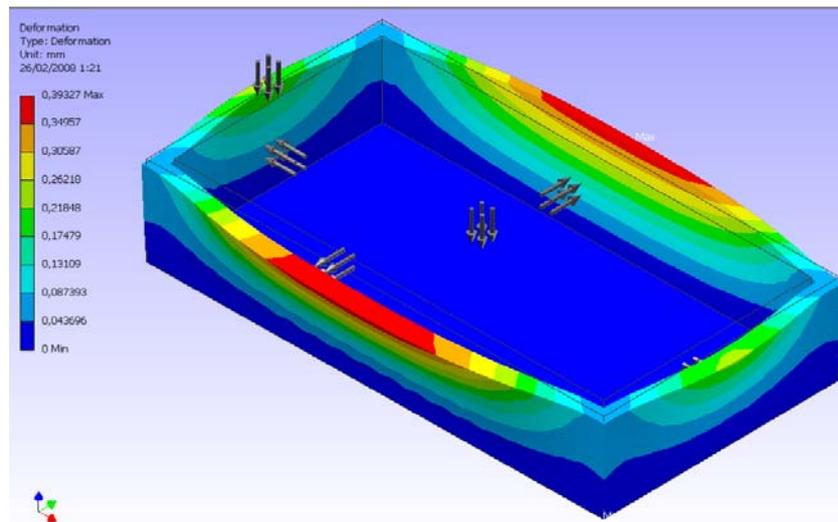


Figura 3.11. Análisis de deformaciones mediante elementos finitos.

Finalmente, antes de determinar el espesor final de la pared será necesario analizar el efecto de la dilatación térmica en los platos superior e inferior del molde a causa del incremento de temperatura, esto lo vemos en la siguiente sección.

3.1.4 DILATACIÓN POR EFECTO DE LA TEMPERATURA

El efecto de la dilatación térmica tiene consecuencias negativas en las dimensiones finales de la probeta pues varía su geometría; por ello, el análisis se divide en el estudio de la dilatación superficial de los platos superior e inferior y la dilatación del espesor de los platos superior e inferior del molde.

Se escoge una vez más como material el Alumold debido a su baja capacidad calorífica, baja densidad y alta resistencia mecánica; además, posee un reducido coeficiente de dilatación térmica lineal de $\alpha = 18 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C}^{-1})$.

3.1.4.1 DILATACIÓN SUPERFICIAL DE LOS PLATOS SUPERIOR E INFERIOR

El incremento de la temperatura en los platos superior e inferior produce una expansión superficial, es decir, un incremento en el ancho y largo. Este cambio de dimensiones afecta considerablemente la forma final de la probeta fabricada, figura 3.12.

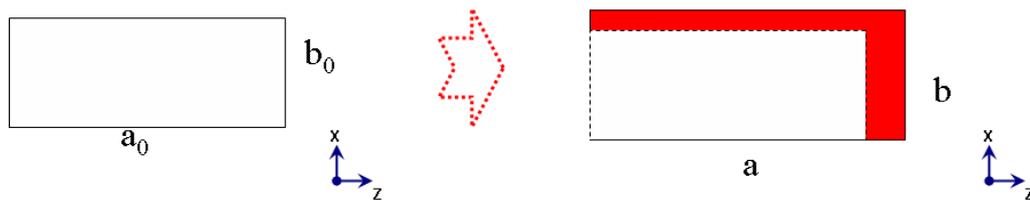


Figura 3.12. Expansión superficial de los platos superior e inferior debido al incremento de la temperatura del molde.

Solamente se determina la dilatación lineal en el eje Z, pues en ésta dirección se encuentra la mayor longitud del plato. Es necesario que la temperatura final de calentamiento del molde llegue a 270°C, tal como se mencionó en el segundo capítulo.

La dilatación lineal de un sólido δ_{CALOR} se determina con la expresión:

$$\delta_{CALOR} = \Delta a = a_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \tag{3.4}$$

Donde,

- $\alpha = 18 \times 10^{-6} (^\circ C^{-1})$: Coeficiente de dilatación térmica lineal.
- $a_0 = 152 mm$: Longitud inicial.
- $\Delta T = 250^\circ C$: Incremento de temperatura desde los 20°C.

De la ecuación 3.4, se obtiene:

$$\delta_{CALOR} = 0,69 mm \tag{3.5}$$

Al sumar el resultado obtenido por la dilatación, expresión 3.5, con el valor producido por la presión para un espesor de pared de 10 mm de la tabla 3.2, se encuentra que:

$$\delta_{TOTAL} = \delta_{PRESIÓN} + \delta_{CALOR} \leq 2mm$$

$$\delta_{TOTAL} = 1,562 \leq 2mm \tag{3.6}$$

De esta forma, un espesor de 10 mm de pared del molde satisface los requisitos de deformación según la norma ASTM D1037 – 06a.

3.1.4.2 DILATACIÓN DEL ESPESOR DE LOS PLATO SUPERIOR E INFERIOR

Tal como se citó en la tabla 3.1, el espesor de la probeta no debe de sobrepasar el error de ± 1 mm; para ello, es necesario realizar un análisis de la dilatación del plato superior e inferior en la dirección Y del sistema. En la figura 3.13 se observa la presencia de desplazamientos en sentidos opuestos a causa del incremento de la temperatura; la suma total de aquellos resulta el error final del espesor de la probeta.

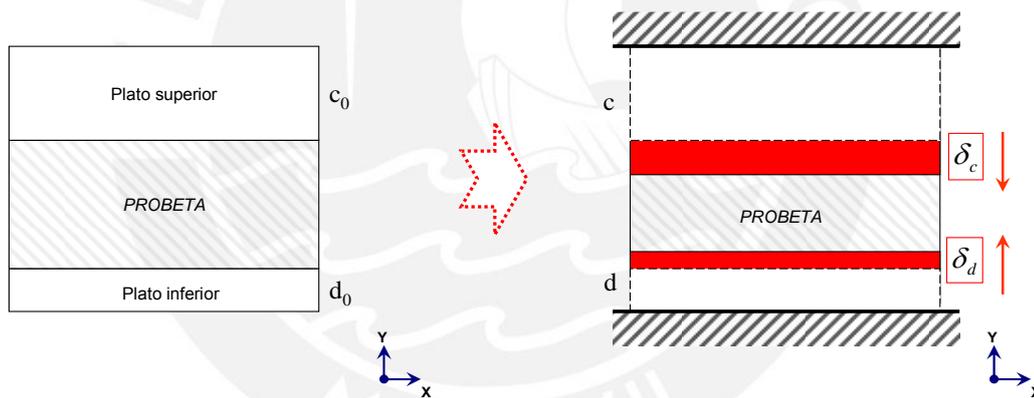


Figura 3.13. Efectos de la dilatación de los platos superior e inferior del molde en la probeta.

La dilatación térmica total de los dos platos genera una reducción en el espesor de la probeta, la cual puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$\delta_{ESPESOR} = \delta_c + \delta_d \tag{3.7}$$

Donde, para los de espesores de 37 mm y 10 mm del plato superior e inferior, respectivamente, se obtiene:

$$\delta_c = 0.111mm \quad : \text{Dilatación del plato superior.}$$

$\delta_d = 0.0441\text{mm}$: Dilatación del plato inferior.

Con la ecuación 3.7, se obtiene que:

$$\delta_{\text{ESPESOR}} = \delta_c + \delta_d = 0.1544\text{mm} \leq 1\text{mm} \quad (3.8)$$

Se observa que la deformación total es pequeña con respecto al valor máximo permitido, por ello, en este punto, también se cumple con la norma ASTM D1037 – 06a.

3.1.5 CÁLCULO DE RESISTENCIA MECÁNICA DEL MOLDE

Finalmente, es necesario realizar una verificación de la resistencia mecánica del molde, para ello, se determinan las zonas más críticas del molde, en las cuales se presentan los mayores esfuerzos.

A continuación, se muestra la ubicación de las zonas más cargadas del molde, estos sectores de máximos esfuerzos se encuentran en las uniones de las paredes del molde con el plato inferior, figura 3.14.

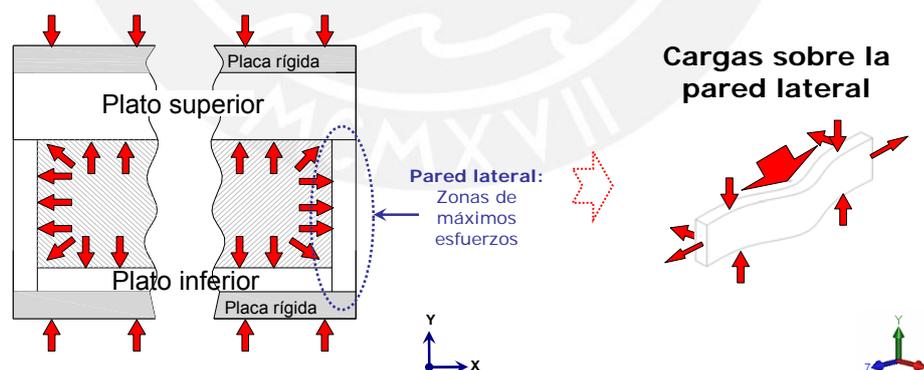


Figura 3.14. Zona más cargada del molde: Pared lateral.

Las paredes del molde son las zonas más afectadas por esfuerzos de tracción y compresión, simultáneamente. En la figura 3.15 se muestra un elemento diferencial sometido a esfuerzos; es así que, en el eje Z se produce una fuerza de tracción

ocasionada por la presión del material dentro del molde; mientras que en el eje Y, está presente una fuerza de compresión producida por la fuerza de la prensa.

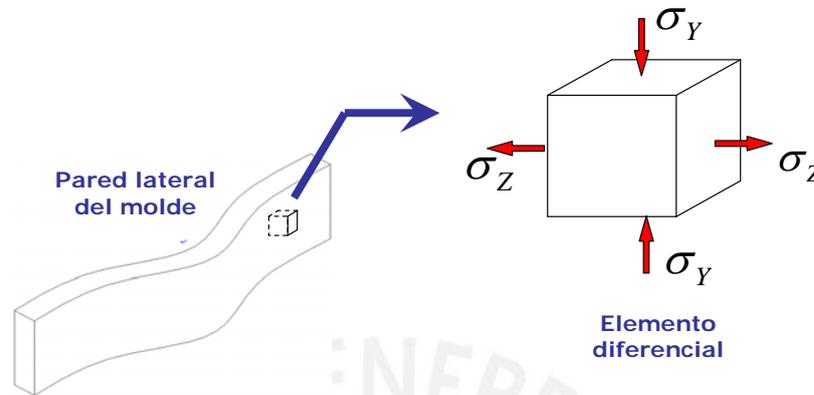


Figura 3.15. Estado de esfuerzos en la pared lateral del molde.

