

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



IMPACTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR
POR RADIACION EN LAS PROPIEDADES DEL
VIDRIO CALIZO DURANTE EL FORMADO
DE CONTENEDORES VITREOS

POR

RAQUEL MENDOZA RESENDEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad en
Ingeniería Cerámica

FEBRERO DE 1998

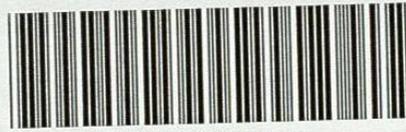
TM

Z5521

FCO

1998

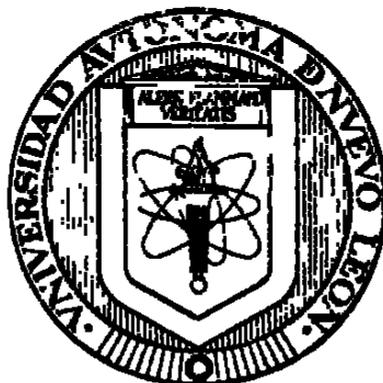
M4



1020120843

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



**IMPACTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR
POR RADIACION EN LAS PROPIEDADES DEL
VIDRIO CALIZO DURANTE EL FORMADO
DE CONTENEDORES VITREOS**

POR

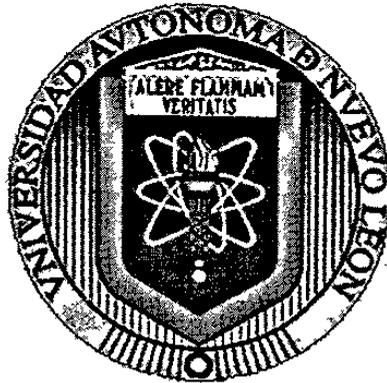
RAQUEL MENDOZA RESENDEZ

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad en
Ingeniería Cerámica**

FEBRERO DE 1998

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**IMPACTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN EN LAS
PROPIEDADES DEL VIDRIO CALIZO DURANTE EL FORMADO DE
CONTENEDORES VÍTREOS**

POR

RAQUEL MENDOZA RESÉNDEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN
INGENIERÍA CERÁMICA**

FEBRERO DE 1998



**FONDO
TESIS**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ IMPACTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN EN LAS
PROPIEDADES DEL VIDRIO CALIZO DURANTE EL FORMADO DE
CONTENEDORES VÍTREOS ”

Aprobación de Tesis.

M.C. ANTONIO LÓPEZ REYES
Asesor y Presidente de Tesis

DR. CARLOS MARTÍNEZ CHITTOY
Secretario y Sinodal

DR. JUAN MANUEL BARBARÍN
Vocal y Sinodal

DR. LUIS C. TORRES GONZÁLEZ
Asesor y Suplente

M.C. MARTHA A. SUÁREZ HERRERA
Coordinadora de la Escuela de
Graduados en Ciencias

Monterrey N. L. Febrero 1998.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	<i>i</i>
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	<i>i</i>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	<i>ii</i>
ABREVIATURAS.....	<i>iii</i>
RESUMEN.....	<i>vi</i>
OBJETIVO.....	<i>vi</i>

CAPÍTULO

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades.....	1
1.2 Antecedentes.....	6
1.3 Resumen del capítulo.....	7

2 MANUFACTURA DE ENVASE

2.1 Proceso general.....	8
2.2 Proceso prensa-soplo.....	9
2.3 Resumen del capítulo.....	12

3 TRANSFERENCIA DE CALOR

3.1 Transferencia de calor por conducción.....	14
3.2 Método numérico de análisis.....	16
3.3 Transferencia de calor por radiación.....	19
3.4 Resumen del capítulo.....	29

4 MÉTODOS EXPERIMENTALES

4.1 Experimental.....	30
4.2 Simulación en computadora.....	32
4.3 Resumen del capítulo.....	33

5 RESULTADOS..... 35

6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES..... 40

7 REFERENCIAS..... 46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Coeficientes de absorción R.Gardon.....	25
Tabla 2	Condiciones iniciales de conducción.....	32
Tabla 3	Modelo Conductivo.....	35
Tabla 4	Modelo Conducción-Radiación.....	37
Tabla 5	Temperaturas de superficie y subsuperficie en envase.....	38

ÍNDICE DE APÉNDICES

APÉNDICE A

Figura A.1	Transferencia por conducción	
	viscosidad vs.tiempo.....	49
Figura A.2	Transferencia por conducción-radiación	
	viscosidad vs. tiempo.....	49
Figura A.3	Comparación de enfriamiento por conducción	
	vs. conducción-radiación.....	50

