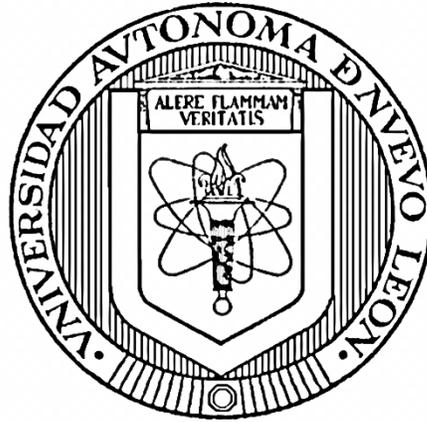


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



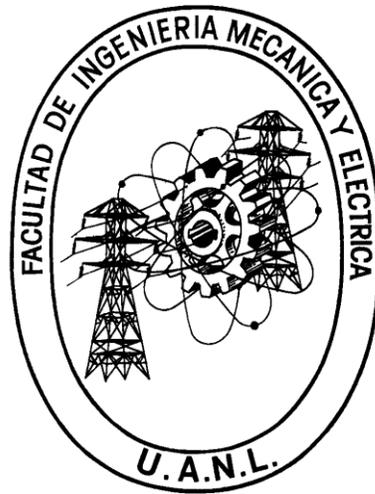
**“Transferencia de calor en moldes  
para productos de vidrio”**

Por  
Ing. Daniel Valdez Muñoz

Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRÍA  
EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CERÁMICA CON  
ORIENTACIÓN EN VIDRIO

Septiembre, 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“Transferencia de calor en moldes  
para productos de vidrio”**

Por  
Ing. Daniel Valdez Muñoz

Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRÍA  
EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CERÁMICA CON  
ORIENTACIÓN EN VIDRIO

Septiembre, 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “**Transferencia de calor en moldes para productos de vidrio**” realizada por el alumno Ing. Daniel Valdez Muñoz, matrícula 1400712, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias y Tecnología Cerámica con Orientación en Vidrio.

**El Comité de Tesis**

---

Dr. Juan Antonio Aguilar Garib  
Director

---

Dra. Bertha Alicia Vázquez Méndez  
Revisor

---

Dr. Marco Antonio Garza Navarro  
Revisor

---

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N. L.

Septiembre, 2014

DEDICATORIA

*A mis papás por impulsarme  
y ser fuente de inspiración y ejemplo  
para lograr siempre ser mejor.*

## AGRADECIMIENTOS

Primero que nada quiero agradecerle a Dios por darme la oportunidad de estudiar y darme la valentía de afrontar nuevos retos que pone en mi camino y ser fuente de inspiración para tomar la decisión correcta.

A mis papás por educarme y siempre poner mi bienestar y futuro antes que el propio, por darme todo lo que necesito y hasta más sin esperar nada a cambio, por tranquilizarme en los momentos de estrés, por no dejarme desistir en ningún momento de mi vida, por escucharme y aconsejarme, por ser apoyo incondicional, por ser mi ejemplo a seguir, por esa palmada en la espalda, abrazo, beso o caricia que siempre me dieron en el momento oportuno, sin ustedes no sería lo que soy, hoy a ustedes les dedico todo mi trabajo.

A mi hermano por apoyarme en toda la cuestión grafica de esta tesis, por siempre estar disponible para mí, por hacerme reír cuando lo necesitaba, por mostrar interés y opinar en diversas ocasiones todo lo que dijiste fue tomado en cuenta, ojala pueda ser un buen ejemplo para ti.

A Marce Martínez por dedicar tiempo a escucharme aunque sé que muchas veces no entendías de mi trabajo siempre estabas ahí, por motivarme y hacerme ver la luz al final del túnel aun que faltara para llegar, por entender cuando tuve que trabajar entre semana y fines de semana, por corregir mi redacción y ortografía, por los momentos en los que me hacías reír y por siempre apoyar mis proyectos.

A todos mis compañeros de organización robusta Ángel, Eugenio, Gustavo, Lalo, Polo y Tomás, por todos esos momentos de risa, estudio, trabajo, debates, juegos y convivencia que pasamos de cada uno de ustedes me llevo algo, cada uno de ustedes hicieron todo este proceso más fácil y ameno, mejor equipo no hubiera podido tener.

Al Doctor Juan Antonio Aguilar Garib, primero que nada por aceptar trabajar conmigo, por darme una formación de alto nivel como persona y profesionalista y cambiar mi manera de ver las cosas, por dar todo su tiempo y dedicación para presentar un trabajo digno y por todas esas pláticas que tuvimos que hoy más que nunca las entiendo, valoro y aplico en mi vida diaria.

A Antonio Liaño por todas las facilidades que se dieron para trabajar en el proyecto, por la información que se proporcionó y estar siempre al pendiente del proyecto.

A la doctora Bertha Vázquez y al doctor Marco Garza por dedicar su valioso tiempo para revisar esta tesis y por todos sus comentarios que me hicieron crecer y madurar este trabajo.

A Ana Balderas y Paula Villarreal por estar siempre al pendiente, por impulsar el proyecto y creer en él, por todas las facilidades y material que se necesitó, por motivarme, por hacerme creer que hay lugares donde no eres un número más si no alguien importante y que vale, gracias a ustedes me enamore de esta empresa y algún día hare lo mismo con alguien más.

A Ramiro Garza por impulsar el proyecto, por facilitarnos el material y equipo que se necesitó, y por tomarse el tiempo de dar seguimiento a este proyecto.

A Crisa Libbey por creer en este proyecto y ser partidarios de invertir en la educación y la formación de las personas jóvenes ya que es el futuro, ojalá que este tipo de proyectos sean motivación para seguirlos impulsando.

Al doctor Isaías Juárez y al doctor Azaél Martínez por ser líderes de este proyecto, por siempre recibarnos y escucharnos, por su motivación y por creer en este tipo de proyectos.

Al departamento de materiales de FIME por su apoyo en la experimentación en especial a Roberto Benavides en el laboratorio de fundición, por todas las facilidades y tiempo que se dieron a este proyecto.

A todos los profesores que impartieron clase a lo largo de esta maestría por su formación y aportación de conocimientos de cada uno de ustedes me llevo lo mejor.

A la UANL por impulsar proyectos nuevos siempre buscando la mejora de los alumnos.

Y a todos aquellos que no menciono y que formaron parte importante de este trabajo muchas gracias.

# ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria .....	I
Agradecimientos.....	II
Índice general.....	V
Índice de figuras .....	VII
Índice de tablas .....	IX
Resumen.....	1
Capítulo 1. Introducción.....	2
1.1 Generalidades del proceso de prensado .....	3
1.2 La noria .....	5
1.3 La vela .....	6
1.4 Viscosidad.....	6
1.5 Pistón .....	7
1.6 Moldura o molde.....	7
1.7 Diseño.....	8
1.8 Producción .....	9
Contribución de este trabajo.....	9
Capítulo 2. Antecedentes .....	10
Capítulo 3. Hipótesis, objetivos y metas .....	13
3.1 Hipótesis.....	13
3.2 Objetivo general.....	13
3.3 Objetivos específicos .....	13
3.4 Metas.....	14
Capítulo 4. Metodología .....	15
4.1 Modelo matemático.....	15
4.1.1 Flujo lineal de calor en un sólido limitado por dos planos paralelos.....	15
Capítulo 5. Experimentación.....	22
Capítulo 6. Resultados y discusión.....	25
Capítulo 7. Conclusiones.....	38
Recomendaciones.....	40
Capítulo 8. Referencias .....	41

Anexo I .....	44
Anexo II .....	45
Anexo III .....	46
Anexo IV .....	47
Anexo V .....	48
Ficha bibliográfica .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de prensado de vidrio.....	4
Figura 2 Recorrido de la moldura a lo largo de la mesa.....	5
Figura 3 Distribución de temperatura para varios momentos en la placa.....	20
Figura 4 Promedio de temperaturas por grosor de capas 2l (curvas II y I) para un cilindro circular infinito de diámetro 2l (IV, III); y para una esfera de diámetro 2l (VI,V).Temperatura inicial de cero y la temperatura de superficie V.....	21
Figura 5 Distancias de las perforaciones realizadas a la moldura partiendo del centro..	23
Figura 6 Profundidad de las perforaciones realizadas a la moldura partiendo del centro.....	23
Figura 7 Temperatura máxima alcanzada por la moldura al retirar el artículo de vidrio..	26
Figura 8 Temperatura de la moldura en diferentes puntos con vidrio en su interior.....	26
Figura 9 Temperatura de la moldura aplicándole aire de fraguado con vidrio en su interior.....	27
Figura 10 Temperatura de la moldura después del prensado del vidrio.....	28
Figura 11 Comportamiento de temperaturas en la moldura a partir de la experimentación realizada con el molde lleno de aluminio por un tiempo de 12 minutos.....	29
Figura 12 Comportamiento de temperaturas en la moldura a partir de la experimentación realizada con 1.646 kg de aluminio durante 4 minutos y 39 segundos.....	30
Figura 13 Normalización de las temperaturas en la moldura, obtenidas de la experimentación realizada con el molde lleno de aluminio.....	31
Figura 14 Normalización de las temperaturas en la moldura, obtenidas de la experimentación realizada con 1.646 kg de aluminio.....	31
Figura 15 Cálculo del comportamiento de la moldura después de 160 artículos prensado.....	32

Figura 16 Cálculo del comportamiento de la moldura después de 180 artículos prensados.....	33
Figura 17 Cálculo del comportamiento de la moldura después de 220 artículos prensados.....	34
Figura 18 Comparación de figura 3 y figura 13.....	35
Figura 19 Comparación de figura 3 y figura 14.....	35
Figura 20 Comparación de figura 4 y figura 15.....	36
Figura 21 Comparación de figura 4 y figura 16.....	36
Figura 22 Comparación de figura 4 y figura 17.....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de viscosidad del vidrio.....	6
Tabla 2. Temperaturas de la cara externa de la figura 8.....	27
Tabla 3. Temperaturas de la cara externa de la figura 9.....	28
Tabla 4. Lectura de termopares en molde lleno.....	44
Tabla 5. Lectura de termopares a 1.646 kg de aluminio.....	45
Tabla 6. Normalizacion de las temperaturas obtenidas en molde lleno .....	46
Tabla 7. Normalizacion de las temperaturas obtenidas a 1.646 kg de aluminio.....	47
Tabla 8. Resultados del modelo matematico a 160 ciclos, 180 ciclos y 220 ciclos.....	48

## RESUMEN

El prensado es una de las maneras más comunes para moldear el vidrio en forma de un producto. Este proceso se hace con máquinas que utilizan moldes diseñados para este propósito y condiciones de operación específicas para que el vidrio se forme sin defectos. Uno de los materiales más utilizados actualmente para fabricar estos moldes es el acero inoxidable. Las temperaturas óptimas de prensado, reportadas en la literatura [1-7], están entre 520°C y 540°C. La importancia de la temperatura sobre las propiedades de formación del vidrio es lo que hace que sea relevante conocer el comportamiento térmico del molde.

La descripción térmica de los moldes implica un modelo que puede ser complejo según las características del material, como la geometría y el propio proceso de formado del vidrio. En este trabajo se considera que para piezas que se definen como grandes, alrededor de 2 kg de vidrio y planas, se puede utilizar un modelo de transferencia de calor unidireccional. Probar la validez de tal simplificación es el propósito de este trabajo. Para tal efecto se toma en cuenta la experiencia del personal de operación de la planta así como reportes al respecto.

Aunque no es la finalidad de este trabajo, otro aspecto importante es que se desea implementar un control robusto para mantener las condiciones óptimas de operación, y para esto es indispensable contar con la información que un modelo térmico validado tanto experimentalmente como basado en reportes de literatura y experiencia en planta [3, 4, 8-10].

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El vidrio puede tomar su forma útil mediante diversos métodos, uno de los más antiguos es el soplado, un arte que se desarrolló desde la edad media y que hoy es considerada como una técnica artesanal que consiste en soplar el vidrio con una cerbatana para darle la forma que se requiera [11].

Los fenicios desarrollaron su propia metodología para fabricar utensilios de cocina, como vasos, con un método rudimentario pero efectivo, el cual consta de enredar poco a poco varillas de vidrio alrededor de un molde de arcilla con la forma de la vasija que se tenía hasta que quede cubierto en su totalidad por las varillas. Luego, se procedía a calentar las varillas para sinterizarlas y al final rompían el molde de arcilla y obtenían un recipiente capaz de mantener líquidos.

Una de las desventajas de estos métodos es que las formas no son reproducibles con precisión. Para esa época este proceso era efectivo pero muy laborioso por lo cual solo la realeza tenía acceso a este tipo de instrumentos, para el tiempo de la revolución industrial se desarrollaron otros procesos para la producción de objetos de vidrio.

Con el fin de poder reproducir objetos de vidrio de manera más rápida se comenzó a realizar el prensado, el cual consiste en depositar una masa de vidrio dentro de un recipiente con la forma que se desea obtener y se le presionaba con una palanca desde la parte de arriba hasta obtener la forma que se requería.

Las máquinas se operaban de manera que el calor no afectara de forma significativa el proceso. La exigencia en especificaciones del producto en este tiempo hacía que el control de temperatura no fuera tan importante.

Una de las propiedades más importantes que se deben tomar en cuenta en el proceso de prensado es la viscosidad del vidrio, ya que si se trabaja a una viscosidad fuera del rango de trabajo, del orden de  $10^4$  dPa\*s a  $10^8$  dPa\*s, se pueden generar defectos en el producto final, así como la adherencia de la masa de vidrio al molde o al pistón por la diferencia de temperaturas que hay en las superficies de contacto. La temperatura a la que se realiza el prensado debe ser apropiada para que el vidrio tenga esa viscosidad, que depende a su vez del tipo de vidrio.

La fabricación de un producto de vidrio prensado oscila, según su tamaño, entre 15 y 55 piezas por minuto, lo que hace que el proceso requiera mayor control. Las temperaturas de trabajo de las molduras se deben mantener en el orden de los  $450^{\circ}\text{C}$  a fin de evitar que el vidrio se pegue al molde y que aparezcan defectos de formado.

En esta investigación se valida un modelo térmico simplificado que considera que la transferencia de calor es unidireccional dado el tamaño y forma de la pieza y así poder determinar la evolución térmica de la moldura en el proceso. Se considera únicamente el aspecto térmico sin tomar en cuenta otras variables como desgaste mecánico, cambios de geometría del molde ni sus condiciones superficiales.

## 1.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE PRENSADO

El prensado es un proceso que consta de diferentes etapas con un objetivo específico para el proceso [11, 12], y según el producto con el que se

vaya a trabajar serán las secciones con las que deberá de contar la máquina para su conformado. En la figura 1 se muestran de forma gráfica estas etapas.