El esfuerzo en la dirección Y se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_Y = F_T / A_{resistente} \tag{3.9}$$

Donde,

$F_T = 10^5 N$: Fuerza total ejercida por la prensa, ver sección 2.3.2.

$A_{resistente} = 1900mm^2$: Área total de contacto resistente de las paredes.

De la ecuación 3.9, se obtiene:

$$\sigma_Y = 10ton / 1900mm^2 = 52,7 N / mm^2 \tag{3.10}$$

Por otro lado, el esfuerzo σ_Z puede ser calculado en base a la deformación que se produce en las paredes. Utilizando la relación que existe entre el esfuerzo de tracción σ_Z y la deformación producida por la presión δ_Z para una pared de 10 mm de espesor de la tabla 3.2, se plantea:

$$\sigma_Z = \delta_Z \cdot E_{Alumold} / L_p \tag{3.11}$$

Donde,

$$L_p = 163 \text{ mm} \quad : \text{Longitud media de la pared.}$$

$$\delta_z = L_p - \sqrt{L_p^2 + 0,504^2} = 0,00078 \text{ mm} \quad : \text{Deformación longitudinal de la pared.}$$

$$E_{\text{Alumold}} = 7,1 \times 10^4 \text{ N / mm}^2 \quad : \text{Módulo de elasticidad del Alumold.}$$

De la ecuación 3.11, se obtiene:

$$\sigma_z = 0,35 \text{ N / mm}^2 \quad (3.12)$$

Para calcular el esfuerzo equivalente total se utiliza el criterio de Von Mises, el cual es aplicado para materiales dúctiles como el Alumold.

$$\sigma_{\text{equi}} = \sqrt{(\sigma_Y^2 + \sigma_Z^2)} \leq \sigma_{F-A} / FS \quad (3.13)$$

Donde,

$$\sigma_{F-A} = 500 \text{ N / mm}^2 \quad : \text{Esfuerzo de fluencia del Alumold.}$$

$$FS = 2,5 \quad : \text{Factor de seguridad para moldes [Vidosic, 1957].}$$

De la ecuación 3.13, se obtiene:

$$\sigma_{\text{equi}} = 52,8 \text{ N / mm}^2 \leq 250 \text{ N / mm}^2 \quad (3.14)$$

Este resultado muestra que el molde no fallará por resistencia mecánica. De la misma forma, se muestra un análisis por elementos finitos para las condiciones de carga establecidas, el estudio muestra que la zona de más cargada tendrá un esfuerzo máximo de $140,2 \text{ N/mm}^2$, lo cual revela que el molde no fallará por resistencia, figura 3.16.

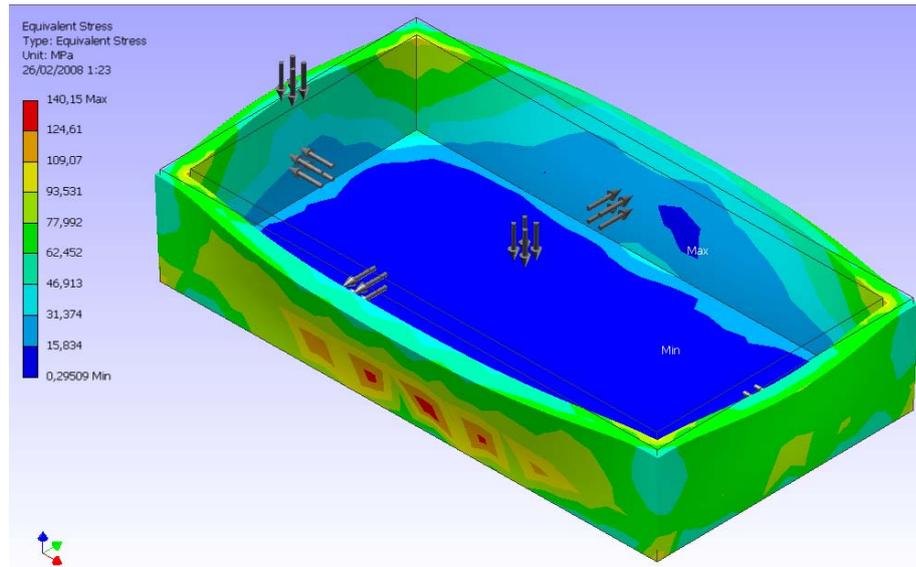


Figura 3.16. Análisis de esfuerzos mediante elementos finitos.

3.2 DISEÑO DE LAS PLATAFORMAS DE CALENTAMIENTO

En esta sección se analiza y determina la geometría y características de las plataformas de calentamiento del molde. Éstas tienen la función principal de calentar todo el molde hasta la temperatura de fusión del PET, y mantenerla constante por un tiempo determinado; por otro lado, tienen la función de comportarse como placas muy rígidas, tal que, presenten pequeñas deflexiones que no generen deformaciones resaltantes en los demás elementos del equipo durante el proceso de calentamiento y enfriamiento. Por esta razón, se pretende utilizar un acero de alta resistencia, el cual, con un elevado módulo de elasticidad, ofrezca una elevada rigidez. En nuestro caso se utiliza el acero Chronit, muy utilizado en la aplicación de moldes de alta resistencia [Bohler, 2008].

3.2.1 PLATAFORMA DE CALENTAMIENTO RÍGIDA

Tal como se mencionó en la sección 3.1.2, para que la carga puntual que ejerce la prensa sobre la placa de calentamiento se transmita como una carga uniformemente distribuida hacia el molde es indispensable que aquella posea una elevada rigidez. Según la norma ASTM D 1037 – 06a, la deflexión máxima permisible en el espesor es de ± 1 mm, por lo tanto, la deflexión máxima de la plataforma ante la carga puntual no

debe sobrepasar este valor. Para determinar la expresión de deflexión máxima, se asume a la plataforma como una placa rectangular simplemente apoyada en sus extremos, figura 3.17.

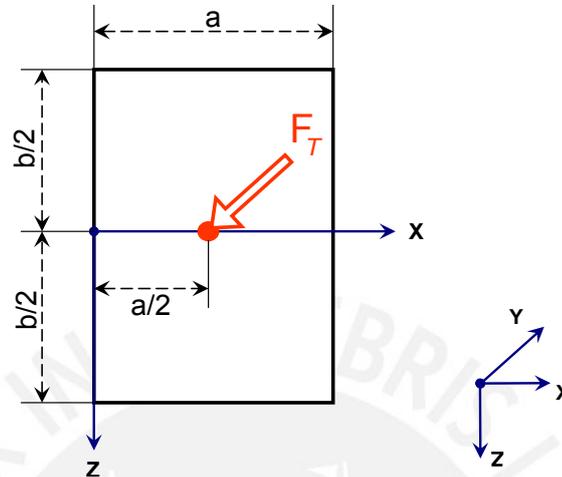


Figura 3.17. Plataforma rectangular con carga puntual central apoyada en sus extremos [Timoshenko, 1970].

La deflexión máxima se presenta en el centro de la placa. Según el análisis de Teoría de Placas y Láminas de Timoshenko, la deflexión máxima δ_{MAX} resulta:

$$\delta_{MAX} = \alpha (F_T \cdot a^2 / EI) \quad (3.15)$$

Donde,

$\delta_{MAX} = 1mm$: Deflexión permisible de la plataforma de calentamiento.

α : Factor numérico dependiente del cociente b/a de los lados de la plataforma, tabla 3.3.

$F_T = 10toneladas$: Fuerza total ejercida por la prensa.

$a = 240mm$: Longitud característica propuesta para la plataforma.

$E_a = 2,1 \times 10^5 N/mm^2$: Módulo de elasticidad del acero Chronit.

$I = a \cdot e^3 / 12$: Inercia de la plataforma.

e : Espesor de la plataforma.

Tabla 3.3. Valores de α para varias relaciones de a/b [Timoshenko, 1970].

b/a	1,0	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	Infinito
$\alpha =$	0,01160	0,01265	0,01353	0,01484	0,01570	0,01620	0,01651	0,01690	0,01695

Para un $b = 400mm$, figura 3.17; se halla, interpolando, un $\alpha = 0,01590$. Es esta manera de la ecuación 3.15, se resuelve que:

$$e \geq 2,29 \times \sqrt[3]{\alpha \cdot F_T \cdot a / E \cdot \delta_{MAX}} = 2,6mm \quad (3.16)$$

Finalmente, se concluye el espesor mínimo para cada plataforma de calentamiento es 3mm; sin embargo, a este valor se tiene que añadir el espesor de las resistencias eléctricas, de tal manera que éstas vayan incrustadas en las plataformas.

3.2.2 CALENTAMIENTO DE LAS PLATAFORMAS

Es necesario determinar el mínimo calor requerido durante el proceso de calentamiento, de tal manera, que haya un consumo de energía eléctrica eficiente. En base al análisis realizado en el segundo capítulo, se propone el uso de resistencias eléctricas de Nicrom para el calentamiento, debido a su facilidad de entrega calor y control.

Además, como se detalló en la sección 1.3.2.1, para reducir el porcentaje de degradación de la madera, las plataformas de calentamiento se mantendrán a una temperatura un poco más por encima de la T_m del PET, es decir $270^\circ C$, por un lapso de tiempo corto, pero suficiente para fundir el termoplástico.

De esta manera, podemos determinar la energía necesaria que deben de suministrar las resistencias eléctricas para fundir el PET " E_{fus} ", mediante la siguiente expresión:

$$E_{fus} = (c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T)_{molde} + (e_{PET} \cdot V)_{probeta} \quad (3.17)$$

Donde,

$$c_{p-molde} = 883 J / kg \cdot ^\circ C \quad : \text{Calor específico del Alumold [Bohler, 2008].}$$

- $\rho_{molde} = 2787 \text{ kg} / \text{m}^3$: Densidad del Alumod.
 $V_{molde} = 2,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$: Volumen neto de Alumold del molde.
 $\Delta T_{molde} = 250 \text{ }^\circ \text{C}$: Incremento de temperatura desde los 20°C.
 $e_{PET} = 360 \text{ J} / \text{cm}^3$: Energía necesaria para la fusión del PET por unidad de volumen, tabla1.2.
 $V_{probeta} = 1160 \text{ cm}^3$: Volumen neto de la probeta.

De la ecuación 3.17, se obtiene:

$$E_{fus} = 2140,2 \text{ kJ} \quad (3.18)$$

En el proceso de calentamiento se considera una eficiencia de entrega de calor al molde de 70%, debido a que la disipación de calor al ambiente, por una de las caras de cada plataforma, será reducida con el uso de aislantes térmicos. Por otro lado, desde que las dos plataformas de calentamiento entran en contacto con el molde, se propone un tiempo de fusión del PET menor a 15 minutos. Con todo ello, se obtiene que la potencia a entregar por cada plataforma deba ser 2 kW.