APÉNDICE B

Figura B.1	Temperatura en envase (corona).....	51
Figura B.2	Temperatura en envase (mitad).....	51
Figura B.3	Temperatura en envase (fondo).....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Curva de viscosidad vs. temperatura	2
Figura 1.2	Curva de dilatación térmica correspondiente a un vidrio recocido y a un vidrio templado.....	4
Figura 1.3	Distribución de tensiones por desaparición rápida de un gradiente térmico	5
Figura 2.1	Proceso prensa - soplo.....	12
Figura 3.1	Conducción unidimensional con generación de calor	15
Figura 3.2	Esquema de análisis numérico.....	16
Figura 3.3	Representación espectro electromagnético	20
Figura 3.4	Radiación de un cuerpo negro	21
Figura 3.5	Longitud de onda vs.coeficiente de absorción	26
Figura 3.6	Reflexiones internas múltiples.....	28
Figura 4.1	Coeficiente de absorción vs. longitud de onda. Gardon.....	31
Figura 5.1	Perfil de temperatura de conducción.....	35
Figura 5.2	Enfriamiento de placa de vidrio conducción-radiación	36
Figura 5.3	Perfil de temperatura conducción-radiación.....	37
Figura 5.4	Perfil de temperatura en envase	39

ABREVIATURAS

C_p	Calor específico volumétrico	cal./cm ³ °C
h	Coefficiente de transferencia de calor convectivo	cal./cm ² seg °C
i	Parámetro de tiempo ($i = t/\Delta t$)	
k	Conductividad térmica	
L	Espesor del plato	
m	Número de intervalos de longitud de onda, usualmente por $\gamma_m = \infty$	
n	Índice de refracción	
N	Número de diferenciales en el plato	
P_i	Fracción de energía del espectro de cuerpo negro contenido en el jth intervalo de longitud de onda	
P'	Función definida en la ec.3.28	
Q	Velocidad de absorción de energía por unidad de volumen	cal./cm ³ seg
r	Parámetro de posición ($r = x/\Delta L$)	
s	Parámetro de posición auxiliar ($s = y/\Delta L$)	
t	Tiempo	seg.
T	Temperatura absoluta	°K
W	Potencia emisiva o flujo radiante	cal/cm ² seg
x	Posición coordinada (distancia de la superficie)	cm
y	Posición coordinada auxiliar (distancia de la superficie)	cm
α	Angulo entre la dirección del haz (en	

	el plato) y la normal al plato	
γ	Coefficiente de absorción	cm^{-1}
ϵ	Emisividad	
λ	Longitud de onda	micras
ρ	(Cuando es asociada con c) densidad	gr/cm^3
ρ_H	Reflectividad principal de superficie para radiación externa difusa	
$\rho_{\perp}, \rho_{\parallel}$	Reflectividad direccional interna para radiación polarizada perpendicular y paralela	
τ	Transmisividad direccional de superficie	
ϕ, ψ	Funciones auxiliares	
g, G	Intensidades de radiación (en general)	
Y_{λ}	Intensidad espectral de radiación	$\text{cal/cm}^2 \text{ seg sterad } \mu$
j_{λ}	Potencia emisiva de volumen espectral	$\text{cal/cm}^3 \text{ seg sterad } \mu$
β	Angulo entre la dirección del haz en el aire y la normal al plato	
a	Atmósfera ambiental	
A	Se refiere a la absorción de radiación externa	
B	Radiación de un cuerpo negro	
c	centro del plato	
C	conductivo	
E	Se refiere a la radiación emitida internamente	
H	Se refiere a la radiación del ambiente	
j	Del j-ésimo intervalo de longitud de onda, caracterizado por un coeficiente de absorción γ_j	
m	El m-ésimo intervalo de longitud de onda, caracterizado $\gamma_m = \infty$	
R	Se refiere parte reabsorbida de radiación emitida internamente	

- ⊥ Para radiación polarizada perpendicularmente al plano de incidencia
- ⊥⊥ Para radiación polarizada paralela al plano de incidencia
- ‘ Denota ángulo de incidencia dependiente de variables
- * Antes de la primera reflexión interna
- ** Después de una o más reflexiones internas

RESUMEN

El presente estudio se desarrolló con el **objetivo** de realizar un análisis del impacto de la transferencia de calor por radiación intercapa en las propiedades del vidrio calizo. Para realizar el trabajo se consideró vidrio sódico cálcico, específicamente el utilizado para envases.

Al inicio de éste trabajo se piensa que la transferencia de calor por radiación tiene un impacto positivo en las propiedades del vidrio, y es interesante determinarlos porque podría estar fuera de los parámetros de manufactura.

Se realizaron pruebas experimentales en una planta de artículos de mesa en envases de vino, donde se tomaron mediciones de temperatura en la superficie y en la sub-superficie del vidrio. También se realizó un análisis comparativo entre la transferencia de calor por conducción de un modelo matemático y por conducción - radiación validada en literatura, ambas simulando el enfriamiento de una placa de vidrio calizo.