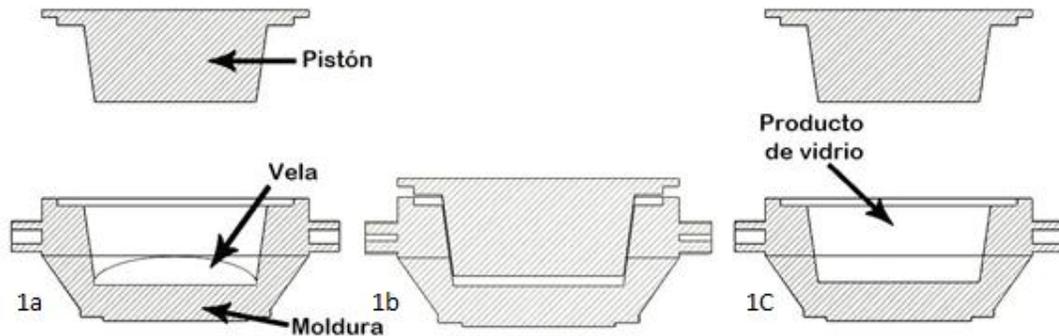


Figura 1. Proceso de prensado de vidrio.

En la primera etapa, véase figura 1a, el proceso de prensado consiste en que la masa de vidrio, que se le conoce como vela de vidrio [11], a una temperatura de trabajo de  $1200^{\circ}\text{C}$ , cae sobre de una sección conocida como moldura o molde aquí es donde tiene por primera vez contacto el vidrio con el molde, la segunda etapa, véase figura 1b, consiste en el prensado del vidrio para tomar la forma deseada mediante un pistón el cual también debe estar a una temperatura semejante a la del molde. En esta etapa sucede el fraguado o endurecimiento del vidrio. En la tercera etapa, véase figura 1c, se encuentra la sección en donde el vidrio es extraído del molde. El molde se encuentra en un carrusel, como se puede ver en la figura 2, en el que ocurren las etapas mencionadas. La última etapa, consiste en el enfriamiento del molde por medio de convección con aire, una vez terminadas estas secciones el molde pasa al proceso de lubricado para que quede listo nuevamente para recibir el vidrio.

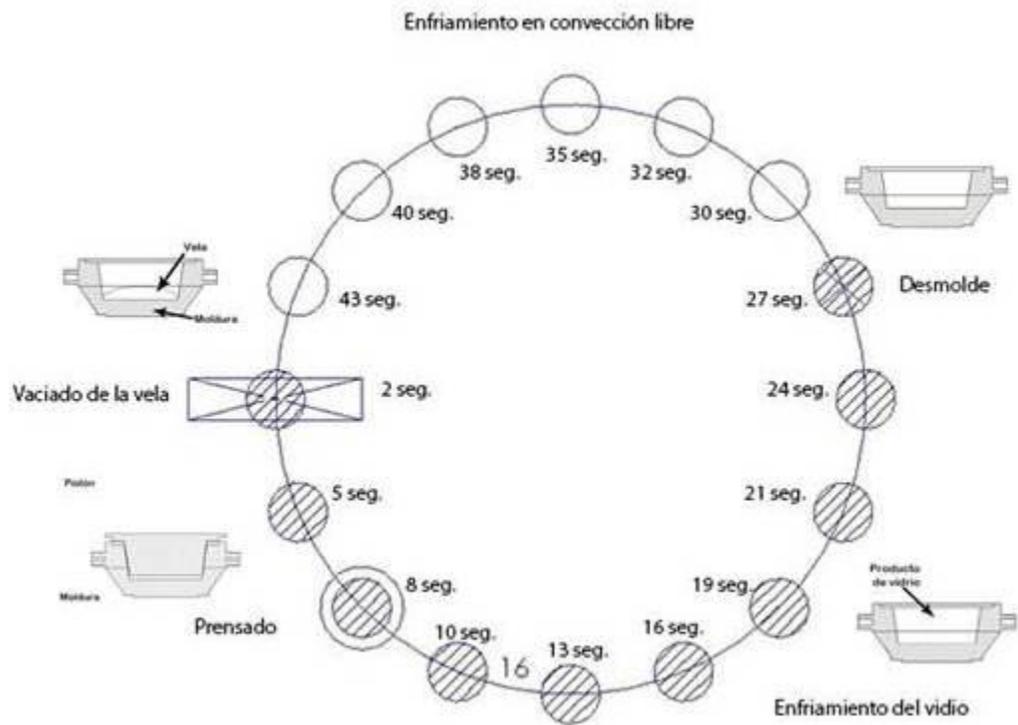


Figura 2. Recorrido de la moldura a lo largo de la mesa.

En la figura 2 se ilustra el recorrido de la moldura en la mesa de prensado, se puede observar el tiempo que transcurre desde que la moldura recibe la masa de vidrio, su enfriamiento o fraguado, el desmolde y el enfriamiento por convección libre. Los tiempos que se presentan son típicos y varían según el artículo para asegurar ciclos térmicos óptimos [13, 14].

## 1.2 LA NORIA

Es la última zona de acondicionamiento térmico del vidrio, en donde algún cambio de temperatura afecta la viscosidad del vidrio antes de salir. Al momento en que se llega a esta zona el vidrio que viene en ella ya sufrió diferentes procesos térmicos controlados. Se asume para efectos de esta tesis de la temperatura que esta tiene en ese momento es la adecuada para trabajar el vidrio.

### 1.3 LA VELA

El esferoide de vidrio que se vacía en el molde se le conoce como “vela” porque al salir de la noria tiene esta forma. Ésta es depositada en el molde a una temperatura aproximada de 1200°C, y a lo largo de todo el proceso sufre enfriamiento al tener contacto con el molde y posteriormente con el pistón para que su viscosidad se mantenga en el orden de  $10^4$  dPa\*s [5]. Al momento en que se logra controlar la viscosidad para estar dentro del rango de trabajo del vidrio,  $10^4$  dPa\*s, se genera menos tensión en su estructura interna lo que propicia un producto de mejor calidad.

El tipo de vela con la que se trabaja es de vidrio sodo-cálcico y no se consideran cambios de formulación, solo se considera la temperatura de la vela que debe ser de 1200°C únicamente para efectos de este trabajo.

### 1.4 VISCOSIDAD

Se define la viscosidad como la oposición de un fluido a su deformación [11], determina su comportamiento a lo largo de su proceso, en la tabla 1 se ilustra la viscosidad y el trabajo que se puede realizar a esta viscosidad.

A medida que se trabaje dentro de estos rangos de viscosidad mejor será el producto final, tendrá menos defectos y será más fácil su trabajo.

Tabla 1. Rangos de viscosidad del vidrio.

Rango de viscosidad	Descripción
$10^2$ a $10^4$	Intervalo de fusión y afinado
$10^4$ a $10^8$	Rango de conformado

$10^5$	Desmolde
$10^{13}$ a $10^{14}$	Intervalo de recocido

## 1.5 PISTÓN

Se define pistón a la contraparte del molde que se desplaza para realizar el prensado, esta parte también toma calor al ponerse en contacto con la vela de vidrio tal como lo hace la moldura o molde [8, 9, 13].

Como la temperatura de la moldura no está controlada, la vela sufre una serie de esfuerzos ya que la temperatura de su parte inferior y superior son diferentes lo que puede ser la causa de algunos defectos [15], también existe la posibilidad de que se requiera mayor fuerza que la del diseño al momento del prensado. Será conveniente que las temperaturas del molde y del pistón sean iguales para disminuir los esfuerzos

A diferencia de la moldura, la cabeza del pistón es más fácil de mantener a cierta temperatura ya que éste se puede enfriar desde su interior, por medio de aire o algún refrigerante líquido, aunque el tiempo de contacto que tiene el pistón con el vidrio es menor al que tiene el molde por lo que el pistón no influye tanto como el molde o moldura.

## 1.6 MOLDURA O MOLDE

Las molduras o moldes que se utilizan para este tipo de trabajo son de acero inoxidable, las cuales son resistentes al tipo de trabajo al que son expuestas en la producción de vidrio [5], en este caso el material de fabricación es acero 431 [16]. Este acero tiene menos de 0.2% de carbono, y un alto contenido de níquel, entre 1.25% y 2.5%, lo que favorece a la formación de la fase martenista, esta fase aporta buena resistencia a la corrosión y a la tensión

así como buena tenacidad [16]. Las molduras para vidrio generalmente se diseñan siguiendo criterios de resistencia mecánica [5, 17].

El diseño que considera criterios térmicos, además de los mecánicos tiene mayor uniformidad en la temperatura durante todo el proceso ya que la transferencia de calor en la moldura es uniforme, lo cual ayuda a eliminar defectos de ese origen.

Los moldes en la industria del vidrio tienen acabado liso y se utilizan lubricantes con el fin de garantizar que el vidrio fluya a lo largo de todo el molde dando un buen acabado al producto y al mismo tiempo ayuda a reducir tensiones que se pueden generar durante la deformación y flujo sobre una superficie. La reparación de los moldes debido al desgaste o grietas puede producir modificaciones geométricas que resultan en puntos calientes lo cual también influye o transmite defectos al producto final. Sin embargo en este trabajo no se consideran tales operaciones.

La moldura que se utilizó en este trabajo se clasifica como tamaño grande y se le denomina así porque la pieza de vidrio pesa más de 2 kg. La temperatura del molde suele estar entre 540°C y 560°C ya que por debajo de éstas el vidrio podría sufrir un cambio en su viscosidad y generar algún defecto o romperse [4, 6, 9, 18].

## 1.7 DISEÑO

Este es un tema de discusión amplio, pero debido a que en este trabajo no está contemplado modificar el diseño de la moldura solo se consideran los moldes tal como fueron fabricados. Se ha reportado que la clave del enfriamiento se encuentra en las aletas u orificios que éstas puedan tener [8-10], también se utilizan los insertos de cobre en el molde, estos son tubos que se colocan a diferentes profundidades del molde y facilitan el intercambio de calor

[8, 9, 19]. El molde estudiado no tiene ningún inserto ni medio especial de enfriamiento.

También es importante la relación de masa del molde con el calor que este mismo guarda [20]. Se ha propuesto que la temperatura ideal de trabajo sería alrededor de los 580°C [21], y con todos los ajustes de diseño y temperatura se puede reducir hasta en un 18%. Esto mismo se ha confirmado en cierta parte por Genzelev que investigó acerca de que a menor masa en los moldes la pérdida de calor tiende a ser uniformes [22].

## 1.8 PRODUCCIÓN

Uno de los factores que no se toman en cuenta generalmente es el tiempo de residencia de cada etapa ya que según la tasa de producción, será el tiempo en el que permanezca el molde en una sección ya sea de conformado o prensado [2].

## CONTRIBUCIÓN DE ESTE TRABAJO

Validar que la suposición de que la transferencia de calor es unidireccional para el caso de moldes grandes por lo que la ecuación de Fourier puede ser utilizada para determinar la evolución térmica de la moldura durante el proceso de formado de productos de vidrio.

## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

La razón por la que se calienta el vidrio para formarlo es porque aumenta su formabilidad a través de la disminución de su viscosidad [11]. Cuando se deposita el vidrio en el molde se reduce la temperatura en la parte externa del vidrio ya que transfiere calor a la moldura y la viscosidad podrá disminuir y no ser apropiada para generar la preforma [7], por lo que a medida que se conozca el comportamiento térmico que tiene el molde, se podrá optimizar el proceso de prensado [6].

A diferencia de la industria, la literatura reporta una temperatura de trabajo de la moldura en el rango de 540°C a 580°C [1-7], para el vidrio sódico cálcico, pero en general no reportan ni el material del cual está hecha la moldura ni la temperatura de la vela ni la velocidad de producción, solamente se reporta que la moldura se encuentra en un ambiente controlado (sistema de control de lazo cerrado) donde ellos pueden limitar la entrada y salida de calor así como controlar la temperatura de la moldura.

Abramovich [3], uno de los investigadores con más reportes de este ámbito, como Fertik [4, 23], Flom [5, 20], Guloyan [7, 21] entre otros, marca una ruta a seguir para tener una moldura en el rango adecuado para trabajar; primero analiza el ambiente en el que se encontrara la moldura tomando en cuenta temperatura ambiente, temperatura de trabajo, material y espesor de la moldura, temperatura de la vela y velocidad de operación [3], y menciona que a medida que estas variables se conozcan se podrá trabajar de manera más eficiente con la moldura y se reducirá el choque térmico que llegue a tener el vidrio. En un segundo estudio [2], desarrolla un sistema matemático donde se

puede calcular, según los tiempos de producción, el calor que pierde la moldura en relación con la velocidad de un tipo de máquina que el mismo propone como máquina ideal para este tipo de proceso. Y en un tercer artículo [1], con la información obtenida de sus estudios anteriores, encuentra que la moldura al superar su estado estacionario necesita ser enfriada para que regrese al rango de temperatura donde se debe de trabajar.

Uno de los factores que Abramovich [3], no menciona con exactitud en sus estudios es el espesor de la moldura, siendo éste un factor importante para el cálculo de la transferencia de calor como menciona Guloyan [7], Horatio [24] y Flom [20], Vorob'ev [17], quienes reportan la importancia de trabajar con espesores pequeños, entre dos y tres centímetros, ya que estos tienden a afectar a la temperatura de la moldura en sus diferentes capas de manera más rápida que las molduras más gruesas pero al mismo tiempo esto repercute en la vida útil que tiene la moldura; en otro estudio complementa lo anterior concluyendo que las molduras con menor masa tienden a perder calor de manera uniforme y esto ayuda a mejorar la calidad de los artículos de vidrio [22]. También se reportan cálculos para encontrar la temperatura interna de la moldura según su espesor pero para estos moldes con alto contenido de martensita en su composición [20].

La industria tiene reportes de la moldura enfocados específicamente en el tipo de moldura que se utiliza en este estudio; para efectos de este trabajo los datos que lo respaldan son: la temperatura de la vela, temperatura de trabajo de la moldura y homogeneidad térmica de la moldura [8-10].

En cuanto a la termodinámica, la literatura reporta modelos matemáticos con base en ecuaciones de Fourier [7-9, 17, 24, 25], estos estudios mencionan que es posible alcanzar un estado estacionario encontrando un equilibrio entre la entrada de calor y la salida de este dependiendo de la fuente de calor, el espesor del molde, conductividad térmica de la fuente de calor así como de la

moldura, resistencia térmica de la moldura y la diferencia de temperatura entre la moldura y la fuente de calor.