3.2.2.1 RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

Con los parámetros de temperatura máxima y potencia requerida para el proceso de calentamiento, para cada plataforma se selecciona una resistencia eléctrica de Nicrom de 8mm de diámetro y 2 metros de longitud. Estas resistencias se caracterizan por generar una gran cantidad de potencia calorífica, la cual puede ser controlada electrónicamente; ésta es una gran ventaja pues permitiría generar una temperatura adecuada y calor suficiente para fabricar probetas con distintos tipos de polímeros y fibras de manera.

3.3 DISEÑO DE LAS PLATAFORMAS DE ENFRIAMIENTO

El objetivo del análisis es encontrar las dimensiones, material y características de operación óptimas de las plataformas de enfriamiento para el molde.

Las plataformas de enfriamiento tienen la función principal de refrigerar el molde en el menor tiempo posible; de tal manera que las propiedades físicas, mecánicas y químicas de la probeta no se vean reducidas a causa de la degradación térmica, como se menciona en la sección 1.3.2.1.

Como se aprecia en la figura 1.8, a medida que se incrementa el tiempo de permanencia a una temperatura superior a los 220°C e inferior a los 275°C, aumenta el porcentaje de degradación molecular de la madera; por ello, se requiere enfriar la probeta hasta una temperatura de 75°C, en la cual se detiene casi completamente el proceso de degradación y se paraliza el comportamiento plástico de la madera producido por la lignina a alta temperatura.

En la figura 3.18 se aprecia la ubicación de las superficies de transferencia de calor de las plataformas respecto al molde.

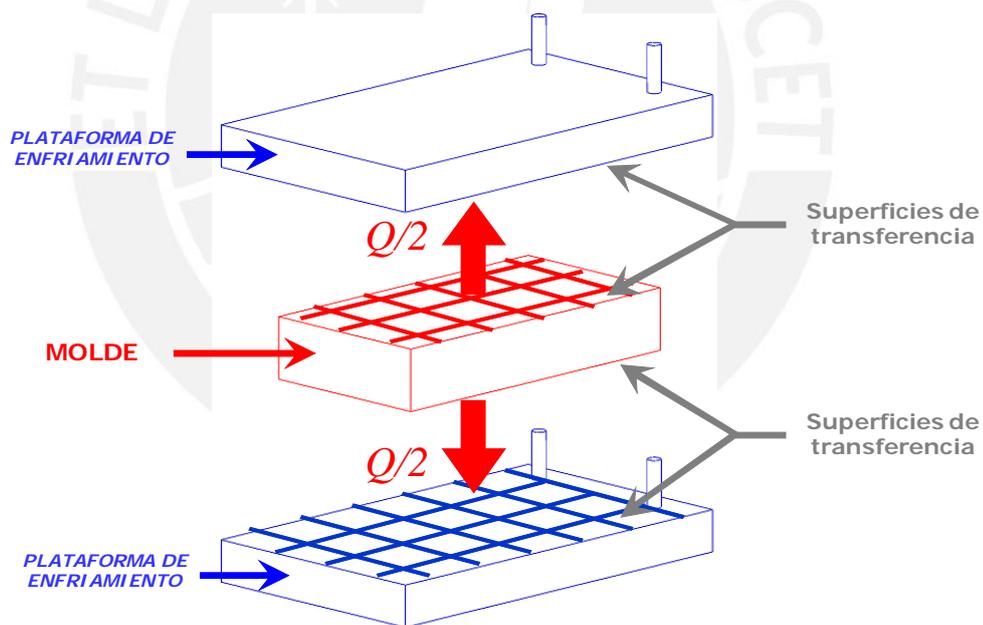


Figura 3.18. Disposición de las plataformas de enfriamiento y superficie de transferencia.

La existencia de dos plataformas de enfriamiento, una superior y otra inferior, se debe a que dicha configuración acelerará el tiempo de enfriamiento total del molde; ya que la capacidad de refrigeración se duplica debido a la extracción de la mitad de la energía interna del molde por cada cara de las plataformas.

El líquido de enfriamiento a utilizar es agua, debido a que éste tiene una alta capacidad para absorber calor, no es abrasivo, y posee una temperatura de cambio de fase elevada.

3.3.1 DIMENSIONAMIENTO DE LOS CANALES INTERNOS DE LAS PLATAFORMAS

Durante el proceso de enfriamiento, tanto el molde como las plataformas de enfriamiento se encuentran sometidos a una fuerza compresiva; esta fuerza se usa para mantener y obtener espesores exactos y, además, eliminar la formación de cavidades de aire en la probeta. Por ello, es necesario diseñar las plataformas de enfriamiento, de tal manera que resistan una presión de trabajo máxima de 1720 kPa.

En la figura 3.19 se aprecia la geometría propuestas para los canales de enfriamiento internos, por los cuales circulará el agua; y el área de contacto resistente, el cual soportará directamente la fuerza de compresión.

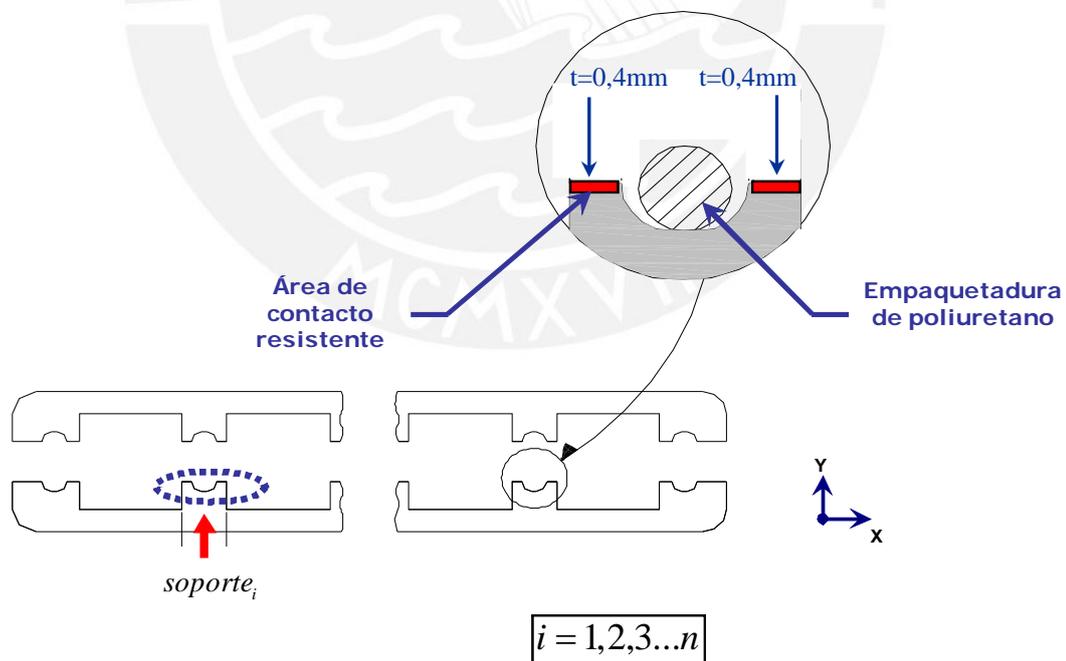


Figura 3.19. Geometría de los canales internos y área de contacto resistente de cada plataforma de enfriamiento.

Para establecer la geometría interna de los canales, se ha dispuesto que el material a usar sea el acero Chronit, el cual posee buenas características de conductividad térmica, resistencia a la corrosión y fácil mecanizado.

Asimismo, para determinar el número óptimo de canales de enfriamiento, es indispensable encontrar el número mínimo de soportes internos en cada plataforma, los cuales soportarán la fuerza compresiva. Para ello, se establece la siguiente expresión:

$$\sigma_c = F_T / [L \times 2 \times t \times (n - 1)] \leq \sigma_{F-C} / FS \quad (3.19)$$

Donde,

- σ_c : Esfuerzo admisible de compresión.
 $L = 250 \text{ mm}$: Largo disponible para soportes internos.
 $t = 0,4 \text{ mm}$: Ancho disponible para soportes internos.
 n : Número de canales de enfriamiento.
 $\sigma_{F-C} = 1300 \text{ N} / \text{mm}^2$: Esfuerzo de fluencia del acero Chronit.
 $FS = 8$: Factor de seguridad para moldes [Vidosic, 1957].

Después de resolver la ecuación 3.19, se obtiene:

$$n \geq 4,1 \quad (3.20)$$

Debido a que la entrada y salida de cada canal se debe encontrar en un mismo lado en cada plataforma, para facilitar la operación durante la fabricación, es necesario que el número de canales internos sea par; por lo tanto, se requiere de seis canales de enfriamiento con un solo recorrido de agua, ver figura 3.20.

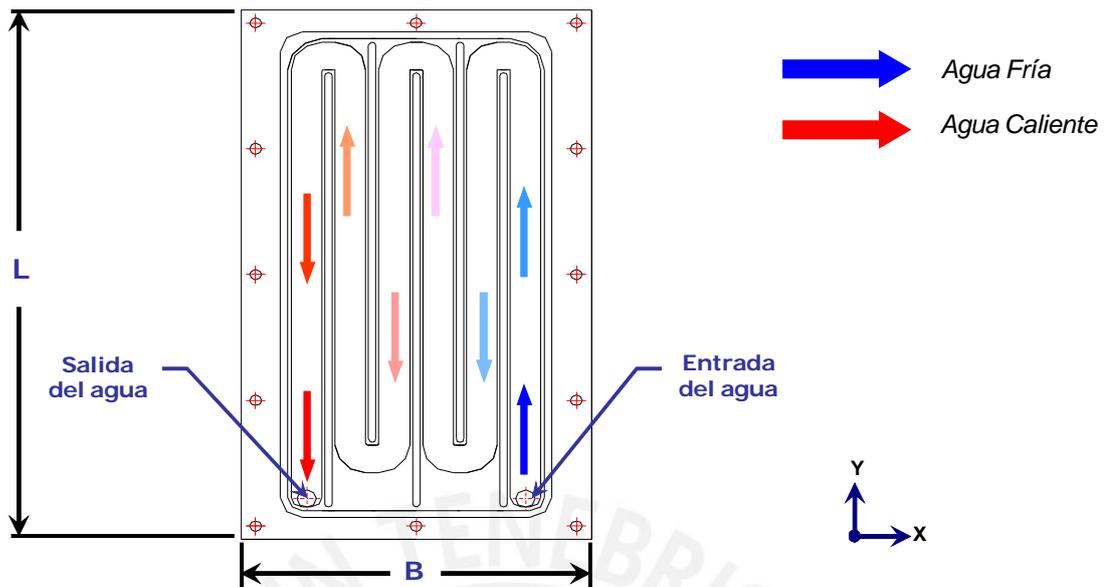


Figura 3.20. Configuración de un solo recorrido de los canales de enfriamiento.