En los resultados se menciona el porcentaje de diferencia entre el modelo de conducción y el modelo de conducción - radiación, al comparar los resultados de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor mencionados y se analiza el efecto en algunas propiedades del vidrio. Como posibles causas atribuimos que el modelo conductivo no considera los efectos de emisión y reabsorción de energía, ni las variaciones del coeficiente de absorción.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Una de las características de los cuerpos vítreos ó vidrio es que a la temperatura ambiente, parecen cuerpos sólidos, pero no se les puede considerar así porque carecen de un ordenamiento periódico en la posición de los iones llamado estructura cristalina que caracteriza y define al estado sólido.

Se define al **vidrio** [2] como un sólido amorfo, obtenido por enfriamiento de una masa fundida, de cualquier composición y zona de temperatura en la que ocurra la solidificación. Como efecto del aumento de la viscosidad durante el enfriamiento, los vidrios adquieren algunas propiedades de los sólidos. La transición del estado líquido al estado vítreo debe ser reversible.

La materia prima del vidrio es principalmente de arena sílica, carbonato de calcio, carbonato de sodio y otros óxidos en menor cantidad. Varían los porcentajes dependiendo del tipo de vidrio que se requiera.

Es un material ampliamente utilizado, entre sus ventajas está la de ser un material que es reciclable, tiene resistencia química como contenedor, es aislante eléctrico, fácil de colorear, transparente; el tipo de vidrio de interés en éste trabajo es el sódico cálcico utilizado en la fabricación de envases y artículos de mesa.

Las propiedades del vidrio dependen de las características estructurales, y la estructura está condicionada por la composición química y por la historia térmica.

Mencionando propiedades, haremos referencia a la **viscosidad** [2] de un fluido, definida como la resistencia al deslizamiento que existe entre las moléculas. La viscosidad determina el comportamiento del vidrio en un amplio

intervalo de temperatura. Debido a esto es importante a nivel industrial, porque de ésta depende gran parte del proceso de manufactura del vidrio.

Uno de los problemas más fuertes en la industria del vidrio es la **productividad** y ésta es incrementada si se aumenta la velocidad de producción en la manufactura, específicamente en el proceso de formado. La viscosidad del vidrio es altamente dependiente de la temperatura, por lo tanto la transferencia de calor en las etapas de producción debe estar bien controlada. La Fig.1.1 muestra la curva característica de viscosidad vs. temperatura de un vidrio típico [2].

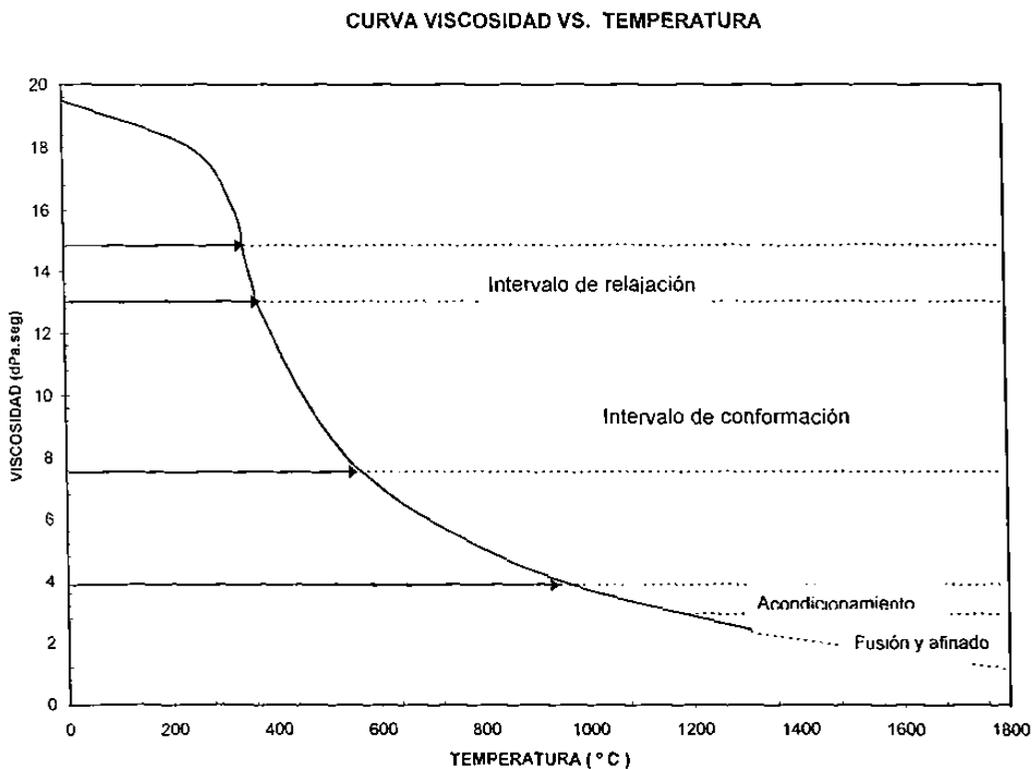


Fig.1.1 Curva característica de viscosidad vs. temperatura

Mencionamos tres puntos importantes en el proceso de fabricación del vidrio que pueden ser referidos a la gráfica de la Fig.1.1 :