Es importante enfatizar que el choque térmico que sufre el vidrio por la diferencia de temperatura con la moldura es un factor para generar defectos en el producto final [18], pero éste no los genera por sí mismo sino también por el tiempo que tarda en realizarse el prensado [7, 13, 21], la literatura explica que a mayor tiempo de prensado mayor será el cambio de temperatura que sufra el vidrio con lo que se corre el riesgo de salir del rango de trabajabilidad del vidrio y así generar diversos defectos como rugosidades, marcas del flujo del vidrio al momento del prensado, producto incompleto, etc. [5, 6, 15].

Termodinámicamente esto es correcto ya que al momento de estar mayor tiempo en contacto el vidrio con el molde y pistón estos absorben más calor, y se puede observar un cambio en el rango de trabajabilidad ya que se necesita más fuerza para prensar la vela y esto dificulta que se deslice de manera adecuada lo que propicia relieve en el producto final de vidrio, también posiblemente el artículo final esté incompleto ya que no tiene la viscosidad apropiada para fluir a lo largo de todo el molde.

## CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y METAS

### 3.1 HIPÓTESIS

Demostrar que el comportamiento térmico por transferencia de calor de una moldura para vidrio puede ser descrito mediante la ecuación de Fourier en condiciones unidireccionales.

### 3.2 OBJETIVO GENERAL

Proponer una forma para determinar la temperatura de las molduras mediante un modelo simplificado de transferencia de calor.

### 3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el comportamiento térmico de la moldura en las instalaciones locales de producción.
- Determinar el grado en que un modelo simplificado puede describirlo.
- Proponer las condiciones necesarias de la moldura para mantener la cara de prensado entre 540°C y 580°C.
- Medir la transferencia de calor del interior hacia el exterior de la moldura.

- Recrear las condiciones de calentamiento del molde para obtener información para validar y justificar el uso de un modelo simplificado.

### 3.4 METAS

- Determinar la evolución térmica de la moldura.
- Desarrollar un modelo matemático que describa el comportamiento de la moldura a lo largo del proceso.
- Validar si la moldura utilizada para el proceso es la adecuada.

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Para determinar el comportamiento de la moldura a nivel de planta se utiliza una cámara termográfica marca Fluke IFOV y se fotografía el proceso completo de la moldura, estas fotografías fueron tomadas en 3 diferentes meses a diferentes horarios.

Para recrear las condiciones de línea a nivel laboratorio se contó con el apoyo e instalaciones del laboratorio de fundición de FIME, utilizando un horno para fundido, aluminio, equipo de termopares tipo k para la medición de las temperaturas acoplados a un sistema de adquisición de datos.

La simulación se realiza de manera computacional utilizando Matlab para realizar los cálculos y las gráficas del modelo matemático.

### 4.1 MODELO MATEMÁTICO

El modelo utilizado para la presente investigación corresponde a la ecuación de Fourier para transferencia de calor [24].

#### 4.1.1 Flujo lineal de calor en un sólido limitado por dos planos paralelos

Partiendo de la Ecuación de Fourier.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k\nabla^2 T$$

La región  $0 < x < l$ . Temperatura inicial  $f(x)$ . Los extremos a temperatura constante o aislada.

$$T = T_1, \text{ cuando } x = 0$$

$$T = T_2, \text{ cuando } x = l$$

$$T = f(x), \text{ cuando } t = 0$$

Se hace superposición de un estado estacionario y uno transitorio

$$T = u + w \quad (1)$$

Dónde:

$u$  = Temperatura estacionaria.

$w$  = Temperatura transitoria.

Donde  $u$  y  $w$  satisfacen la ecuación 2

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = 0 \quad (0 < x < l) \quad (2)$$

$$u = T_1, \text{ cuando } x = 0,$$

$$u = T_2, \text{ cuando } x = l,$$

Caso unidireccional del Modelo de Ecuación de Fourier

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k\nabla^2 T = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

Condiciones de frontera

$$T(0; t) = T_1$$

$$T(l; t) = T_2$$

Condición inicial

$$T(x; 0) = f(x)$$

Parte estacionaria

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = 0 = k \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

$$T_s = Ax + B$$

$$T_1 = A(0) + B \rightarrow B = T_1 \quad (4)$$

$$T_2 = A(l) + B \rightarrow A = \frac{T_2 - T_1}{l} \quad (5)$$

Parte Transitoria

$$\frac{\partial T_t}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2}$$

Se separan variables

$$T_t = \tau X$$

Dónde:

$$\tau = g(t)$$

$$X = h(x)$$

$$\frac{1}{k} \frac{\partial \tau X}{\partial t} = \frac{\partial^2 \tau X}{\partial x^2}$$

$$\frac{1}{k} \tau' X = \tau X''$$

$$\frac{1}{k} \frac{\tau' X}{\tau X} = \frac{\tau X''}{\tau X}$$

$$\frac{1}{k} \frac{\tau'}{\tau} = \frac{X''}{X} = -\lambda^2$$

$$C e^{-\lambda^2 kt} = D \sin(\lambda x) + E \cos(\lambda x) \quad (6)$$

Suma de estacionario más transitorio

$$T = u + w$$

$$T(x; t) = Ax + B + [D \sin(\lambda x) + E \cos(\lambda x)] C e^{-\lambda^2 kt} \quad (7)$$

$$\lambda_n = \frac{nT_1}{l}$$

Se sustituye por los valores de la ecuación 7 por los encontrados en las ecuaciones 4, 5 y 6

$$T = \frac{T_2 - T_1}{l} x + T_1 + \sum C E_n \sin(\lambda x) e^{-\lambda^2 kt} \quad (8)$$

Para  $t=0$  donde  $CE=C$

$$C_n = \frac{\int_0^l [f(x) \sin(\lambda x) Ax + B] dx}{\int_0^l \sin^2(\lambda x) dx}$$

Sustituyendo lo anterior

$$T = T_1 \frac{(T_2 - T_1)x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_n \frac{T_2 \cos(n\pi) - T_1}{n} \sin(\lambda x) e^{-\lambda^2 kt} + \frac{2}{l} \sum \sin(\lambda x) e^{-\lambda^2 kt} \int_0^l f(x') \sin(\lambda x') dx \quad (9)$$

Se resuelve la integral de la ecuación 9 para llegar a la ecuación 10

$$T = T_1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-k(2n+1)^2 \pi^2 l/4l^2} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \quad (10)$$

Introduciendo los parámetros adimensionales de normalización.

$$T = \frac{kt}{l^2} \quad \xi = \frac{x}{l}$$

Y sustituyendo los parámetros de normalización se obtiene la ecuación 11:

$$\frac{v}{V} = \frac{T}{T_1} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-k(2n+1)^2 \pi^2 T/4} \cos \frac{(2n+1)\pi \xi}{2} \quad (11)$$

Dónde:

k= conductividad térmica del molde

l= grosor de la capa del molde

t= tiempo

Ecuación simplificada de Fourier para validar experimentalmente con la temperatura tomada directamente del molde.

$$\frac{v}{V} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-k(2n+1)^2 \pi^2 T/4} \cos \frac{(2n+1)\pi \xi}{2}$$

En la figura 3 se pueden observar los valores de  $\frac{v}{V}$  y de  $\frac{x}{l}$  para la solución de la ecuación anterior donde:

$\frac{v}{V}$  = resultado de la ecuación

l = grosor de la moldura

x = punto donde se está realizando la medición

Como la función de temperatura es lineal se puede suponer que

$$T(0; t) = T_1$$

$$T(l; t) = T_2$$

Pueden ser cambiadas a

$$T(0; t) = T_1 - T_1 = 0$$

$$T(l; t) = T_2 - T_1$$

Esto se refleja en la figura 3

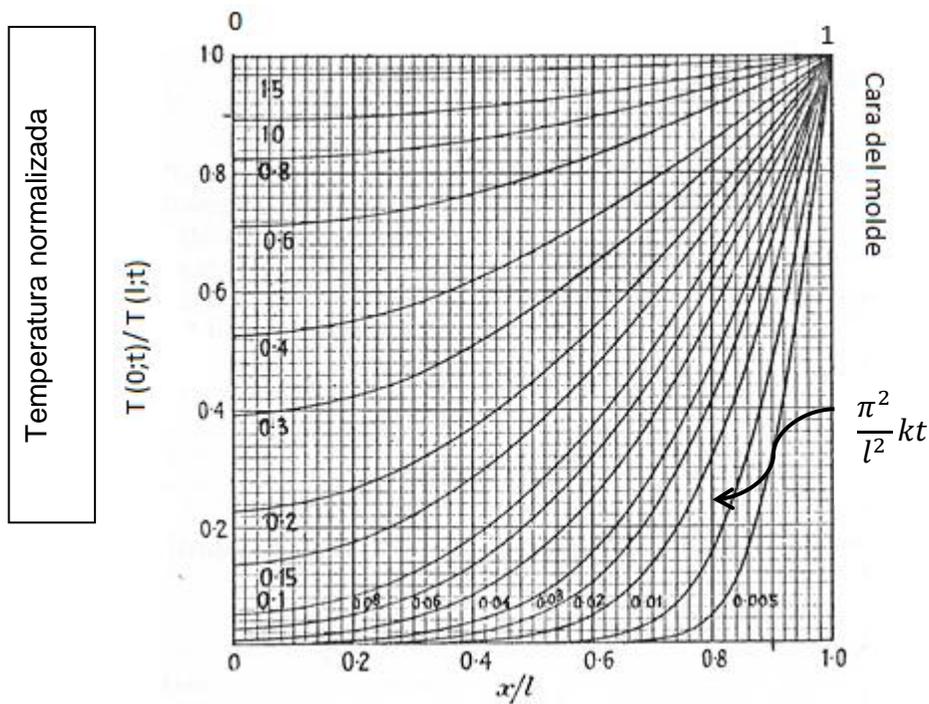


Figura 3. Distribución de temperatura para varios momentos en la placa [25].

La figura 3 representa el comportamiento térmico que va teniendo la placa en relación con el resultado de la ecuación 11 y el diferente grosor de la moldura.

Entonces si al temperatura inicial es  $f(x)$  y si los dos valores terminan de la siguiente manera  $x = 0$  y  $x = l$  la solución sería de la siguiente forma.

$$\frac{v}{V} = \frac{1}{l} \int_0^l f(x') dx' + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-kn^2\pi^2 t/l^2} \cos \frac{n\pi x}{l} \int_0^l f(x') \cos \frac{n\pi x'}{l} dx'$$

Esto representado en la figura 4

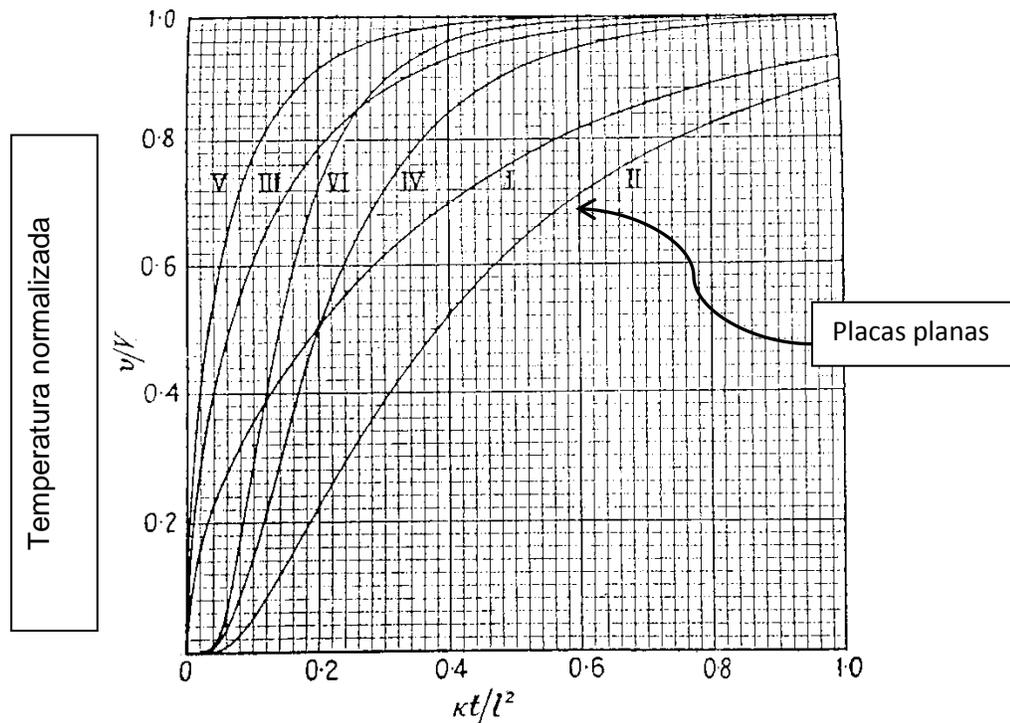


Figura 4. Promedio de temperaturas por grosor de capas  $2l$  (curvas II y I) para un cilindro circular infinito de diámetro  $2l$  (IV, III); y para una esfera de diámetro  $2l$  (VI, V). Temperatura inicial de cero y la temperatura de superficie V.

De la figura 4 se pueden observar el perfil térmico que se obtiene a diferentes grosores de capa desde una temperatura que va cambiando en función del tiempo

Con los resultados del modelo se conoce el comportamiento térmico de la placa, en este caso el molde, para así poder estimar en caso de ser requerido un calentamiento o un enfriamiento. Ahora es necesario verificar que los datos experimentales sigan este modelo simplificado y entonces será posible utilizarlo como modelo para determinar la evolución térmica de los moldes.

## CAPÍTULO 5. EXPERIMENTACIÓN

Se supone que las propiedades de la moldura son homogéneas, para conocer su temperatura y comprobar esto se toman termografías en los diferentes momentos del proceso (ver la figura 2), tanto en la cara interior como en la cara exterior del molde así como a los conductos de aire. Éstas se realizaron con una cámara termográfica digital en la planta de vidrio a lo largo de todo el proceso desde que el vidrio es depositado en la moldura, durante el prensado, a lo largo del proceso de fraguado de vidrio, al momento del desmolde y durante las secciones en las que se encuentra sin vidrio el molde, todo esto en las condiciones normales en las que opera la moldura.

Como primer paso para validar el modelo simplificado se preparó el molde y para recrear la temperatura del vidrio en un caso típico se vació aluminio, éste se utiliza como fuente de calor con fin de conocer como el molde se va calentando de su cara interna hacia afuera ya que es más fácil de trabajar que el vidrio por las temperaturas que tiene, además la temperatura de vaciado está en el rango en las que se reportan para el vidrio.