A continuación, se halla el ancho de cada canal “ b_{canal} ” con la siguiente expresión:

$$b_{canal} = [B - 9(n - 1)]/n = 21\text{ mm} \quad (3.21)$$

Donde,

$$B = 172\text{ mm} \quad : \text{ Ancho disponible para la plataforma de enfriamiento.}$$

Finalmente, para determinar la altura de cada canal, antes es indispensable establecer el flujo de agua necesario para el enfriamiento, esto se determina en la sección 3.3.3.

3.3.2 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para determinar el tiempo necesario de enfriamiento del molde desde 270°C hasta 75°C es necesario analizar, simplificar y determinar las relaciones matemáticas que modelen el fenómeno de transferencia de calor total. Para ello, se analizan los aspectos geométricos y físicos de los componentes y, sobre todo, los mecanismos de transferencia de calor más relevantes.

3.3.2.1 GEOMETRÍA DEL MOLDE Y DE LAS PLATAFORMAS DE ENFRIAMIENTO

Algunas características geométricas y físicas de los materiales limitan el grado de transferencia de calor y, de esta manera, el tiempo de enfriamiento. A continuación, se mencionan las principales: el área efectiva real de transferencia de calor y la rugosidad superficial de las áreas de contacto.

- **ÁREA EFECTIVA DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

Para los efectos de la transferencia de calor, un análisis detallado muestra que existe un área de transferencia menor a la superficie de contacto entre del molde y las placas de enfriamiento; esto se debe al espacio que ocupan los soportes internos dentro de las plataformas, por ello, es necesario hablar una superficie efectiva de transferencia de calor " A_{efect} ", en la cual el flujo de calor se asemeje su comportamiento real, figura 3.21.

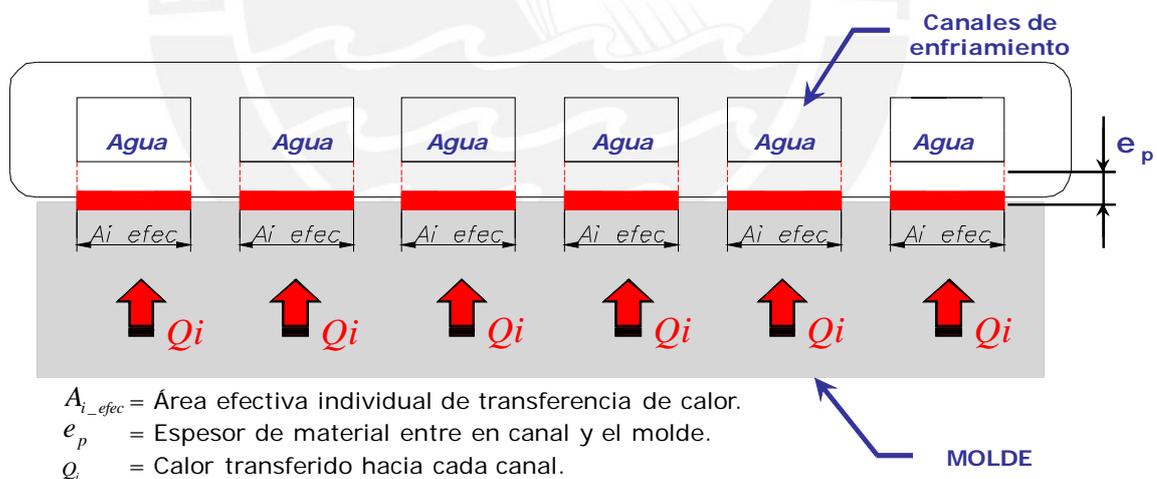


Figura 3.21. Área efectiva de transferencia de calor.

Con el resultado de la ecuación 3.21, el área efectiva " A_{efect} " resulta:

$$A_{efect} = b_{canal} \times L \times n = 0,0353m^2 \quad (3.22)$$

- RUGOSIDAD SUPERFICIAL ENTRE LAS ÁREAS DE CONTACTO

La existencia de una rugosidad superficial en el área de contacto entre el molde y las plataformas de enfriamiento afecta de manera muy desfavorable la transmisión de calor, ya que el volumen de aire que se almacena en las irregularidades de esta superficie actúa como un aislante térmico efectivo, figura 3.22.

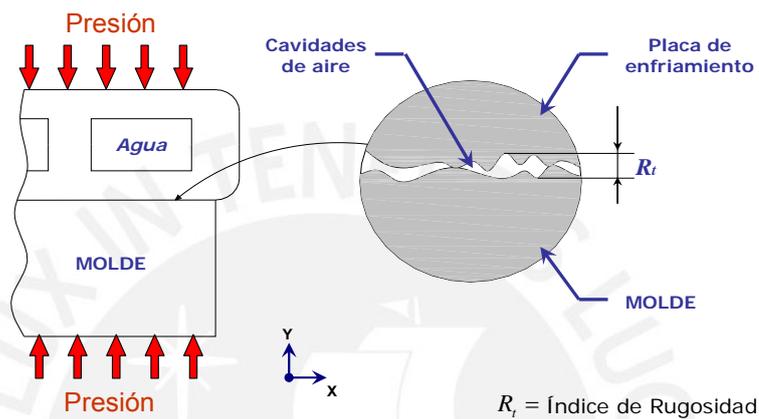


Figura 3.22. Rugosidad superficial de las superficies de contacto.

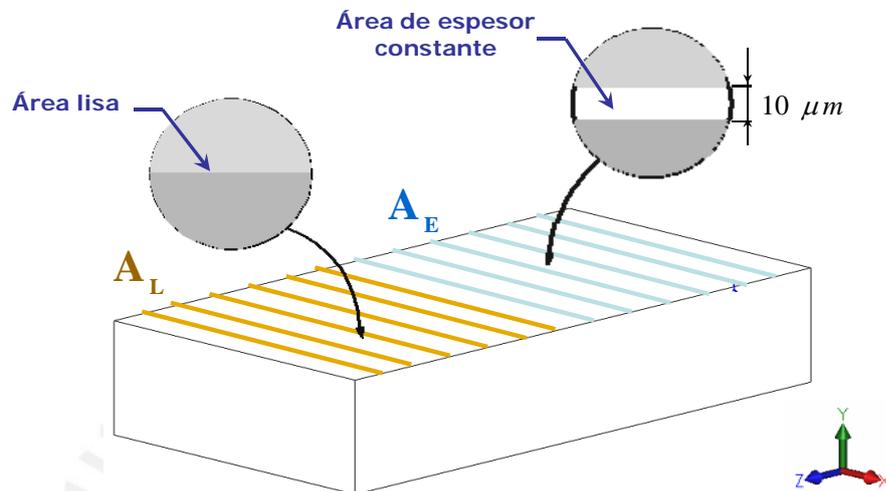
Sin embargo, la presencia de la presión hace que la rugosidad se reduzca; consecuentemente, los volúmenes de aire disminuyen; por lo tanto, el efecto aislante total se atenúa levemente.

Debido a que en esta área de contacto se presenta, principalmente, una transferencia de calor por conducción, es necesario cuantificar el efecto aislante de las cavidades de aire en la transferencia de calor.

Durante la fabricación se pretende obtener un índice de rugosidad " R_r " igual a $3,2\mu m$ en las superficies de contacto de los platos del molde y las plataformas de enfriamiento, lo cual se puede conseguir a través alisado; sin embargo, para el cálculo se considerará un R_r igual a $10\mu m$, debido a que después de un cierto tiempo la rugosidad aumentará a causa del uso del equipo.

Finalmente, con la información mencionada y para efectos del cálculo de transferencia de calor, se asume que el efecto aislante total de la rugosidad es igual al efecto

aislante producido por una mitad del área efectiva de transferencia de calor separada por un espesor de $10\mu m$ de aire quieto; mientras que la otra mitad se asume sin rugosidad alguna, es decir, completamente lisa figura 3.23.



$$A_L = A_E = (A_{efect} / 2) = 0,0176m^2$$

A_L = Área lisa.

A_E = Área de espesor constante de $10\mu m$

Figura 3.23. Aproximación de las superficies de transferencia de calor.

3.3.2.2 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR MÁS RELEVANTES

En todo proceso real de transferencia de calor están presentes tres mecanismos: conducción, convección y radiación térmica. Sin embargo, después de un análisis preliminar, alguno de estos mecanismos puede ser despreciado, pues al contrastar la magnitud de calor que transfiere uno en comparación a los otros aquel puede ser insignificante. Por ello, se analiza la influencia de cada mecanismo de transferencia de calor presente durante el enfriamiento del molde.

En primer lugar, **la conducción** se define como la transferencia de calor a través de un cuerpo sólido debido a un gradiente de temperatura. Además, la conducción de calor es directamente proporcional al gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor.

Según la geometría del equipo, el flujo de calor debe atravesar, desde el molde, los volúmenes de aire almacenados en las irregularidades y el material de las plataformas de enfriamiento, figuras 3.21 y 3.22. Por ello, este mecanismo de transferencia se establece como uno de los principales en el proceso de enfriamiento; es necesario analizar y calcular su magnitud.

En segundo lugar, se analiza **la convección**. Ésta se produce únicamente en materiales fluidos; además, se caracteriza porque se produce a través del desplazamiento de partículas entre regiones con diferentes temperaturas [Holman, 1990]. Según esto, la convección se presenta en dos sectores: en las paredes exteriores del molde en contacto con el aire y en el flujo de agua que circula por los canales de enfriamiento de las plataformas.

En las paredes exteriores del molde se presente una convección natural debido al contacto directo con el aire ambiental, el gradiente de temperaturas en el aire sometido a un campo gravitacional origina una variación de densidades y, en consecuencia, se genera el movimiento ascendente del aire caliente menos denso y el descendente del aire frío más denso. Por otro lado, existe una convección forzada debido al flujo de agua que circula por los canales de enfriamiento, esta última forma de convección generalmente produce una mayor transferencia de calor.

Finalmente, el último mecanismo de transferencia de calor por analizar es el de **radiación térmica**, ésta se define como la radiación electromagnética emitida por un cuerpo como resultado de su temperatura. La magnitud del flujo de calor está relacionada con la temperatura de manera exponencial; sin embargo, como se muestra más adelante en la sección 3.3.4, el tiempo total de enfriamiento del molde es corto para que este mecanismo transmita una cantidad considerable de calor, por ello, no es relevante en el cálculo. Cabe mencionar que el desprecio de este mecanismo será favorable pues, en la realidad, el pequeño flujo de calor que se disipe durante el funcionamiento del equipo hará que se obtenga un tiempo de enfriamiento menor que el hallado teóricamente.