El molde fue rociado con grafito como lubricante para evitar que el aluminio llegara a adherirse ya que en planta se utiliza un lubricante a base de grafito, se le colocaron cuatro termopares tipo "K", tres de ellos con una separación de 2.5 cm entre ellos y uno de 4.5 cm con referencia desde el centro y profundidades de 4 cm, 3 cm, 2 cm, y 0.5 cm respectivamente partiendo de la cara interior como se muestra en las figuras 5 y 6, estos registraron la temperatura actualizando los datos cada 100 milisegundos, con la finalidad de medir la transferencia de calor del interior hacia el exterior.

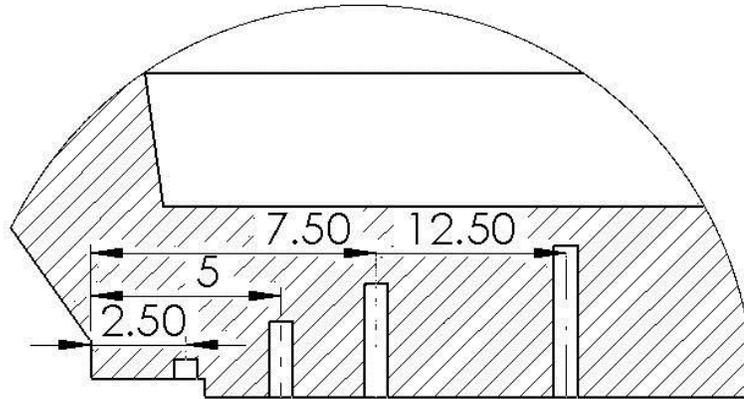


Figura 5. Distancias de las perforaciones realizadas a la moldura partiendo del centro.

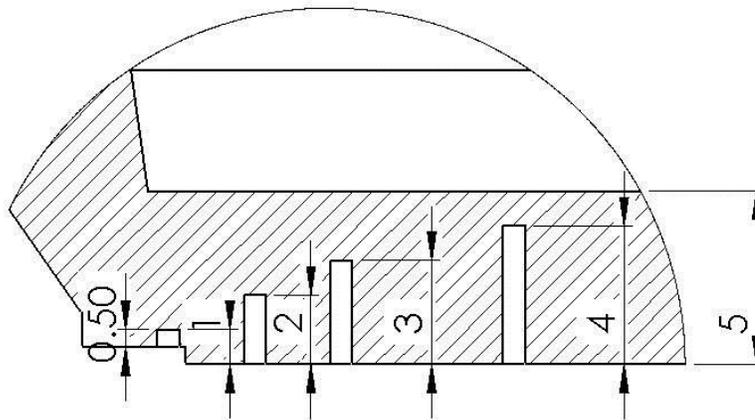


Figura 6. Profundidad de las perforaciones realizadas a la moldura partiendo del centro.

Una vez realizado lo anterior se procede al vaciado del aluminio. Mientras el molde se encontraba a una temperatura de  $28.6^{\circ}\text{C}$  se le colocaron  $0.766\text{ kg}$  de aluminio fundido a una temperatura de  $720^{\circ}\text{C}$ . Se reportaron los cambios en dos minutos hasta que se inició la uniformización de la temperatura del aluminio con la cara interior del molde, se llegó a una temperatura de  $90.09^{\circ}\text{C}$  en la cara interior,  $80.06^{\circ}\text{C}$  y  $67.84^{\circ}\text{C}$  al centro y  $46.56^{\circ}\text{C}$  en la cara exterior.

Al iniciar la segunda prueba el molde estaba a  $52.84^{\circ}\text{C}$  en la cara interior,  $51.29^{\circ}\text{C}$  y  $46.26^{\circ}\text{C}$  al centro y  $44.47^{\circ}\text{C}$  en su cara exterior, se le colocaron  $1.646\text{ kg}$  de aluminio fundido a  $722^{\circ}\text{C}$ , las temperaturas fueron monitoreadas durante 4 minutos y 39 segundos tiempo en el que se comenzó a uniformizar el aluminio y

la cara interna del molde, se registraron 192.96 °C en la cara interior, 169.84°C y 141.88°C al centro y 95.60°C en la cara exterior.

En la tercera prueba el molde contaba con una temperatura inicial de 136.49°C en la cara interior, 127.79°C y 117.39°C al centro y 94.01°C en la cara exterior. Se vaciaron 7.060 kg de aluminio a 718°C, le tomó 12 minutos para uniformizar las temperaturas se finalizó la prueba con 353.99°C en la cara interna, 327.44°C y 297.24°C al centro y 235.36°C en la cara exterior.

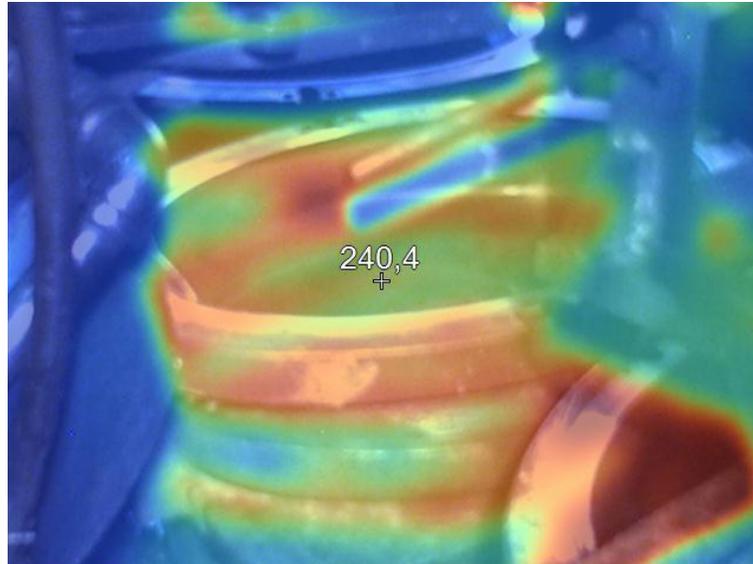
Posteriormente se recopilaron los datos de cada prueba y se realizaron las figuras 11, 12, 13 y 14, se pesó el aluminio nuevamente para confirmar la cantidad que se suministró a cada prueba y se prosiguió al análisis de los resultados obtenidos en la prueba.

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las termografías se puede observar que efectivamente la moldura tiene un calentamiento uniforme en toda su superficie lo que indica que sus temperaturas podrían cambiar de la misma forma en el medio en el que se trabaja. No se identifican puntos calientes ni fríos cuando se tiene depositado vidrio en el molde y cuando no lo tiene.

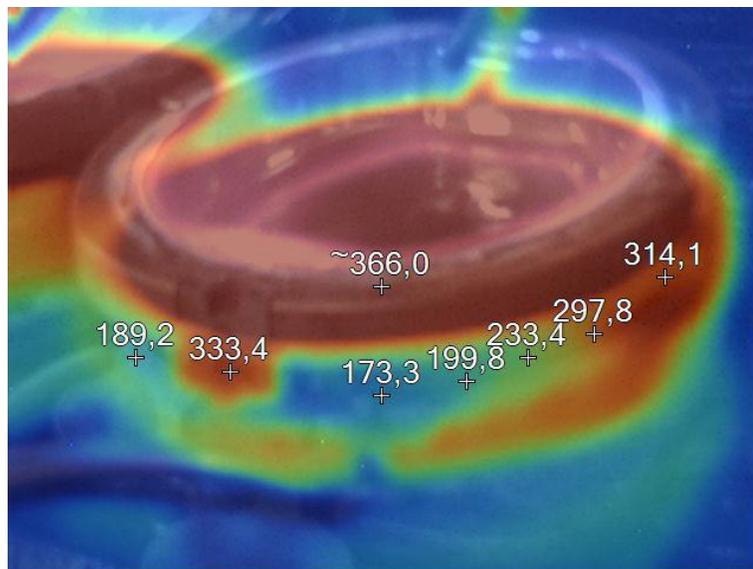
También se puede observar en las termografías que cuando el artículo de vidrio es extraído del molde, comienza a sufrir un enfriamiento súbito de más de 100°C hasta que se deposita el vidrio nuevamente en el molde.

En la figura 7 se registra la temperatura de la moldura al momento de retirar el vidrio después de haber pasado por las secciones de prensado y el aire de fraguado, se observa que la temperatura en la cara interna de la moldura es uniforme pero por debajo de lo reportado por la literatura [3, 4, 7, 12, 17, 22, 23]. En este punto del proceso la moldura continua su recorrido sin ninguna fuente de calor hasta que la masa de vidrio es depositada nuevamente antes de realizar el prensado.



**Figura 7. Temperatura máxima alcanzada por la moldura (240.4 °C) al momento de retirar el artículo de vidrio en el punto central de la moldura.**

En la figura 8 se muestran las temperaturas mas altas registradas en la cara exterior de la moldura a lo largo del proceso de prensado, se observa como la temperatura va a aumentando gradualmente a lo largo de la circunferencia de la moldura ya que en el punto mas frío se está aplicando aire a la moldura. La tabla 1 muestra las temperaturas de la figura 8 ordenadas de menor a mayor.



**Figura 8. Temperatura de la moldura en su cara exterior así como en el interior que abarcan desde 173.3 °C hasta 366°C.**

Tabla 2. Temperaturas de la cara externa de la figura 8.

Temperatura de cara exterior
173.3 °C
189.2 °C
199.8 °C
233.4 °C
297.8 °C
314.1 °C
333.4 °C

En la figura 9 se observan nuevamente la uniformidad de la temperatura a lo largo de la moldura, en ésta, a diferencia de la figura 8, no se le está suministrando aire a la moldura pero si se está aplicando el aire de fraguado, éste al ser suministrado de manera adecuada no impacta a la moldura si no directamente a la masa de vidrio como se observa a continuación.

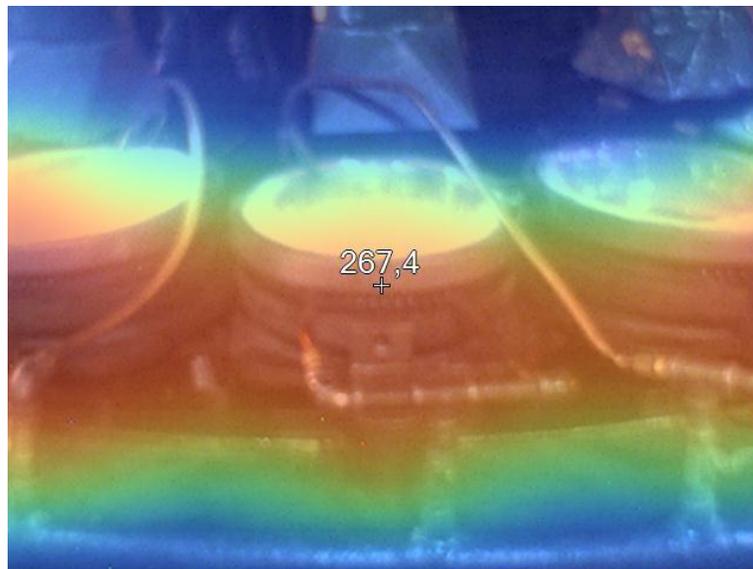


Figura 9. Temperatura de la moldura (267.4 °C) aplicándole aire de fraguado al vidrio en su interior.

La figura 10 muestra el momento después de ser prensado el vidrio, se observa como la temperatura aumenta de manera gradual a medida de que se aleja del lugar donde se le está aplicando aire a la moldura, en esta imagen

también se está utilizando aire de fraguado para el vidrio y nuevamente se observa que este es aplicado de manera correcta de tal forma que no impacta las caras de la moldura si no la masa de vidrio. La tabla 2 muestra las temperaturas de la figura 10 ordenadas de mayor a menor.

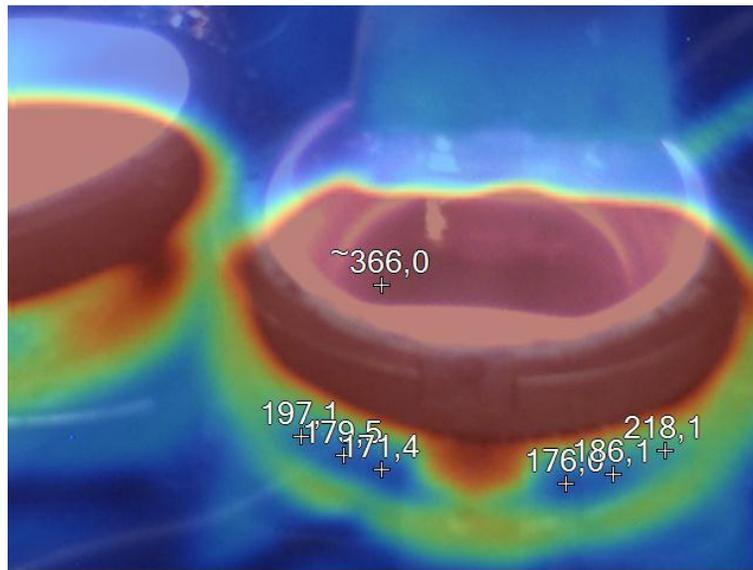


Figura 10. Temperatura de la moldura en su cara exterior e interior después del prensado del vidrio.

Tabla 3. Temperaturas en cara exterior de la moldura de la figura 10.

Temperatura de cara exterior
171.4 °C
176 °C
179.5 °C
186.1 °C
197.1 °C
218.1 °C

En la experimentación con aluminio a nivel laboratorio se puede ver, que la temperatura es uniforme en todo el molde a pesar de estar a diferentes profundidades y distancias (ver anexo I y II), hay cierta concordancia en cuanto a las diferencias de temperaturas. Se puede observar en los tres momentos como

el crecimiento es gradual en relación temperatura/tiempo, las temperaturas interiores son las que se observan que tienen más estabilidad ya que entre ellas hay poca diferencia de temperatura comparada con la temperatura del termopar que está en contacto con la cara exterior de la moldura; y el termopar 1 o los del centro donde se pueden tener más de 200 °C de diferencia como se observa en la figura 11 y 12. En referencia a la figura 6 el termopar 1 es el que se encuentra más al centro y profundo del molde y el termopar 4 el más alejado del centro con la menor profundidad.