En conclusión, se considerará solamente la conducción y la convección como los mecanismos más importantes en la transferencia de calor durante el enfriamiento.

3.3.3 MODELO MATEMÁTICO GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El modelo matemático global de transferencia de calor es hallado para encontrar el tiempo total de enfriamiento del molde. El flujo total de calor se determina de la siguiente manera:

$$Q_{TOTAL} = Q_A + Q_B \quad (3.23)$$

Donde,

Q_A : Calor transferido del molde hacia las plataformas de enfriamiento.

Q_B : Calor transferido del molde hacia el aire ambiental, fig. 3.24.

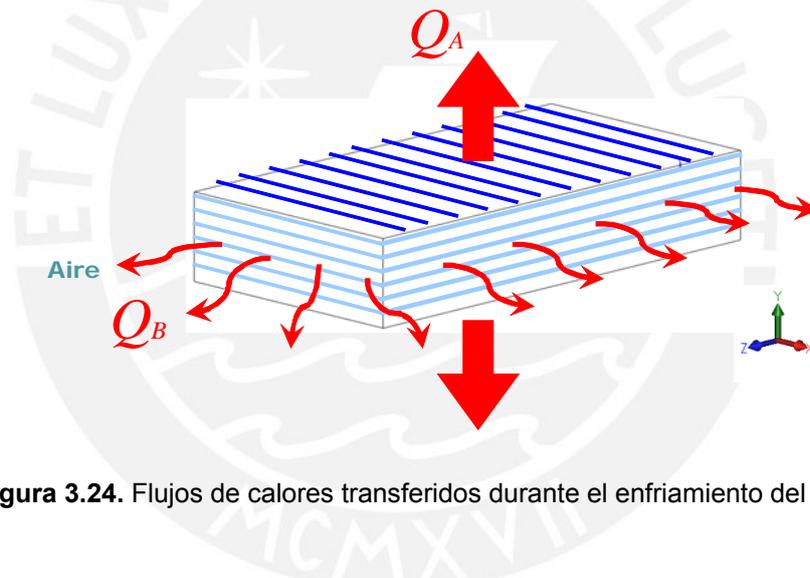


Figura 3.24. Flujos de calores transferidos durante el enfriamiento del molde.

En primer lugar, se determina el calor transferido del molde hacia las plataformas de enfriamiento " Q_A ", en el cual se presenta una transferencia por conductividad y convección forzada, a través de los elementos del equipo y el flujo de agua de los canales de enfriamiento, respectivamente. Es importante mencionar que la temperatura del molde no permanece constante durante el proceso de enfriamiento, pues a medida que transcurre el tiempo, el molde pierde energía y, por lo tanto, su temperatura disminuye. Esta consideración es muy importante pues el flujo de calor no será constante, sino que irá disminuyendo considerablemente.

A continuación, se establece la siguiente analogía eléctrica del proceso de transferencia de calor " Q_A ", figura 3.25.

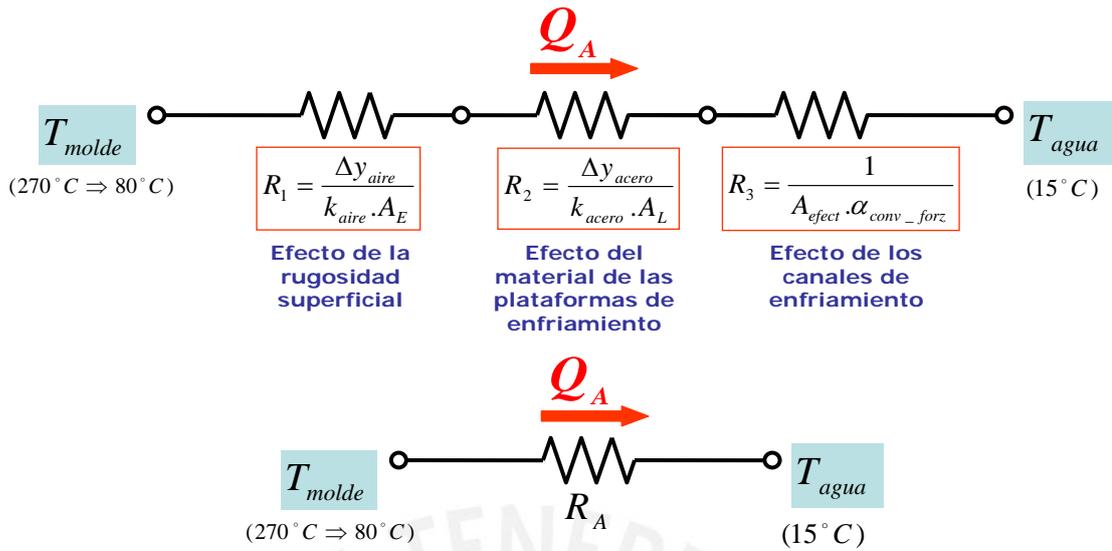


Figura 3.25. Analogía eléctrica del proceso de transferencia de calor del molde hacia las plataformas de enfriamiento.

De esta manera se puede escribir:

$$Q_A = \frac{T_{molde} - T_{agua}}{\frac{\Delta y_{aire}}{k_{aire} A_E} + \frac{\Delta y_{acero}}{k_{acero} A_L} + \frac{1}{A_{efect} \alpha_{conv_forz}}} = \frac{T_{molde} - T_{agua}}{R_A} \quad (3.24)$$

Donde,

T_{molde} : Temperatura del molde, desde 270°C hasta 75°C.

$T_{agua} = 15^\circ C$: Temperatura del agua de enfriamiento.

$\Delta y_{aire} = 10 \mu m$: Espesor de aire debido a la rugosidad superficial.

$\Delta y_{acero} = 1600 \mu m$: Espesor de acero entre el molde y los canales de enfriamiento.

$k_{aire} = 0,035 W/m^\circ C$: Coeficiente de conductividad térmica para el aire quieto a una temperatura promedio de 150°C [Holman, 1990].

$k_{acero} = 164 W/m^\circ C$: Coeficiente de conductividad térmica del acero [Holman, 1990].

α_{conv_forz} : Coeficiente de convección forzada.

$R_A = R_1 + R_2 + R_3$: Resistencia térmica equivalente.

El valor de “ α_{conv_forz} ” está firmemente relacionado con el caudal de agua que circula por los canales de enfriamiento, por ello, su valor final se concluye más adelante; sin embargo, se plantea la expresión matemática que hace posible su determinación

Para un fluido turbulento, como es el caso de agua dentro de canales de enfriamiento, se utiliza la correlación propuesta por F.W. Dittus y L.M.K. Boelter para un $10000 \leq Re \leq 120000$ [F.W. Dittus 1930].

$$\alpha_{conv_forz} = 0,023 \left(Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot k_{agua} \right) / D_h \quad (3.25)$$

Donde, para una temperatura del agua a 15°C [Holman, 1990]:

- $Re = V_a \cdot \rho \cdot D_h / \mu$: Número adimensional de Reynolds.
 $Pr = 7,8477$: Número adimensional de Prandtl.
 $k_{agua} = 0,5904 W / m^\circ C$: Coeficiente de conductividad térmica.
 $\rho = 998,9 kg / m^3$: Densidad.
 V_a : Velocidad del agua por los canales de enfriamiento.
 $\rho = 998,9 kg / m^3$: Densidad.
 D_h : Diámetro hidráulico de los canales de enfriamiento.
 $\mu = 1107,2 \times 10^{-6} Ns / m^2$: Viscosidad dinámica.

Los valores finales de V , D_h y α_{conv_forz} se determinan en la sección 3.3.4, ya que estos tres dependen del caudal de agua y están relacionados con el tiempo de enfriamiento.

En segundo lugar, se establece la expresión para hallar la magnitud de calor transmitido por convección natural del molde hacia el aire ambiental “ Q_B ”. En el análisis se considera al aire ambiental como aire quieto, es decir, que no posee velocidad alguna en contacto con las paredes exteriores del molde, esto se debe a que el equipo se encontrará dentro de un ambiente cerrado durante el proceso de fabricación.

A continuación, se establece la siguiente analogía eléctrica del proceso de transferencia de calor “ Q_B ”, figura 3.26.

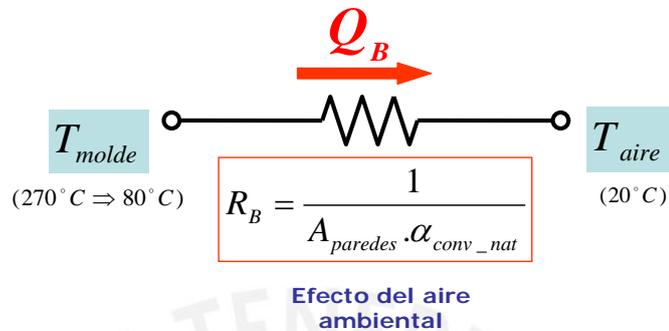


Figura 3.26. Analogía eléctrica del proceso de transferencia de calor del molde hacia el aire ambiental.

De la misma manera, se puede escribir:

$$Q_B = \frac{T_{molde} - T_{aire}}{\frac{1}{A_{paredes} \cdot \alpha_{conv_nat}}} = \frac{T_{molde} - T_{aire}}{R_B} \quad (3.26)$$

Donde,

$T_{aire} = 20^\circ C$: Temperatura del aire ambiental.

$A_{paredes} = 0,0299 m^2$: Área lateral externa de las paredes del molde.

α_{conv_nat} : Coeficiente de convección natural para aire quieto.

$R_B = 1/A_{paredes} \cdot \alpha_{conv_nat}$: Resistencia equivalente.

El valor de “ α_{conv_nat} ”, para el caso de la transferencia de calor por aire quieto en convección natural, se determina mediante la correlación propuesta por McAdams [McAdams, 1954]:

$$\alpha_{conv_nat} = \frac{0,59 (Gr \cdot Pr)^{1/4} \cdot k_{aire_q}}{L_p} \quad (3.27)$$

Donde, para una temperatura del aire a 20°C [Holman, 1990]:

- Gr : Número adimensional de Grashof.
 $Pr = 0,7117$: Número adimensional de Prandtl.
 $k_{aire_q} = 0,0257 W/m^{\circ}C$: Coeficiente de conductividad térmica para aire quieto.
 $L_p = 0,325 m$: Longitud característica de las paredes del molde.

Debido a que las superficies externas de las paredes del molde son planas y se encuentran en posición vertical se utiliza la siguiente expresión para hallar el valor de “ Gr ” [McAdams, 1954]:

$$Gr = \left(\frac{\rho^2 L_p^3 g (\Delta T / T)}{\mu^2} \right) = 9,7 \times 10^8 \quad (3.28)$$

Donde, para una temperatura del aire ambiental a 20°C [Holman, 1990]:

- $\rho = 1,2045 kg / m^3$: Densidad del aire.
 $g = 9,81 m / s^2$: Aceleración de la gravedad.
 $\Delta T = 255 K$: Diferencia de temperaturas entre el molde y el aire.
 $T = 273 K$: Temperatura del aire ambiental.
 $\mu = 18,19 \times 10^{-6} Ns / m^2$: Viscosidad dinámica.

Con la expresión 3.27 y con el resultado de la ecuación 3.28, “ α_{conv_nat} ” resulta:

$$\alpha_{conv_nat} = 7,5 W / m^2 \text{ } ^{\circ}C \quad (3.29)$$

Tras haber analizado de manera individual cada una de los mecanismos de transferencia de calor más relevantes y en base a las ecuaciones 3.23, 3.24 y 3.26 se formula finalmente:

$$Q_{TOTAL} = \frac{T_{molde} - T_{agua}}{R_A} + \frac{T_{molde} - T_{aire}}{R_B} \quad (3.30)$$

Como se mencionó, es imprescindible considerar el descenso constante de la temperatura del molde durante el enfriamiento. El cambio de temperatura del molde desde 270°C a 75°C se interpreta como un aumento del tiempo de enfriamiento, pues la transferencia de calor se hace cada vez menor a medida que la temperatura del molde desciende.

Con el uso del método de la capacidad térmica global [Holman, 1990] y la ecuación 3.30, se formula la siguiente expresión:

$$\left(-c_{p_molde} \cdot \rho_{molde} \cdot V_{molde} \frac{dT_{molde}}{dt}\right) = \frac{T_{molde} - T_{agua}}{R_A} + \frac{T_{molde} - T_{aire}}{R_B} \quad (3.31)$$

Donde:

$$V_{molde} = 0,004 \text{ m}^3 \quad : \text{Volumen del molde.}$$

Reordenando y resolviendo la expresión 3.31 se obtiene el modelo matemático que permite obtener el tiempo de enfriamiento total del molde t_{enf} :

$$t_{enf} = (-c_p \rho V)_{molde} \left[R_A R_B \int_{T_1=270^\circ C}^{T_2=80^\circ C} \frac{dT_{molde}}{(R_A + R_B)T_{molde} - (R_A T_{aire} + R_B T_{agua})} \right]$$

$$t_{enf} = (-c_p \rho V)_{molde} \left[R_A R_B \left[\frac{1}{(R_A + R_B)} \cdot \ln((R_A + R_B)T_{molde} - (R_A T_{aire} + R_B T_{agua})) \right]_{270^\circ C}^{75^\circ C} \right]$$

$$t_{enf} = (-c_p \rho V)_{molde} \left[\frac{R_A R_B}{(R_A + R_B)} \cdot (\ln(55R_A + 60R_B) - \ln(250R_A + 255R_B)) \right] \quad (3.32)$$

3.3.4 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO

Tal como se menciona en la sección 3.3.3, la magnitud de caudal de agua que fluye a través de los canales de enfriamiento determina el tiempo total de enfriamiento del molde. Sin embargo, para obtener un óptimo valor de caudal de agua es indispensable considerar otros parámetros importantes de diseño y de operación que están estrechamente relacionados:

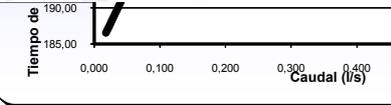
- **Dimensión de los canales de enfriamiento:** La magnitud de caudal determina las dimensiones de los canales de enfriamiento para una velocidad constante de agua. Debido a que el ancho ya está establecido, la altura varía de acuerdo al caudal. Sin embargo, a mayor altura de canal, mayor es el espesor y material requerido para la fabricación de la plataforma de enfriamiento.

- Capacidad de la bomba de agua: La capacidad de bombeo debe de ser lo suficiente para suministrar el agua necesaria para el enfriamiento. No obstante, mientras menor sea la capacidad de la bomba, menor será el costo de inversión y de operación.
- Caída de presión: Debe haber un flujo continuo de agua en todo el recorrido a través de las tuberías y canales de enfriamiento.

Para el cálculo se establece una velocidad de flujo de agua de 1,0 m/s; valores inferiores a 0,8 m/s pueden producir sedimentaciones, mientras que valores superiores a 1,5 m/s pueden provocar mucho ruido y erosiones en las tuberías [Mendiluce, 1966].

En base a las ecuaciones 3.26 y 3.32, la tabla 3.4 muestra los valores de tiempo de enfriamiento para diferentes magnitudes de caudal de agua en cada plataforma.

Tabla 3.4. Análisis del tiempo de enfriamiento vs. Caudal de agua.



Caudal (l/s)	Altura canal (mm)	α (W/m ² °C)	R_A (°C/W)	Tiempo de enfriamiento (s)	Tiempo de enfriamiento (min)
0,018	1	6844	0,02587	4,4713	186,56
0,060	3	5462	0,02692	4,4713	194,06
0,102	5	4995	0,02740	4,4713	197,55
0,165	8	4642	0,02783	4,4713	200,64
0,207	10	4499	0,02803	4,4713	202,03
0,312	15	4277	0,02836	4,4713	204,38
0,417	20	4147	0,02856	4,4713	205,86
0,627	30	3999	0,02882	4,4713	207,67

Para una mejor apreciación del efecto del caudal de agua sobre el tiempo de enfriamiento molde se muestra la figura 3.27.

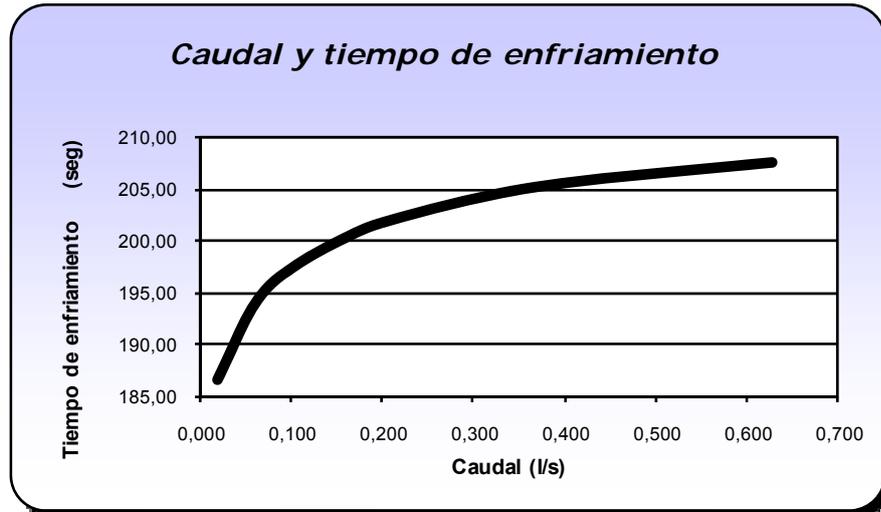


Figura 3.27. Tiempo de enfriamiento vs. Caudal de agua.

Con el uso de un caudal menor a 0,10 l/s se presenta una reducción apreciable del tiempo de enfriamiento, por ello, es conveniente utilizar un caudal entre 0,15 l/s y 0,20 l/s, lo cual nos da un tiempo de enfriamiento menor a 203 segundos. El uso de un mayor caudal de agua demandaría de forma innecesaria una bomba de mayor capacidad y costo. Finalmente, en base a lo anterior, se opta por el uso de 0,207 l/s, lo cual necesita una altura de canal de enfriamiento de 10mm.

3.3.5 CAÍDA DE PRESIÓN DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO

El análisis de la caída de presión del sistema de enfriamiento del molde permite seleccionar una bomba económica que cumpla con los requisitos de suministro de caudal y garantiza un flujo continuo de agua a través de todos los dispositivos, tuberías y accesorios del sistema.

El análisis de pérdidas de presión se realiza en base a las ecuaciones de Bernouille, para ello, se establece la configuración general del sistema de enfriamiento, en este no se muestran las conexiones para la recirculación del agua, figura 3.28.

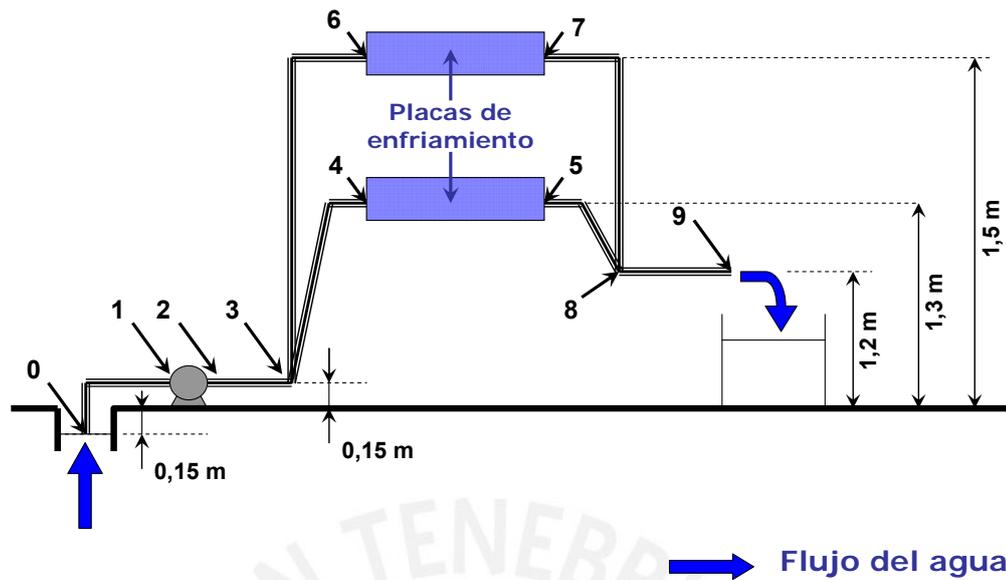


Figura 3.28. Configuración de la instalación del sistema de enfriamiento.

Para determinar las pérdidas que se generan a causa de la diferencia de nivel entre la toma y entrega del agua, se plantea las expresiones para la altura manométrica estática “ $H_{man-estático}$ ” y la altura manométrica dinámica “ $H_{man-dinámico}$ ”:

$$H_{man-estático} = Z_b - Z_a \quad (3.33)$$

$$H_{man-dinámico} = h_{W-tuberías} + h_{W-accesorios} \quad (3.34)$$

Donde:

Z_b : Punto superior de entrega de agua en m.c.a.