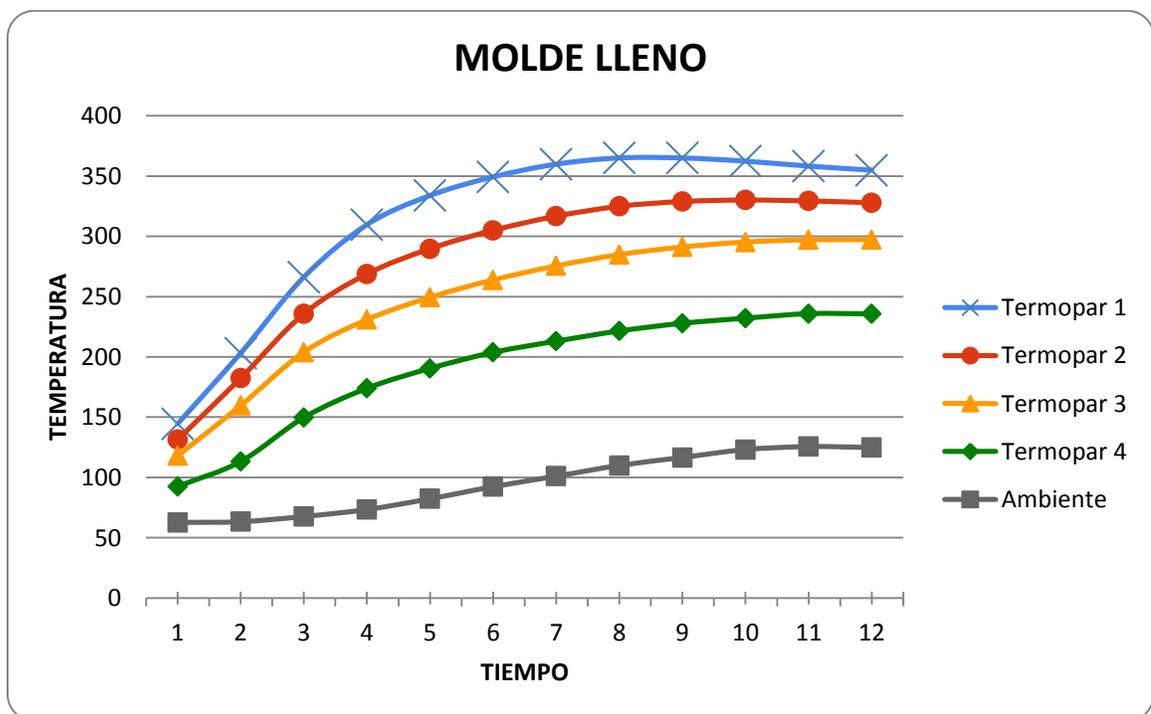


Figura 11. Comportamiento de temperaturas en la moldura a partir de la experimentación realizada con el molde lleno de aluminio por un tiempo de 12 minutos.

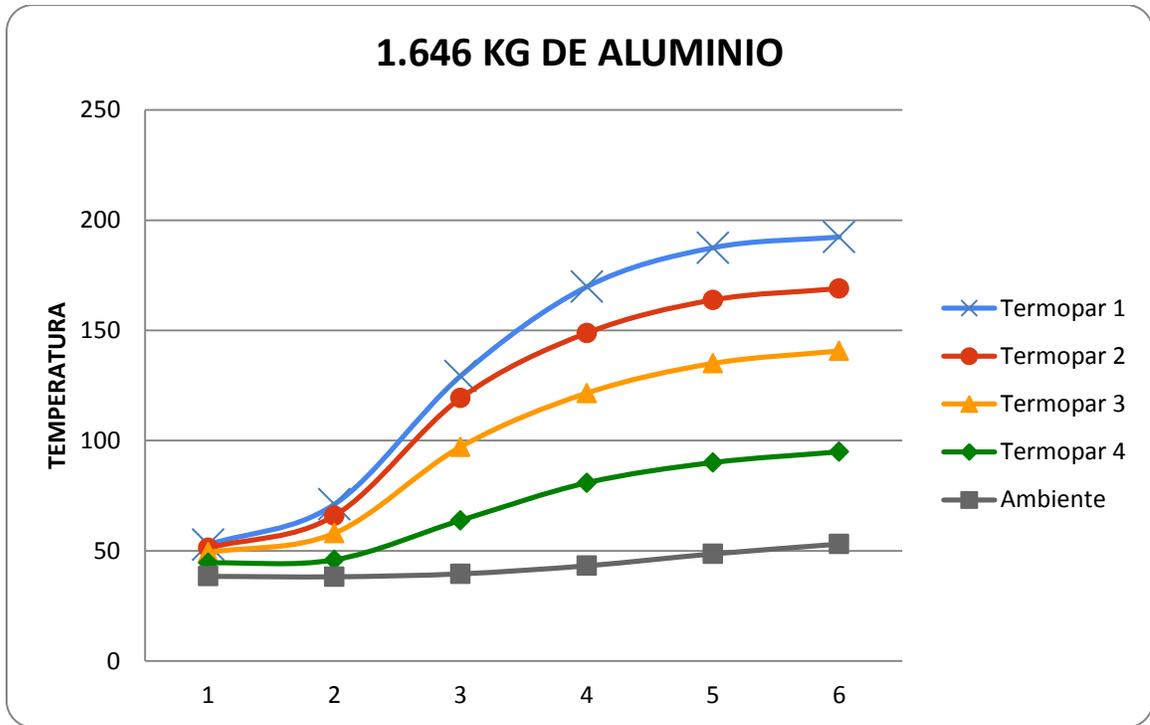


Figura 12. Comportamiento de temperaturas en la moldura a partir de la experimentación realizada con 1.646 kg de aluminio durante 4 minutos y 39 segundos.

Normalizando las temperaturas de la figura 11 y 12 se obtiene el siguiente comportamiento. En el anexo III y IV se pueden encontrar los valores de estas tablas.

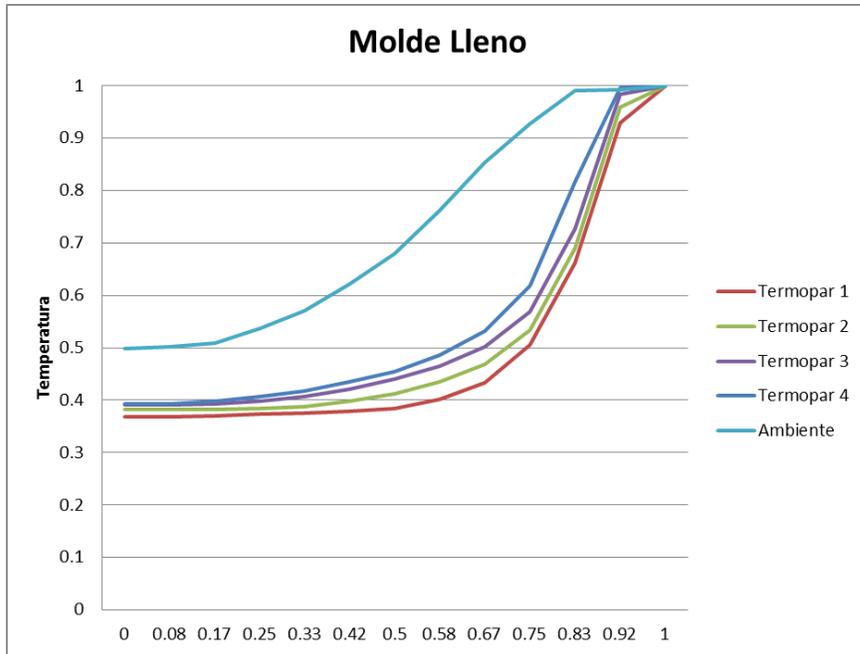


Figura 13. Normalización de las temperaturas en la moldura obtenidas de la experimentación realizada con el molde lleno de aluminio.

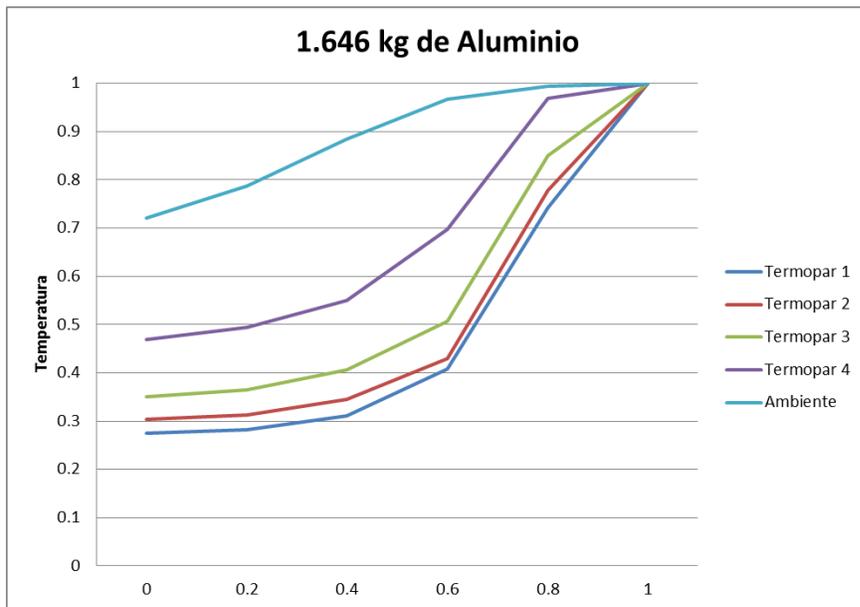
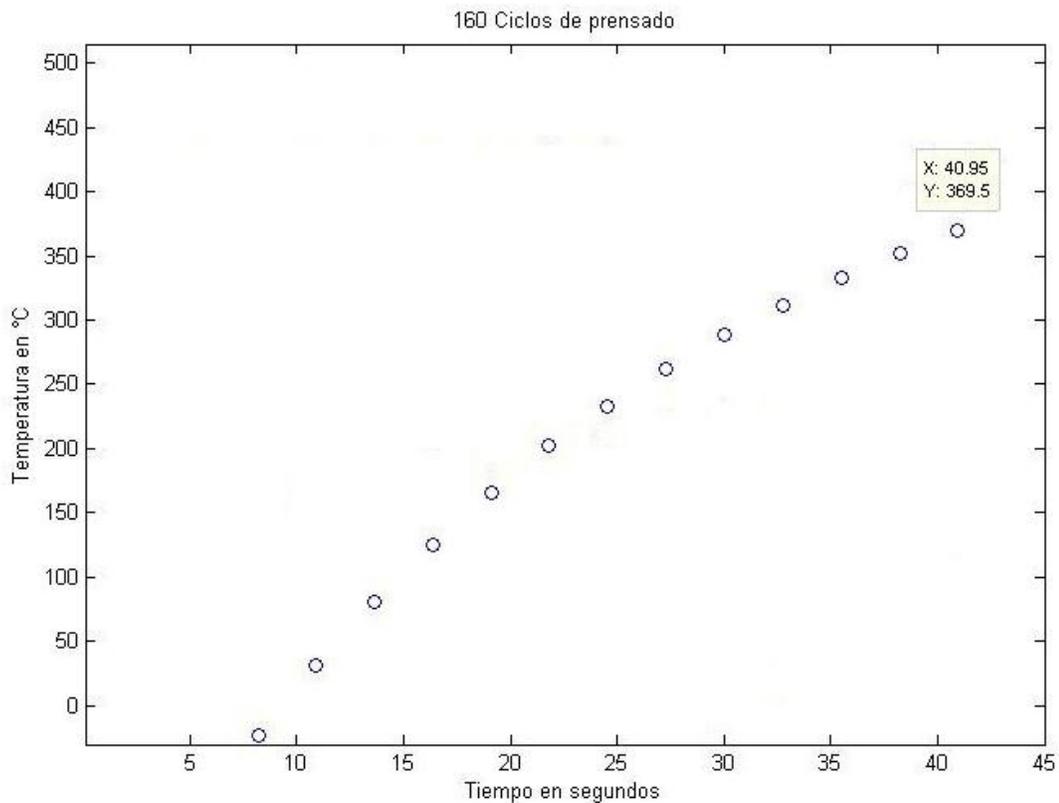


Figura 14. Normalización de las temperaturas en la moldura obtenidas de la experimentación realizada con 1.646 kg de aluminio.

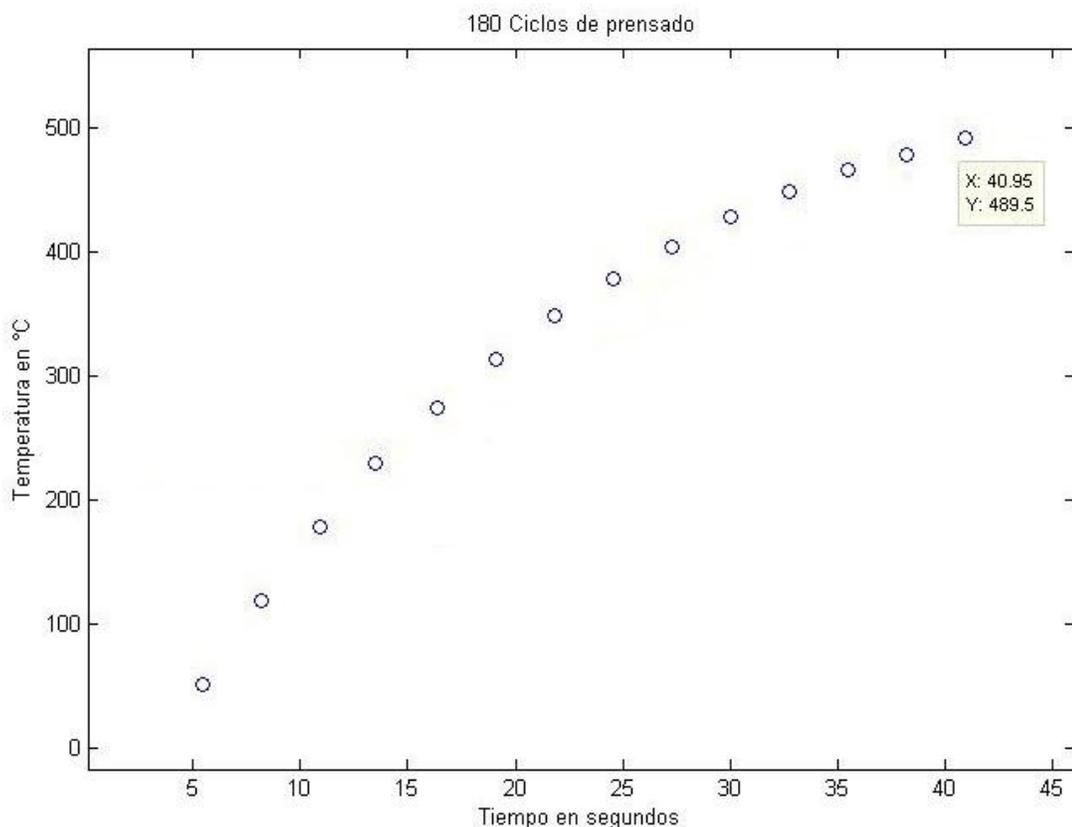
Con estos resultados, se realizaron los cálculos para conocer el flujo de calor que se tiene en la moldura. Durante el proceso de prensado se realizaron los cálculos apoyados en la literatura [24] donde en primer lugar se toman los cálculos por medio del “Flujo lineal de calor en el sólido limitado por dos planos paralelos” mencionado anteriormente estos resultados se pueden observar en el anexo 5. Las gráficas 15, 16 y 17 muestran los resultados.