Z_a : Punto inferior de entrega de agua en m.c.a.

$h_{W-tuberías}$: Pérdida de presión en las tuberías en m.c.a.

$h_{W-accesorios}$: Pérdida de presión en los accesorios en m.c.a.

Los puntos de entrega de agua Z_a y Z_b son determinados de la figura 3.28; sin embargo, para estimar las pérdidas producidas por “ $h_{W-tuberías}$ ” y “ $h_{W-accesorios}$ ” es necesario expresar cada elemento del sistema en su equivalente de metros de longitud de tubería, mediante el método de las longitudes equivalentes [Val-matic, 2008].

De acuerdo con la configuración del sistema de enfriamiento, fig 3.28, se determinan las longitudes equivalentes de cada tramo. Por otro lado, para el cálculo se asume que la caída de presión en cada plataforma de enfriamiento es igual a la producida por un tubo de 3 m de longitud y 7 codos, simultáneamente, debido a la característica geométrica de los canales de enfriamiento. Asimismo, se establece una velocidad máxima de flujo de agua de 1,0 m/s, tabla 3.5.

Tabla 3.5. Longitudes equivalentes para cada tramo del sistema.

Tramo	Caudal (l/s)	Longitud tubería (m)	Accesorios	Longitud equivalente unitaria (m)	Cantidad	Longitud equivalente total (m)
0 - 1.	0.4	2	1 Val. Compuerta	0.1	1	3.1
			2 Codos	0.5	2	
1 - 2.	0.4	1	3 Codos	0.3	3	1.9
2 - 3.	0.4	2	1 Tee	1	1	4
			2 Codos	0.5	2	
3 - 4.	0.0	1	Cambio de sección expansión Cambio de dirección: Codo	1	1	1.5
3 - 4.	0.4	2	3 Codos	0.5	3	3.5
3 - 6.	0.4	2	3 Codos	0.5	3	3.5
4 - 5.	0.2	3	7 codos	0.5	7	6.5
5 - 6.	0.0	1	Cambio de sección contracción Cambio de dirección: Codo	1	1	1.5
6 - 7.	0.2	3	7 codos	0.5	7	6.5
5 - 8.	0.2	2	3 Codos	0.5	3	3.5
7 - 8.	0.2	2	3 Codos	0.5	3	3.5
8 - 9.	0.0	1	Cambio de sección expansión Cambio de dirección: Codo	1	1	1.5
6 - 7.	0.0	3	7 codos	0.5	7	6.5
10 - 11.	0.0	1	Cambio de sección contracción Cambio de dirección: Codo	1	1	1.5
8 - 9.	0.4	4	3 Codos	0.5	3	5.5

A continuación, para hallar las pérdidas que generan las longitudes equivalentes totales de las tuberías y accesorios “ h_{long_equi} ” se utiliza la expresión de Hazen-Williams para tuberías de diámetro pequeño [Assureira, 2005].

$$h_{long_equi} = h_{w-tuberias} + h_{w-accesorios} = 10.643 .L_e \left(\frac{Q_a}{C} \right)^{1.85} .D^{-4.87} \quad (3.35)$$

Donde:

- L_e : Longitud de tubería equivalente (m).
 Q_a : Caudal de agua (m³/s).
 C : Constante de pérdidas.
 D : Diámetro de la tubería (m).

Para el trabajo se plantea el uso de tuberías de PVC para agua fría, debido a su bajo costo de adquisición y mantenimiento. La constante “C” tiene una gran dependencia del número de Reynolds y del diámetro de la tubería, por ello, se utiliza la siguiente expresión para determinar su magnitud en cada tramo del sistema [Chyr Pyng Liou, 1998]:

$$C = 14.607 \cdot f^{-0.54} \cdot \text{Re}^{-0.08} \cdot D^{-0.01} \cdot \nu^{-0.08} \quad (3.36)$$

Donde:

- f : Factor de fricción de Darcy-Weisbach.
 $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$: Viscosidad cinemática del agua a 20°C.

El valor de “ f ” se determina mediante las curvas del Diagrama de Moody para una rugosidad absoluta de 0,0015 mm de las tuberías de PVC.

En base a las ecuaciones 3.33, 3.34, 3.35 y 3.36, la tabla 3.6 muestra los valores de la altura manométrica total para todos los tramos de la tubería. Para seleccionar la bomba del sistema es necesario considerar que ésta debe suministrar una presión por encima del máximo valor de la altura manométrica total obtenido en cada tramo.

Tabla 3.6. Altura manométrica para cada tramo de tubería.

Tramo	Reynolds	C	hw total (m)	Hman-estático (m)	Hman-dinámico (m)	Hman-Total (m)
0. - 1.	40463	104	4.65	1.5	4.65	6.15
1. - 2.	40463	104	7.15	1.5	7.15	8.65
2. - 3.	20231	107	0.82	1.5	0.82	2.32
3. - 4.	20231	107	1.11	1.5	1.11	2.61
4. - 5.	18640	108	1.87	1.5	1.87	3.37
5. - 6.	20231	107	0.72	1.5	0.72	2.22
6. - 7.	20231	107	2.13	1.5	2.13	3.63
2. - 8.	20231	107	0.82	1.5	0.82	2.32
8. - 9.	20231	107	1.11	1.5	1.11	2.61
9. - 10.	18640	108	1.87	1.5	1.87	3.37
10. - 11.	20231	107	0.72	1.5	0.72	2.22
11. - 12.	20231	107	2.13	1.5	2.13	3.63

Por último, se realiza el cálculo del NPSH del sistema, el cual se define como la altura total de carga a la entrada de la bomba, mediante la siguiente expresión:

$$NPSH = p_{atmosférica} - p_{succión} - p_{fricción} - p_{vapor} = 8,35m.c.a. \quad (3.37)$$

Donde, para una tubería de succión de 2 metros de longitud y agua a 20°C:

$$p_{atmosférica} = 10,2m.c.a. \quad : \text{Presión atmosférica para 200 m.s.n.m.}$$

$$p_{vapor} = 0,4m.c.a. \quad : \text{Presión del vapor de agua a presión atmosférica.}$$

$$p_{fricción} = 1,3m.c.a. \quad : \text{Pérdida de presión en la tubería de succión.}$$

$$p_{succión} = 0,15m.c.a. \quad : \text{Pérdida de presión por succión en la tubería.}$$

Con el valor del NPSH del sistema se completan los parámetros selección de la bomba del sistema de enfriamiento: caudal mínimo de 0,4 l/s, " H_{man_total} " igual a 8,65m.c.a. y NPSH igual a 8,35 m.c.a. Finalmente, se selecciona una bomba de agua periférica de 0,5 HP que satisface los parámetros requeridos.

CAPÍTULO 4

PLANOS Y COSTOS DE FABRICACIÓN

4.1. LISTADO DE PLANOS

Luego del capítulo anterior, el producto que se obtiene es el conjunto de planos de despiece y ensamble del equipo de moldeo. Para un adecuado archivamiento y presentación de los planos, su formato se encuentra estandarizado según la norma ISO 216 (equivalente a la norma DIN 476 y a la UNE 1011), la cual especifica los formatos de papel. Por otro lado, se toma como norma en los cajetines la medida en lo ancho de 160 mm.

Cabe resaltar que los planos elaborados se encuentran en el volumen complementario a este trabajo. A continuación, se listan los planos en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Listado de planos del equipo.

nº Lámina	Título	Formato	Medidas (mm)
1	Equipo para compresión térmica	A2	420 x 594
2	Ensamble y lista de componentes	A2	420 x 594
3	Placa inferior del molde	A3	297 x 420
4	Placa lateral B	A4	210 x 297
5	Placa lateral A	A3	297 x 420
6	Placa superior del molde	A3	297 x 420
7	Placa de extracción	A4	210 x 297
8	Tetón de extracción A	A4	210 x 297
9	Tetón de extracción B	A4	210 x 297
10	Placa de enfriamiento A	A2	420 x 594
11	Placa de enfriamiento B	A2	420 x 594
12	Placa de calentamiento A1	A3	297 x 420
13	Placa de calentamiento A2	A3	297 x 420
14	Placa de calentamiento B1	A3	297 x 420
15	Placa de calentamiento B2	A3	297 x 420
16	Guía de elevación A	A4	210 x 297
17	Guía de elevación B	A4	210 x 297
18	Soporte de elevación	A4	210 x 297

4.2. COSTOS DE FABRICACIÓN

Para un adecuado entendimiento de los costos totales de fabricación, este subcapítulo se divide en el análisis de los costos de materiales y costos de manufactura.

En primer lugar, los costos de los materiales necesarios se distribuyen según los sistemas que componen el equipo: molde, sistema de enfriamiento y sistema de calentamiento, tabla 4.2.

Tabla 4.2. Costo de materiales del equipo por sistema.

DESCRIPCIÓN		COSTO UNITARIO (S/.)	CANT.	PESO TOTAL (kg)	COSTO TOTAL (S/.)
MOLDE					
1	Placa superior - Alumold	170,43	1	4,60	170,43
2	Placa inferior- Alumold	34,34	1	1,73	34,34
3	Placa lateral A - Alumold	11,68	2	1,21	23,36
4	Placa lateral B - Alumold	6,34	2	0,75	12,68
5	Placa de extracción - Alumold	19,56	1	0,85	19,56
6	Pernos DIN - M4	5,92	1	0,12	5,92
TOTALES				9,25	266,29

DESCRIPCIÓN		COSTO UNITARIO (S/.)	CANTIDAD	PESO TOTAL (kg)	COSTO TOTAL (S/.)
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO					
1	Plataforma de enfriamiento A - acero Chronit	129,78	2	24,30	259,56
2	Plataforma de enfriamiento B - acero Chronit	72,36	2	20,30	144,72
3	Bomba de agua 0,5 HP	189,9	1	3,20	189,90
4	Válvulas	98,8	1	1,20	98,80
5	Tuberías	137,74	1	5,00	137,74
6	Correa de poliuretano	52,00	1	0,10	52,00
7	Pernos DIN - M4	4,40	1	0,05	4,40
8	Otros	62,08	1	0,30	62,08
TOTALES				54,45	949,20

DESCRIPCIÓN		COSTO UNITARIO (S/.)	CANTIDAD	PESO TOTAL (kg)	COSTO TOTAL (S/.)
SISTEMA DE CALENTAMIENTO					
1	Plataforma de calentamiento A - acero Chronit	58,55	2	16,64	117,10
2	Plataforma de calentamiento B - acero Chronit	13,75	2	9,28	27,50
3	Guía de elevación A - acero Chronit	0,95	4	0,51	3,80
4	Guía de elevación B - acero Chronit	5,40	4	7,45	21,60
5	Tetones de extracción A - acero Chronit	0,38	8	0,35	3,04
6	Tetones de extracción B - acero Chronit	0,32	8	0,35	2,56
7	Termo-magnética 3x65 AMP	288	1	0,05	288,00
8	Controladores de temperatura TOKY	205,9	2	0,05	411,80
9	Termocuplas tipo J	94,86	4	0,01	379,44
10	Contactores	595,35	2	0,05	1.190,70
11	Tablero de control	1029,50	1	1,50	1.029,50
12	Planchas de barlán	97,10	3	0,75	291,30
13	Pernos DIN - M4	4,40	1	0,05	4,40
14	Otros	64,57	1	1,50	64,57
TOTALES				38,54	3.835,31

En segundo lugar, para precisar los costos de manufactura, lo cual comprende: alquiler del equipo de mecanizado, mano de obra, suministro de energía y consumibles; se hace referencia al criterio de cobranza del ente que brinda el servicio de fabricación, normalmente una metalmecánica. El método de cobro utilizado es cantidad de dinero facturado por kilogramo fabricado, en este caso S/.9.5/kg.