**Figura 15. Cálculo del comportamiento de la moldura después de 160 artículos prensados.**

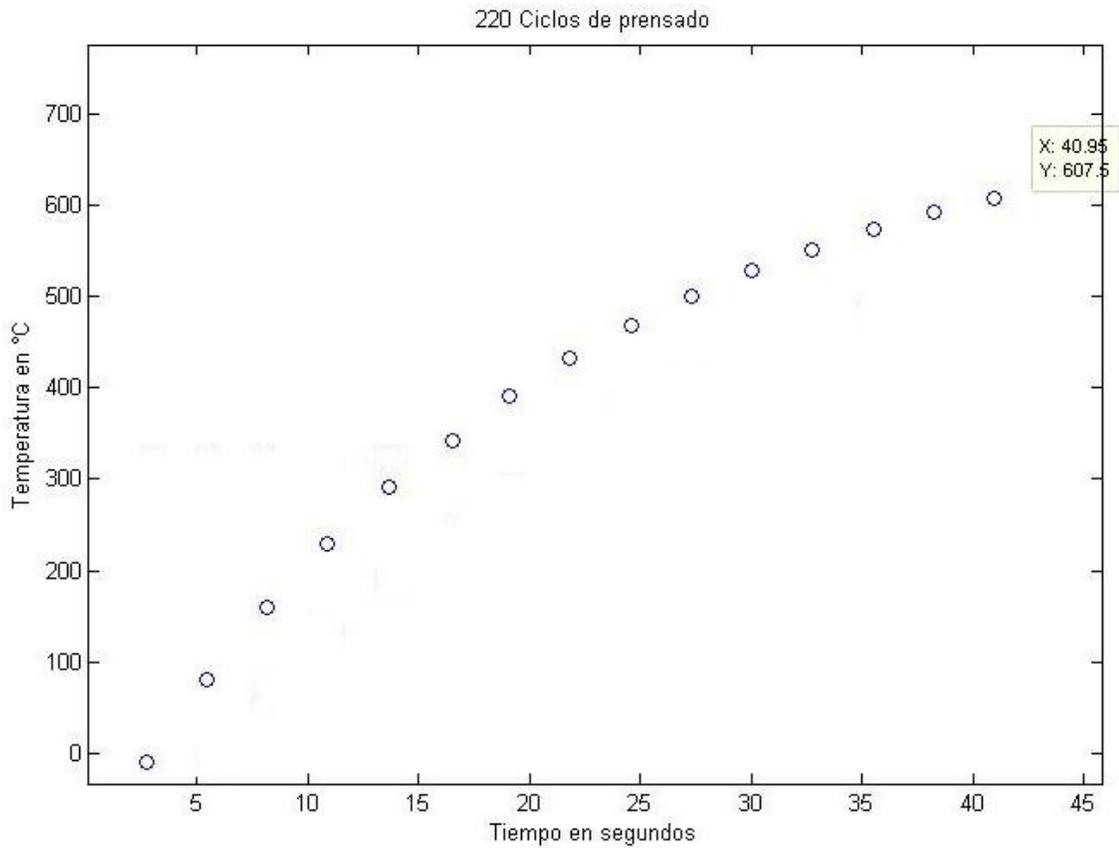
La figura 15 ilustra los cálculos realizados (ver anexo V) por el modelo matemático simplificado, se destaca que para esta figura se han realizado 160 simulaciones, para estos ciclos se observa que la moldura alcanza la temperatura de 369.5°C en un tiempo de 1 hora 50 minutos aproximadamente, para este tiempo los cambios de temperatura del ciclo a ciclo son drásticos y no se puede decir que se puede llegar a un estado estacionario.

La figura 16 ilustra la simulación a los 180 ciclos de prensado (ver anexo V) alcanzando una temperatura de 489.5°C en un tiempo aproximado de 2 horas, se destaca como la diferencia de temperaturas del ciclo a ciclo es menor que la figura 15 a pesar de esto la temperatura que se alcanza sigue estando por debajo de la temperatura reportada por la literatura pero dentro del rango de temperatura que reporta la industria para trabajar.



**Figura 16. Cálculo del comportamiento de la moldura después de 180 artículos prensados.**

Para la figura 17 calculando 220 ciclos de prensado (ver anexo V) se observa cómo sobrepasa la temperatura recomendada por la literatura [3, 4, 7, 12, 17, 22, 23]; en este punto la temperatura de un ciclo anterior en comparación del último ciclo tienen un comportamiento similar.



**Figura 17. Cálculo del comportamiento de la moldura después de 220 artículos prensados.**

De esta información se puede observar en la figura 18 que al comparar las figuras estas tienen ciertas similitudes, si se observa el termopar 1, 2, 3 y 4 de la figura inferior estos se asemejan a las tendencias de la figura superior así como el termopar de “Ambiente”. De igual manera parecía que en la figura 19 son semejantes a las tendencias que tiene la figura superior del modelo matemático a las de la figura inferior; esta información indica que la moldura por su comportamiento térmico se puede evaluar con este modelo matemático simplificado de Fourier proporcionando resultados similares a los que podría presentar la moldura cuando está siendo calentada en el proceso.

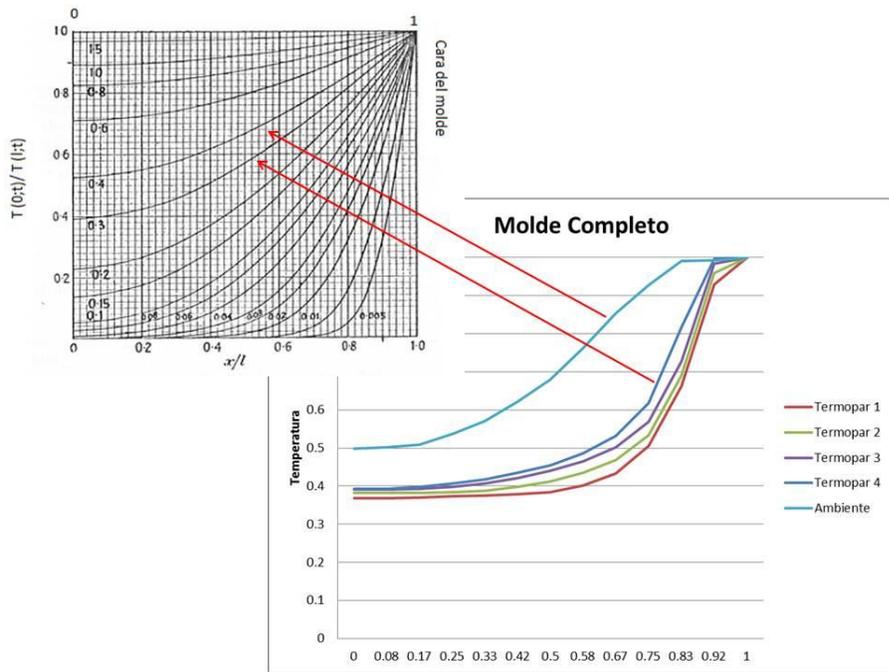


Figura 18. Comparación de figura 3 y figura 13.

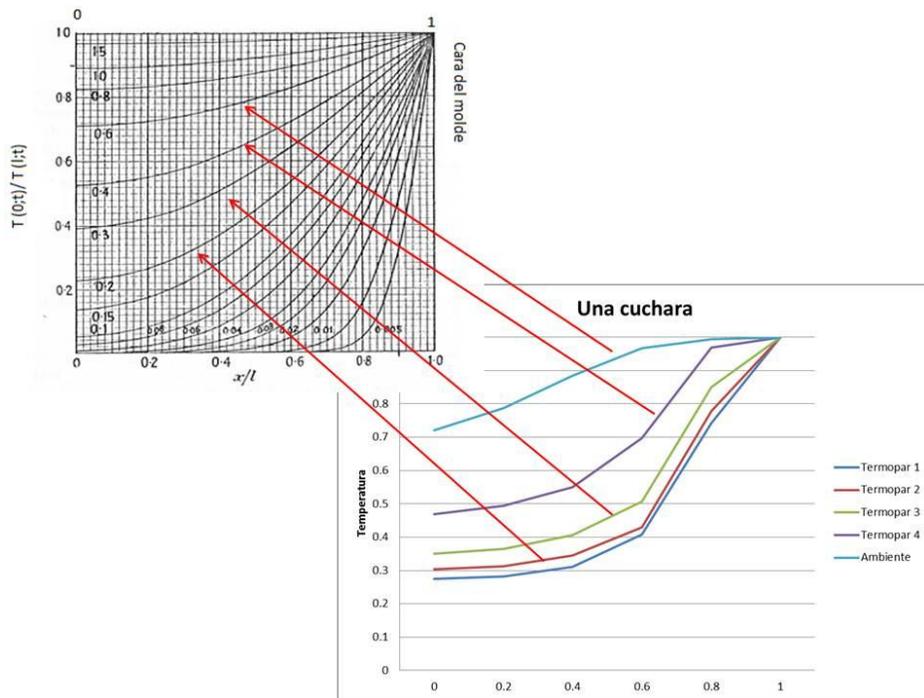


Figura 19. Comparación de figura 3 y figura 14.

De igual manera al hacer la comparación en la figura 20 se puede observar como la tendencia obtenida del modelo matemático en la parte inferior (160 ciclos), se asemeja a la tendencia 2 de la figura 4.

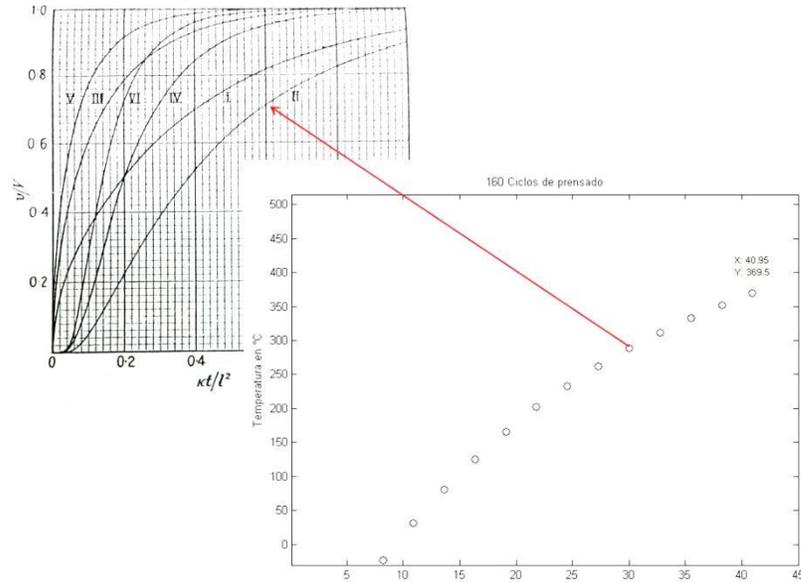


Figura 20. Comparación de figura 4 y figura 15.

En la figura 21 también se observa que en la tendencia calculada, parte inferior, tiene un comportamiento con el cual se puede hacer referencia a la tendencia 2 de la figura 4.

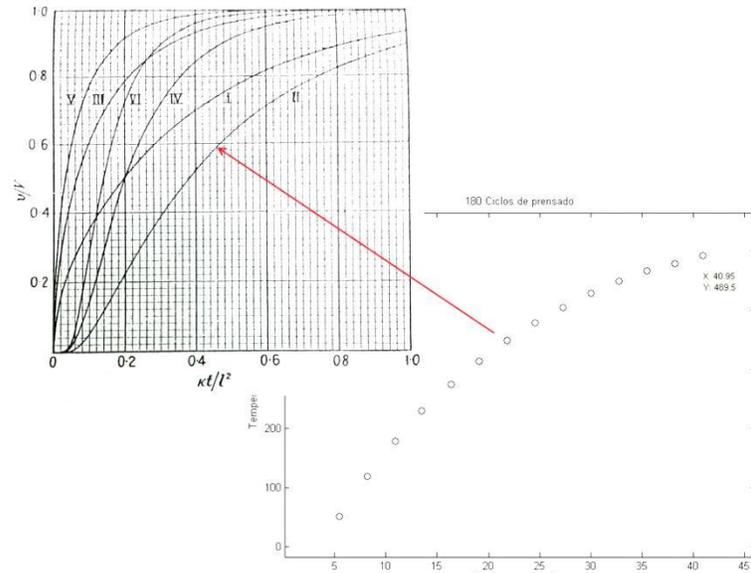


Figura 21. Comparación de figura 4 y figura 16.

En la figura 22 se observa en la comparación de las gráficas donde una vez más el modelo matemático y la figura cuatro tienden a tener un comportamiento similar.

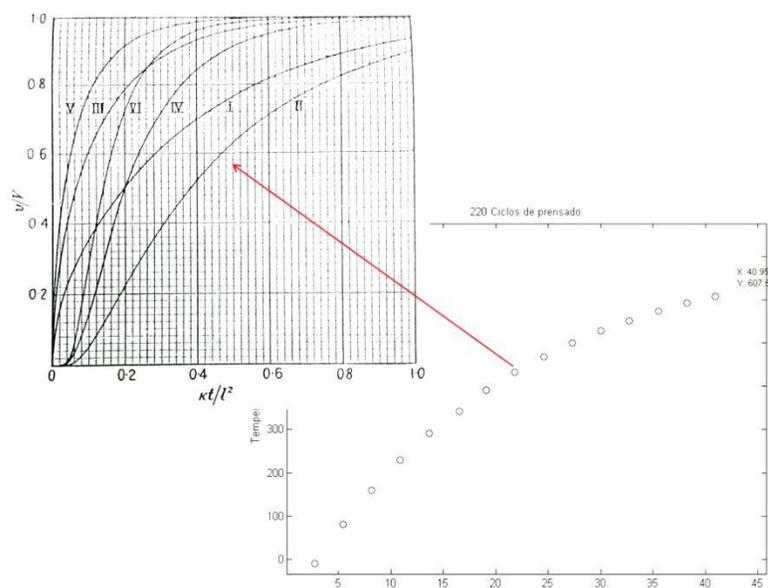


Figura 22. Comparación de figura 4 y figura 17.

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

A partir del modelo simplificado se encuentra que la moldura necesita al menos 2:50 horas para alcanzar la temperatura recomendada por la literatura [3, 4, 7, 12, 17, 22, 23]. Además al mostrar los resultados indican que el vidrio, al momento de ponerse en contacto con las dos placas, su conductividad ayuda a que esta fluya aun que las temperaturas de las placas sean diferentes ya que el choque térmico que estas pueden generar, no llega a afectar el flujo del vidrio incluso con espesores menores de vidrio; ya que al tener una diferencia de temperatura grande el centro de la masa de vidrio está a la temperatura necesaria para fluir de manera adecuada.

El calentamiento gradual sería ideal para que la moldura no sufriera el esfuerzo térmico que tiene, y al mismo tiempo el choque térmico del vidrio con la moldura sea menor.

Con este trabajo se demuestra que un modelo de transferencia de calor simplificado unidireccional, donde no se tienen cambios en la geometría, con una capa de vidrio delgada y casi plana según las características del proceso es válido. Además el diseño la moldura tiende a almacenar el calor suficiente para trabajar a bajas velocidades y mantener una temperatura dentro del rango óptimo; pero para llegar a este punto es necesario dar mas tiempo en el que la moldura tiene una fuente de calor y limitar los momentos que esta no lo tiene. Esto ayuda a que las pérdidas por convección al momento en que la fuente de calor es extraída del molde sean menores y sea más fácil alcanzar un estado estacionario en un menor tiempo; y al mismo tiempo más sencillo estar dentro de los rangos de temperatura óptimos.

Es posible describir el comportamiento térmico de la moldura mediante la ecuación de Fourier para transferencia de calor en condiciones unidireccionales.

Según los resultados de los cálculos realizados por el modelo matemático y los resultados obtenidos por la experimentación el comportamiento que muestra la moldura es similar por lo que se demuestra que el comportamiento térmico por transferencia de calor de una moldura para vidrio puede ser descrito mediante la ecuación de Fourier para transferencia de calor en condiciones unidireccionales.

El comportamiento térmico del molde utilizando aluminio en lugar de vidrio también corresponde a la descripción que da el molde. Lo que indica que es válida la prueba aunque fue realizada con otra fuente de calor diferente al vidrio

El modelo simplificado funciona y es útil para determinar el tiempo necesario para mantenerse en los rangos de temperatura requeridos para este proceso.

## RECOMENDACIONES

Se debe tomar en cuenta la temperatura del pistón puesto que tiene contacto con el vidrio, este también genera defectos y por el método de enfriamiento que este tiene y el tiempo de contacto con el vidrio este puede ser controlado de manera más fácil.

Aplicar directamente el aire de fraguado a la masa de vidrio, puesto que para la moldura, en su cara exterior, este aire no afecta su comportamiento térmico.

## CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

1. Abramovich, B., *Cooling the molds of glass-molding machinery*. Glass and Ceramics, 1982. **39**(4): p. 189-191.
2. Abramovich, B., *Calculation of cooling system for glass-molding tool*. Glass and Ceramics, 1982. **39**(10): p. 469-473.
3. Abramovich, B. and V. Volkov, *Heat regimes for the operation of automatic glass-molding machines*. Glass and Ceramics, 1987. **44**(1): p. 3-7.
4. Fertik, H., *Feedforward control of glass mold colling*. Automatica, 1977. **13**(3): p. 225-234.
5. Flom, Z.G. and A.G. Kofman, *Calculation of glass viscosity in the temperature interval of formation*. Glass and Ceramics, 1985. **42**(7): p. 302-304.
6. Hsich, H.Y., *Glass workability study and correlation of melting history, microstructure, apparent liquidus temperature, and mechanical strength*. Journal of Materials Science, 1979. **14**(11): p. 2581-2588.
7. Guloyan, Y.A., *On the theory of glass solidification*. Glass and Ceramics, 2004. **61**(11-12): p. 395-398.
8. Carro de la Fuente, G., *Optimizacion de un equipo de moldes a traves de la simulacion computacional de su desempeño termico*. Vitrocrisa, 1990.
9. Carro de la Fuente, G., *Simulacion computacional del desempeño termico de la moldura del articulo #44296 y propuesta de nuevo diseño con incremento de produccion*. Vitrocrisa, 1992.
10. Carro de la Fuente, G., *Analisis de dos sistemas de enfriamiento para molduras abiertas de taza*. Vitrocrisa, 1995.

11. Navarro, J.M.F., *El vidrio*. Segunda ed. Vol. 6. 1991: Editorial CSIC-CSIC Press.
12. Seeman, T.A., *Method for producing a pressed glass article*, 1982, Google Patents.
13. Laevsky, K., B.J. van der Linden, and R.M.M. Mattheij, *Flow and heat transfer in pressing of glass products*, in *Computational Mathematics Driven by Industrial Problems*, R. Burkard, et al., Editors. 2000, Springer Berlin Heidelberg. p. 267-285.
14. Hsich, H.S.-Y., *Glass workability study and correlation of melting history, microstructure, apparent liquidus temperature, and mechanical strength*. Journal of Materials Science, 1979. **14**(11): p. 2581-2588.
15. Rienstra, S.W. and T.D. Chandra, *Analytical approximations to the viscous glass-flow problem in the mould-plunger pressing process, including an investigation of boundary conditions*. Journal of Engineering Mathematics, 2001. **39**(1): p. 241-259.
16. Boyer, H.E. and T.L. Gall, *Metals handbook; desk edition*. 1985.
17. Vorob'ev, N., et al., *Dynamics of thermal conditions of molds in molding glass articles*. Glass and Ceramics, 2000. **57**(5-6): p. 152-153.
18. Tyurnina, Z.G., S.I. Lopatin, and V.L. Stolyarova, *Thermodynamic properties of silicate glasses and melts: IV. System BaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>*. Russian Journal of General Chemistry, 2008. **78**(1): p. 14-18.
19. Pleskach, V., et al., *Use of finned outer surfaces for intensifying cooling of glass molds*. Glass and Ceramics, 1986. **43**(9): p. 405-408.
20. Flom, Z. and P. Koltun, *Calculating wall thickness of a glass mold*. Glass and Ceramics, 1988. **45**(1): p. 3-7.
21. Guloyan, Y.A., *Solidification of glass in molding (a review)*. Glass and Ceramics, 2004. **61**(11-12): p. 357-361.
22. Genzelev, S., et al., *A vigorously cooled glass mold*. Glass and Ceramics, 1989. **46**(5): p. 188-190.
23. Fertik, H.A., *Control system for mold cooling in glass forming machine*, 1976, Google Patents.

24. Horatio Scott Carslaw, J.J.C.J., *Conduction of Heat in Solids* 1959, Great Britain: Oxford University.
25. Rieser, D., G. Spieß, and P. Manns, *Investigations on glass-to-mold sticking in the hot forming process*. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008. **354**(12–13): p. 1393-1397.

## ANEXO I

Lectura de termopares en molde lleno

Tabla 4. Lectura de termopares en molde lleno.

<b>Minuto</b>	<b>T1 °C</b>	<b>T2 °C</b>	<b>T3 °C</b>	<b>T4 °C</b>	<b>Ambiente °C</b>
1	134.30524	125.94826	116.0055	92.996798	63.144021
2	144.56753	131.44656	117.93763	92.54829	62.696254
3	203.15733	182.4075	159.6652	113.28494	63.286896
4	266.18048	235.74002	203.90784	149.68776	67.600134
5	309.7082	268.78337	230.90708	173.98359	73.392448
6	333.87475	289.73875	249.40602	190.47735	82.305905
7	349.30272	305.00046	263.86823	203.7165	92.351634
8	359.86263	316.73619	275.50385	213.04024	101.03584
9	365.04838	324.92212	284.86003	221.50998	109.98231
10	365.01002	328.89487	291.18611	227.8786	116.58486
11	362.35539	330.13568	295.2854	232.11936	123.15345
12	358.23568	329.38287	297.16043	235.84467	125.60503
13	354.91226	327.88933	297.24859	235.75103	124.85821

## ANEXO II

Lectura de termopares a 1.646 kg de aluminio

Tabla 5. Lectura de termopares a 1.646 kg de aluminio.

<b>Minuto</b>	<b>T1 °C</b>	<b>T2 °C</b>	<b>T3 °C</b>	<b>T4 °C</b>	<b>Ambiente °C</b>
1	52.79701	51.27651	49.26552	44.49463	38.41157
2	71.08839	65.93346	57.97619	45.9083	38.20744
3	129.2811	119.2553	97.13684	63.81397	39.54545
4	169.8051	148.8091	121.5507	80.85002	43.2028
5	187.4975	163.8092	135.025	90.0473	48.58666
6	192.3863	168.9855	140.6899	94.91857	53.04446

## ANEXO III

Normalización de las temperaturas obtenidas del molde lleno

Tabla 6. Normalización de las temperaturas obtenidas del molde lleno.

x/l	$T(0;t)/T1(l;t)$	$T(0;t)/T2(l;t)$	$T(0;t)/T3(l;t)$	$T(0;t)/T4(l;t)$	$T(0;t)/T_{\text{ambiente}}(l;t)$
.08	0.3679108	0.3815045	0.3902642	0.392412	0.499154
.17	0.3679495	0.3823765	0.39038	0.3925679	0.502139596
.25	0.3706451	0.3829438	0.3928589	0.3987099	0.509090518
.33	0.3732125	0.3841182	0.3983895	0.4061298	0.537773569
.42	0.3749075	0.387626	0.4072368	0.4178064	0.570057633
.5	0.3784182	0.397644	0.4210667	0.4344169	0.620534791
.58	0.3844953	0.4129445	0.4396342	0.4542994	0.678886237
.67	0.4022624	0.4346959	0.4651271	0.4858756	0.761746722
.75	0.4336509	0.4685865	0.5023904	0.5319369	0.854260287
.83	0.5045646	0.5342676	0.5689114	0.6182756	0.92745753
.92	0.6610898	0.6904774	0.7265547	0.8169514	0.99066723
1	0.9290139	0.9581708	0.9836174	0.9951772	0.992908795

## ANEXO IV

Normalización de temperaturas obtenidas de 1.646 kg de aluminio

Tabla 7. Normalización de temperaturas obtenidas de 1.646 kg de aluminio.

<b>x/l</b>	<b>T(0;t)/ T1(l;t)</b>	<b>T(0;t)/ T2(l;t)</b>	<b>T(0;t)/ T3(l;t)</b>	<b>T(0;t)/ T4(l;t)</b>	<b>T(0;t)/ Tambiente (l;t)</b>
<b>0</b>	0.27443226	0.30343739	0.35017094	0.4687664	0.72029086
<b>.2</b>	0.28158785	0.31302582	0.36486207	0.4941251	0.78637719
<b>.4</b>	0.31092715	0.34457904	0.40530826	0.5503355	0.88437419
<b>.6</b>	0.40838913	0.42997272	0.50717645	0.6972554	0.9661654
<b>.8</b>	0.74269516	0.77770086	0.84975431	0.9692068	0.99468582
<b>1</b>	1	1	1	1	1

## ANEXO V

Resultados del modelo matemático a 160 ciclos, 180 ciclos y 220 ciclos.

**Tabla 8. Resultados del modelo matemático a 160 ciclos, 180 ciclos y 220 ciclos.**

<b>T °C a 160 Ciclos</b>	<b>T °C a 180 Ciclos</b>	<b>T °C a 220 Ciclos</b>
451.0278	447.7628	331.7626
596.1256	425.4694	535.3644
475.1111	527.0742	607.5405
550.2533	612.3134	680.6976
515.7585	630.5713	329.8399
434.9587	610.084	466.4889
235.3848	589.9629	551.7878
18.988	253.2923	638.7869
312.0093	593.4679	322.0538
588.8141	681.0788	322.7085
551.2347	465.4886	323.3622
464.277	450.3971	80.7512
581.0689	538.4371	118.4141
487.0957	607.6514	324.0147
543.1943	620.7839	65.4932
518.4853	604.6047	160.4869
436.2729	590.0249	28.9849
242.8801	255.4965	304.563
47.9948	593.3351	324.6662
333.2051	672.0139	130.8829
580.8196	481.0079	230.2972
547.2019	471.5519	174.7052
475.1398	547.7535	433.2371
569.1813	603.9707	325.3166
496.1775	613.3672	189.7528
538.077	600.6326	291.4177
520.3703	590.0679	289.7544
437.5678	257.6863	522.1821
250.1812	593.2076	325.966

75.3374	663.8529	242.753
352.2876	494.5955	344.9301
573.8203	489.5047	380.5882
543.7794	555.3919	583.6647
484.0462	601.0646	326.6143
559.7958	607.747	290.4687
503.0596	597.7531	391.7813
534.3673	590.0975	452.3033
521.6732	251.0736	626.1641
438.8437	593.6063	327.2615
257.293	691.1476	333.4268
101.1114	447.7628	432.8006
369.4674	425.4694	508.9239
567.6922	527.0742	655.5416
540.875	612.3134	327.9077
491.3485	630.5713	372.1016
552.3857	610.084	468.7139
508.2746	589.9629	553.6271
531.678	223.2809	675.8485
522.5738	595.7962	328.5528
434.9587	573.2677	406.9203
235.3848	225.6815	500.1567
18.988	595.5698	588.9211
312.0093	29.5902	689.8855
588.8141	578.4845	329.1969
551.2347	228.0664	438.2673
464.277	595.3525	527.6856
581.0689	52.0884	616.7865
487.0957	130.5538	699.5885
543.1943	582.0906	329.8399
518.4853	230.4357	466.4889
417.5769	595.1439	551.7878
128.262	119.067	638.7869
11.6046	213.333	330.4818
419.1459	584.5833	491.8965
138.5337	232.7894	572.8898
686.6355	594.9437	656.1566
169.9926	177.7082	331.1227
420.692	281.2031	514.7708
148.5391	586.3064	591.365
662.1088	235.1278	669.8703
85.2072	594.7516	331.7626
279.4771	229.0499	535.3644

422.2153	70.6393	607.5405
158.2852	336.8492	680.6976
641.2943	587.4974	330.4818
164.3434	237.4509	491.8965
69.5356	594.5672	572.8898
355.1575	274.0007	656.1566
423.7163	149.2733	322.0538
167.7787	382.4731	322.7085
32.0366	681.6136	323.3622
623.6302	588.3207	80.7512
229.2265	239.7587	118.4141
179.7576	594.3901	324.0147
407.4711	313.3561	65.4932
425.1954	216.0055	160.4869
177.0262	419.8798	28.9849
81.1477	662.3654	304.563
687.4551	689.6558	324.6662
608.6398	588.8898	130.8829
282.4237	242.0515	230.2972
263.282	594.2203	174.7052
443.6324	347.8126	433.2371
426.6527	272.6372	325.3166
186.034	450.5492	189.7528
125.362	647.1685	291.4177
667.182	662.2893	289.7544
595.9182	589.2832	522.1821
326.0397	244.3293	325.966
326.5753	594.0572	242.753
652.7663	377.98	344.9301
468.6287	320.6973	380.5882
428.0886	475.6949	583.6647
194.8084	635.1702	326.6143
165.1679	683.0233	290.4687
649.4324	642.4503	391.7813
585.1222	589.5551	452.3033
361.8001	246.5921	626.1641
374.5379	593.9007	327.2615
617.5098	404.3922	333.4268
485.9072	361.4831	432.8006
429.5035	496.3116	508.9239
203.3554	625.6973	655.5416
201.0049	660.5312	327.9077
633.8923	628.0683	372.1016