A continuación, en la tabla 4.3 se presentan los costos de manufactura totales necesarios para fabricar el equipo.

Tabla 4.3. Costo de manufactura totales.

ELEMENTO		PESO (kg)	COSTO (S./kg)	COSTO TOTAL (S/.)
1	Molde	9,25	9,5	87,88
2	Sistema de enfriamiento	54,45	9,5	517,28
3	Sistema de calentamiento	34,58	9,5	328,56
4	Otros	10	9,5	95,00
TOTAL				1.028,71

Finalmente, para concluir el análisis se muestra un resumen con los costos totales de manufactura del equipo, tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resumen de gastos totales.

ELEMENTO		PESO (kg)	COSTO (S/.)	COSTOS (%)
1	Mat eriales	98,29	5.050,80	81,7%
1.1	Molde	9,25	297,29	4,8%
1.2	Sistema de enfriamiento	54,45	949,20	15,4%
1.3	Sistema de calentamiento	34,58	3.804,31	61,6%
2	Manuf act ura	0,00	1.028,71	16,6%
3	Ot ros	10,00	100,00	1,6%
TOTAL		108,29	6.179,51	100%

Para un cambio de S/.2.89/dólar a la fecha del 25 de febrero del 2008, el costo del equipo asciende a 2 135 dólares.

CONCLUSIONES

1. Se ha diseñado un molde capaz de cumplir con las especificaciones de fabricación de probetas de madera compuesta, en lo referente a dimensiones y tolerancias, según la norma internacional ASTM D 1037 – 06a.
2. El equipo de moldeo puede soportar una presión de trabajo máxima de 1.72 MPa sobre la probeta, la cual es indispensable para minimizar la presencia de discontinuidades, bolsas de aire y cavidades en ésta.
3. El equipo de moldeo no realiza la función de mezclar homogéneamente los elementos constituyentes de la probeta antes de su procesamiento en el molde; esto es una desventaja, pues tal limitación favorece a obtener un producto con menores propiedades mecánicas que otro, en el que si se realiza un adecuado proceso de mezclado previo.
4. Luego de la investigación de la degradación térmica de los refuerzos naturales a altas temperaturas, se concluye que éstos no se degrada instantáneamente, sino que existe un período de tiempo que posibilita conservar, de forma parcial, las propiedades mecánicas y físicas de aquellos, durante del proceso de fabricación de la probeta.
5. Es posible minimizar la degradación térmica que sufre la celulosa mediante un enfriamiento acelerado; mientras más rápido sea el enfriamiento, en mayor medida se conservarán las propiedades mecánicas y físicas de ésta.
6. El diseño de los accesorios del molde: Principalmente, plataformas de calentamiento y enfriamiento propician, por sus características de operación, la conservación de las propiedades mecánicas y físicas de los elementos constituyentes de la probeta, fundamentalmente, las de las fibras naturales.
7. En base a sólo los elementos constituyentes de la probeta, residuos sólidos recuperados y/o reciclados, se concluye que el costo del producto sería menor respecto a la gran gama de productos madereros compuestos que se ofrecen en el

mercado, esto posibilitaría su adquisición por personas de bajos recursos económicos.



BIBLIOGRAFÍA

- [ACI, 2004]** ACI - Perú. American Concrete Institute (2004). El Ingeniero Civil. Revista mensual, Diciembre del 2004. Lima. Perú.
- [Álvarez, 2005]** Álvarez Godoy, E. (2005). Residuos madereros, transformación y usos. Barcelona. España.
- [Anguita, 1975]** Anguita Delgado, Ramón (1975). Moldeo por compresión y transferencia. Madrid. España.
- [APREPET, 2007]** APREPET (2007). México D.F. [Fecha de consulta: 10 Abril 2007]. Disponible en: <http://www.aprepet.org.mx/esp/>
- [Aragón, 2004]** Aragón Díaz, Christian (2004). Caracterización de plásticos reforzados con fibras naturales (PRFN) procesados por moldeo rotacional. Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Perú.
- [Areizaga, et al., 2002]** Areizaga J., Cortázar M. (2002). Polímeros. Universidad del País Vasco. Madrid. España.
- [ASTM, 2006]** ASTM Test Methods (2007). Algunas propiedades del material del moldeo poly(ethylene-terephthalate).
- [Assureira, 2005]** Assureira, Estela (2005). Tablas y gráficos de Mecánica de fluidos. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Perú.
- [Bodini, et al., 1993]** Bodini, Gianni & Carchi Pesan, Franco (1993). Moldes y máquinas de inyección para la transformación de plásticos. Tomo I. Milán. Italia.
- [Bohler, 2008]** Aceros Bohler del Perú (2008). Lima. Perú. [Fecha de consulta: 04 Marzo 2008]. Disponible en: http://www.bohlerperu.com/b_2878.htm
- [Callister, 2003]** Callister William D. (2003). Ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté. Barcelona. España.

[Cervantes, et al., 2006] Cervantes L., Ortega A., Garza R (2006). Compósitos de madera plástica. Mexico.

[Chyr Pyng Liou, 1998] Chyr Pyng Liou (1998). Limitations and Proper use of the Hazen-Willians Equation. Journal of hydraulic Engineering ASCE.

[CIDEIBER, 1999] CIDEIBER (1999). Centro de Información y Documentación Empresarial sobre Iberoamérica. [Fecha de consulta: 20 Noviembre 2006]. Disponible en: <http://www.cideiber.com/infopaises/reparte1.asp?p=8>

[CONAM, 2005] CONAM. Consejo Nacional del Ambiente (2005). Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Lima. Perú.

[Conrad, 1964] Conrad Schnerch (1964). Plastificación de la madera. Forest Products Journal. Universidad de Siracusa. Estados Unidos.

[Curso de Inyección de plásticos, 2006] Curso de inyección de plásticos (2006), Asociación Catalana de Empresas de Molde y Matrices. España.

[Resistencia de Materiales, 2003] Curso Multimedia de Resistencia de Materiales (2003). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Perú.

[Flink, et al., 1994] Flink HP, Ganster J., Fraatz J. Akzo (1994). Nobel viscose chemistry seminar challenges in cellulosic man-made fibers. Stockholm. Suecia.

[Flinn, et al., 1994] Flinn R., Trojan P. (1994). Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones. Michigan. Estados Unidos.

[Fuentes, 2006] Fuentes R., Carlos Anibal (2006). Estudio de materiales compuestos de cemento, papel reciclado y quitosano para la fabricación de calaminas y paneles utilizados en la construcción de viviendas económicas. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Perú.

[F.W. Dittus 1930] F.W. Dittus (1930). Experimental study on convective heat transfer of water flow in a heated tube under natural circulation. California. Estados Unidos.

[James, 1990] James P. Casey (1990). Pulpa y papel: química y tecnología química. Vol. 1. México.

[J. A. Brydson,1995] J.A. Brydson (1995). Plastic Materials. New Jersey. Estados Unidos.

[Holman, 1990] Holman J.P. (1990). Heat transfer. Ohio. Estados Unidos.

[López, 2004] López Sánchez, Ángel (2004). Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas. Universidad de Girona. España.

[McAdams, 1954] McAdams W.H. (1954). Heat Transmission. Nueva York. Estados Unidos.

[Mendiluce, 1966] Mendiluce Rosich, Enrique (1966). Velocidad del agua en tuberías. [Fecha de consulta: 03 Marzo 2008]. Disponible en:
http://ropdigital.ciccp.es/public/detalle_articulo.php?registro=16866

[Takada, et al., 1988] Minoru Takada & Otros (1988) Documento de patente estadounidense US4738895, Tablero de fibra de madera.

[Nakamatsu, et al., 2002] Nakamatsu J., Chávez J. y Laos R. (2002). Concreto polimérico a partir de botellas reciclables. Proyecto de investigación, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Perú.

[Nevell, et al., 1985] Nevell TP, Zeronian SH (1985). Cellulose chemistry and its application. Nueva York. Estados Unidos.

[Pastor, 2004] Pastor de Abram, Ana (2004). Quitina y quitosano: obtención, caracterización y aplicaciones. Pontificia Universidad Católica del Perú / Fondo Editorial. Lima. Perú.

[Ronden, et al., 1999] Ronden Clifford & Morin Joseph (1999). Documento de patente estadounidense US5981631, Proceso para la producción de compuestos de una resina termoestable unida con desperdicios de madera mezclada con polímeros termoplásticos.

[Sancho, 2007] Sancho J. (2007) Estructura de macromoléculas virtual. [Fecha de consulta: 20 Junio 2007]. Disponible en: <http://bifi.unizar.es/jsancho>

[Timoshenko, 1970] Timoshenko Stephen (1970). Teoría de placas y láminas. Bilbao, España.

[University of Cambridge, 2007] University of Cambridge - Engineering Department. [Fecha de consulta: 23 Junio 2007]. Disponible en: <http://www.materials.eng.cam.ac.uk>

[Vallegos, 2006] Vallegos, María Evangelina (2006). Aprovechamiento Integral del Cannabis Sativa como refuerzo/carga del polipropileno. Girona. España.

[Val-matic, 2008] Val-matic valve and manufacturing corp (2008). Flujo a presión. [Fecha de consulta: 03 Marzo 2008]. Disponible en: http://atenea.unicauca.edu.co/~hdulica/ayudas_fpresion.pdf

[Velásquez, 2002] Velásquez Jiménez, Jorge (2002). Producción de tableros de fibras a partir de Miscanthus sinensis. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona. España.

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