---

575.9602	589.7431	468.7139
391.1198	248.8402	553.6271
669.9453	593.7505	675.8485
410.8831	427.5167	328.5528
591.9511	396.0957	406.9203
497.8508	513.2151	500.1567
430.8977	618.2183	588.9211
211.6808	643.487	689.8855
233.2686	617.6422	329.1969
620.2866	589.873	438.2673
568.1849	251.0736	527.6856
415.1588	593.6063	616.7865
639.3511	691.1476	699.5885
438.4249	447.7628	329.8399
573.4226	425.4694	466.4889
506.1068	527.0742	551.7878
432.2714	612.3134	638.7869
219.7905	630.5713	330.4818
262.3154	610.084	491.8965
608.3745	589.9629	572.8898
561.5865	253.2923	656.1566
434.8682	593.4679	331.1227
615.1963	681.0788	514.7708
459.2956	465.4886	591.365
559.9906	450.3971	669.8703
511.8137	538.4371	331.7626
433.625	607.6514	535.3644
227.69	620.7839	607.5405
288.4661	604.6047	680.6976
597.9452	590.0249	331.1227
555.9869	255.4965	514.7708
451.0278	593.3351	591.365
596.1256	672.0139	669.8703
475.1111	481.0079	322.0538
550.2533	471.5519	322.7085
515.7585	547.7535	323.3622
434.9587	603.9707	80.7512
235.3848	613.3672	118.4141
18.988	600.6326	324.0147
312.0093	590.0679	65.4932
588.8141	257.6863	160.4869
551.2347	593.2076	28.9849
464.277	663.8529	304.563

---

581.0689	494.5955	324.6662
487.0957	489.5047	130.8829
543.1943	555.3919	230.2972
518.4853	601.0646	174.7052
436.2729	607.747	433.2371
242.8801	597.7531	325.3166
47.9948	590.0975	189.7528
333.2051	253.2923	291.4177
580.8196	593.4679	289.7544
547.2019	681.0788	522.1821
475.1398	465.4886	325.966
569.1813	450.3971	242.753
496.1775	538.4371	344.9301
538.077	607.6514	380.5882
520.3703	620.7839	583.6647
437.5678	604.6047	326.6143
250.1812	590.0249	290.4687
75.3374	223.2809	391.7813
352.2876	595.7962	452.3033
573.8203	573.2677	626.1641
543.7794	225.6815	327.2615
484.0462	595.5698	333.4268
559.7958	29.5902	432.8006
503.0596	578.4845	508.9239
534.3673	228.0664	655.5416
521.6732	595.3525	327.9077
438.8437	52.0884	372.1016
257.293	130.5538	468.7139
101.1114	582.0906	553.6271
369.4674	230.4357	675.8485
567.6922	595.1439	328.5528
540.875	119.067	406.9203
491.3485	213.333	500.1567
552.3857	584.5833	588.9211
508.2746	232.7894	689.8855
531.678	594.9437	329.1969
522.5738	177.7082	438.2673
436.2729	281.2031	527.6856
242.8801	586.3064	616.7865
47.9948	235.1278	699.5885
333.2051	594.7516	329.8399
580.8196	229.0499	466.4889
547.2019	70.6393	551.7878

475.1398	336.8492	638.7869
569.1813	587.4974	330.4818
496.1775	237.4509	491.8965
538.077	594.5672	572.8898
520.3703	274.0007	656.1566
417.5769	149.2733	331.1227
128.262	382.4731	514.7708
11.6046	681.6136	591.365
419.1459	588.3207	669.8703
138.5337	239.7587	331.7626
686.6355	594.3901	535.3644
169.9926	313.3561	607.5405
420.692	216.0055	680.6976
148.5391	419.8798	331.7626
662.1088	662.3654	535.3644
85.2072	689.6558	607.5405
279.4771	588.8898	680.6976
422.2153	242.0515	322.0538
158.2852	594.2203	322.7085
641.2943	347.8126	323.3622
164.3434	272.6372	80.7512
69.5356	450.5492	118.4141
355.1575	647.1685	324.0147
423.7163	662.2893	65.4932
167.7787	589.2832	160.4869
32.0366	244.3293	28.9849
623.6302	594.0572	304.563
229.2265	377.98	324.6662
179.7576	320.6973	130.8829
407.4711	475.6949	230.2972
425.1954	635.1702	174.7052
177.0262	683.0233	433.2371
81.1477	642.4503	325.3166
687.4551	589.5551	189.7528
608.6398	246.5921	291.4177
282.4237	593.9007	289.7544
263.282	404.3922	522.1821
443.6324	361.4831	325.966
426.6527	496.3116	242.753
186.034	625.6973	344.9301
125.362	660.5312	380.5882
667.182	628.0683	583.6647
595.9182	589.7431	326.6143

326.0397	248.8402	290.4687
326.5753	593.7505	391.7813
652.7663	427.5167	452.3033
468.6287	396.0957	626.1641
428.0886	513.2151	327.2615
194.8084	618.2183	333.4268
165.1679	643.487	432.8006
649.4324	617.6422	508.9239
585.1222	589.873	655.5416
361.8001	251.0736	327.9077
374.5379	593.6063	372.1016
617.5098	691.1476	468.7139
485.9072	447.7628	553.6271
429.5035	425.4694	675.8485
203.3554	527.0742	328.5528
201.0049	612.3134	406.9203
633.8923	630.5713	500.1567
575.9602	610.084	588.9211
391.1198	589.9629	689.8855
669.9453	253.2923	329.1969
410.8831	593.4679	438.2673
591.9511	681.0788	527.6856
497.8508	465.4886	616.7865
430.8977	450.3971	699.5885
211.6808	538.4371	329.8399
233.2686	607.6514	466.4889
620.2866	620.7839	551.7878
568.1849	604.6047	638.7869
415.1588	590.0249	330.4818
639.3511	255.4965	491.8965
438.4249	593.3351	572.8898
573.4226	672.0139	656.1566
506.1068	481.0079	331.1227
432.2714	471.5519	514.7708
219.7905	547.7535	591.365
262.3154	603.9707	669.8703
608.3745	613.3672	331.7626
561.5865	600.6326	535.3644
434.8682	590.0679	607.5405
615.1963	257.6863	680.6976
459.2956	593.2076	
559.9906	663.8529	
511.8137	494.5955	

---

433.625	489.5047
227.69	555.3919
288.4661	601.0646
597.9452	607.747
555.9869	597.7531
451.0278	590.0975
596.1256	255.4965
475.1111	593.3351
550.2533	672.0139
515.7585	481.0079
434.9587	471.5519
235.3848	547.7535
18.988	603.9707
312.0093	613.3672
588.8141	600.6326
551.2347	590.0679
464.277	223.2809
581.0689	595.7962
487.0957	573.2677
543.1943	225.6815
518.4853	595.5698
436.2729	29.5902
242.8801	578.4845
47.9948	228.0664
333.2051	595.3525
580.8196	52.0884
547.2019	130.5538
475.1398	582.0906
569.1813	230.4357
496.1775	595.1439
538.077	119.067
520.3703	213.333
437.5678	584.5833
250.1812	232.7894
75.3374	594.9437
352.2876	177.7082
573.8203	281.2031
543.7794	586.3064
484.0462	235.1278
559.7958	594.7516
503.0596	229.0499
534.3673	70.6393
521.6732	336.8492

---

438.8437	587.4974
257.293	237.4509
101.1114	594.5672
369.4674	274.0007
567.6922	149.2733
540.875	382.4731
491.3485	681.6136
552.3857	588.3207
508.2746	239.7587
531.678	594.3901
522.5738	313.3561
437.5678	216.0055
250.1812	419.8798
75.3374	662.3654
352.2876	689.6558
573.8203	588.8898
543.7794	242.0515
484.0462	594.2203
559.7958	347.8126
503.0596	272.6372
534.3673	450.5492
521.6732	647.1685
417.5769	662.2893
128.262	589.2832
11.6046	244.3293
419.1459	594.0572
138.5337	377.98
686.6355	320.6973
169.9926	475.6949
420.692	635.1702
148.5391	683.0233
662.1088	642.4503
85.2072	589.5551
279.4771	246.5921
422.2153	593.9007
158.2852	404.3922
641.2943	361.4831
164.3434	496.3116
69.5356	625.6973
355.1575	660.5312
423.7163	628.0683
167.7787	589.7431
32.0366	248.8402

---

623.6302	593.7505
229.2265	427.5167
179.7576	396.0957
407.4711	513.2151
425.1954	618.2183
177.0262	643.487
81.1477	617.6422
687.4551	589.873
608.6398	251.0736
282.4237	593.6063
263.282	691.1476
443.6324	447.7628
426.6527	425.4694
186.034	527.0742
125.362	612.3134
667.182	630.5713
595.9182	610.084
326.0397	589.9629
326.5753	253.2923
652.7663	593.4679
468.6287	681.0788
428.0886	465.4886
194.8084	450.3971
165.1679	538.4371
649.4324	607.6514
585.1222	620.7839
361.8001	604.6047
374.5379	590.0249
617.5098	255.4965
485.9072	593.3351
429.5035	672.0139
203.3554	481.0079
201.0049	471.5519
633.8923	547.7535
575.9602	603.9707
391.1198	613.3672
669.9453	600.6326
410.8831	590.0679
591.9511	257.6863
497.8508	593.2076
430.8977	663.8529
211.6808	494.5955
233.2686	489.5047

---

620.2866	555.3919
568.1849	601.0646
415.1588	607.747
639.3511	597.7531
438.4249	590.0975
573.4226	257.6863
506.1068	593.2076
432.2714	663.8529
219.7905	494.5955
262.3154	489.5047
608.3745	555.3919
561.5865	601.0646
434.8682	607.747
615.1963	597.7531
459.2956	590.0975
559.9906	223.2809
511.8137	595.7962
433.625	573.2677
227.69	225.6815
288.4661	595.5698
597.9452	29.5902
555.9869	578.4845
451.0278	228.0664
596.1256	595.3525
475.1111	52.0884
550.2533	130.5538
515.7585	582.0906
434.9587	230.4357
235.3848	595.1439
18.988	119.067
312.0093	213.333
588.8141	584.5833
551.2347	232.7894
464.277	594.9437
581.0689	177.7082
487.0957	281.2031
543.1943	586.3064
518.4853	235.1278
436.2729	594.7516
242.8801	229.0499
47.9948	70.6393
333.2051	336.8492
580.8196	587.4974

---

547.2019	237.4509
475.1398	594.5672
569.1813	274.0007
496.1775	149.2733
538.077	382.4731
520.3703	681.6136
437.5678	588.3207
250.1812	239.7587
75.3374	594.3901
352.2876	313.3561
573.8203	216.0055
543.7794	419.8798
484.0462	662.3654
559.7958	689.6558
503.0596	588.8898
534.3673	242.0515
521.6732	594.2203
438.8437	347.8126
257.293	272.6372
101.1114	450.5492
369.4674	647.1685
567.6922	662.2893
540.875	589.2832
491.3485	244.3293
552.3857	594.0572
508.2746	377.98
531.678	320.6973
522.5738	475.6949
438.8437	635.1702
257.293	683.0233
101.1114	642.4503
369.4674	589.5551
567.6922	246.5921
540.875	593.9007
491.3485	404.3922
552.3857	361.4831
508.2746	496.3116
531.678	625.6973
522.5738	660.5312
417.5769	628.0683
128.262	589.7431
11.6046	248.8402
419.1459	593.7505

---

138.5337	427.5167
686.6355	396.0957
169.9926	513.2151
420.692	618.2183
148.5391	643.487
662.1088	617.6422
85.2072	589.873
279.4771	251.0736
422.2153	593.6063
158.2852	691.1476
641.2943	447.7628
164.3434	425.4694
69.5356	527.0742
355.1575	612.3134
423.7163	630.5713
167.7787	610.084
32.0366	589.9629
623.6302	253.2923
229.2265	593.4679
179.7576	681.0788
407.4711	465.4886
425.1954	450.3971
177.0262	538.4371
81.1477	607.6514
687.4551	620.7839
608.6398	604.6047
282.4237	590.0249
263.282	255.4965
443.6324	593.3351
426.6527	672.0139
186.034	481.0079
125.362	471.5519
667.182	547.7535
595.9182	603.9707
326.0397	613.3672
326.5753	600.6326
652.7663	590.0679
468.6287	257.6863
428.0886	593.2076
194.8084	663.8529
165.1679	494.5955
649.4324	489.5047
585.1222	555.3919

---

361.8001	601.0646
374.5379	607.747
617.5098	597.7531
485.9072	590.0975
429.5035	
203.3554	
201.0049	
633.8923	
575.9602	
391.1198	
669.9453	
410.8831	
591.9511	
497.8508	
430.8977	
211.6808	
233.2686	
620.2866	
568.1849	
415.1588	
639.3511	
438.4249	
573.4226	
506.1068	
432.2714	
219.7905	
262.3154	
608.3745	
561.5865	
434.8682	
615.1963	
459.2956	
559.9906	
511.8137	
433.625	
227.69	
288.4661	
597.9452	
555.9869	
451.0278	
596.1256	
475.1111	
550.2533	

---

---

515.7585
434.9587
235.3848
18.988
312.0093
588.8141
551.2347
464.277
581.0689
487.0957
543.1943
518.4853
436.2729
242.8801
47.9948
333.2051
580.8196
547.2019
475.1398
569.1813
496.1775
538.077
520.3703
437.5678
250.1812
75.3374
352.2876
573.8203
543.7794
484.0462
559.7958
503.0596
534.3673
521.6732
438.8437
257.293
101.1114
369.4674
567.6922
540.875
491.3485
552.3857
508.2746

---

---

531.678

522.5738

---

## FICHA BIBLIOGRÁFICA

Daniel Valdez Muñoz nacido en México D.F. el 1° de febrero de 1987 hijo primogénito de Rafael Valdez Borroel y de Maria del Carmen Muñoz Martinez, estudió Ingeniero en Electrónica y Automatización en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, estudiante de maestría en ciencias y tecnología cerámica con orientación en vidrio en la misma institución. Realizó su servicio social en el departamento de ahorro de energía de la Universidad Autónoma de Nuevo León y realizando sus prácticas profesionales en Alestra como ingeniero de soporte. Actualmente labora en Crisa Libbey Mexico como Ingeniero de Proyectos desarrollando proyectos de mejora e innovación en planta.