- 1) Punto inferior de recocido (strain). Indica la temperatura inicial del intervalo de relajación y requiere un tiempo de 16 hrs. para relajar tensiones
- 2) Punto superior de recocido (annealing). Indica la temperatura final del intervalo de relajación y se estima que se tiene 15 min. para relajar tensiones.
- 3) Punto de reblandecimiento (softening). Punto en el cual el vidrio experimenta alargamiento característico, de acuerdo a Littleton [3].

El intervalo de relajación se le llama así porque en este período ocurre el reacomodo estructural del vidrio. Está comprendido entre el punto inferior y superior de recocido, en este rango ocurre la relajación de tensiones.

Otra propiedad es la **dilatación térmica** [2], definida como la dilatación que presentan la mayoría de los materiales por acción del calor, como consecuencia del aumento de energía interna, que determina una mayor amplitud de las vibraciones térmicas moleculares y, por lo tanto una distancia mayor entre sus constituyentes estructurales. Este distanciamiento es dependiente de la temperatura, y se le denomina **Coefficiente de Expansión**. Existen tres tipos de coeficiente el de volumen β , el superficial γ , y el lineal α . Nos referiremos a éste último en lo siguiente.

La historia térmica del material tiene influencia en el coeficiente de dilatación, la Fig.1.2 representa el grado de relajación estructural del vidrio y

las desviaciones de su volumen específico con respecto a un enfriamiento ideal.

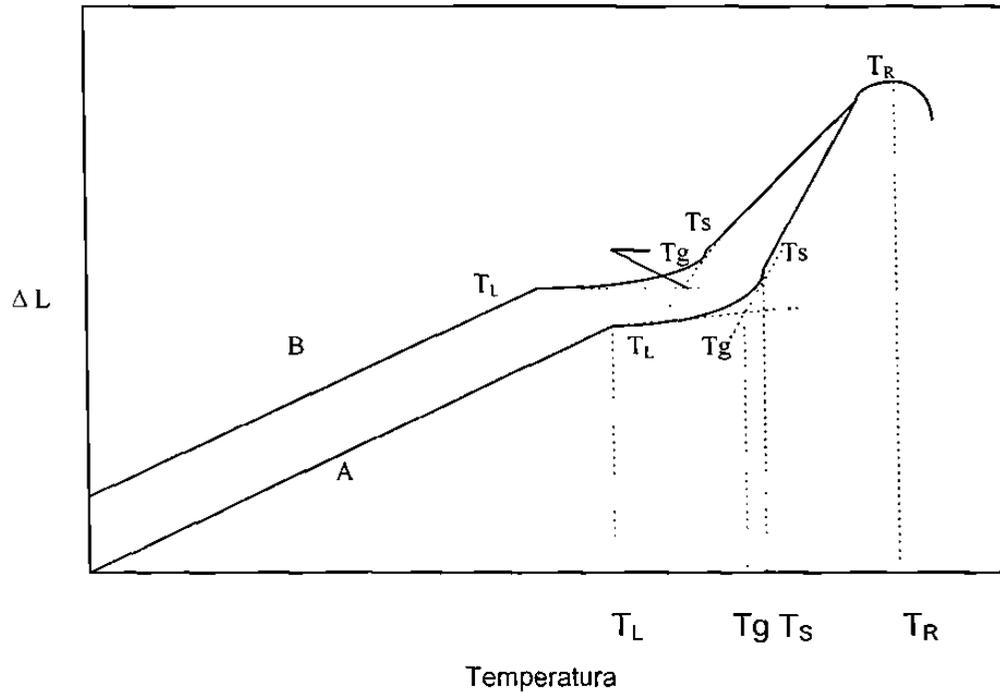


Fig.1.2 Curva de dilatación térmica correspondiente a un vidrio recocido y a un vidrio templado.

El coeficiente de dilatación lineal está definido como $\alpha = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T}$ que corresponde a la pendiente. Los puntos T_L y T_S delimitan el intervalo de relajación o de transformación en que se produce la transición al estado vítreo y coinciden con los puntos inferior y superior de recocido.

Las tensiones se originan en el período de relajación porque al enfriar rápido, la disipación térmica no tiene la misma velocidad en toda la masa, sino que existe un gradiente de temperatura desde el centro de la pieza hacia la

superficie. Las capas exteriores se enfrían primero y alcanzan su rigidez, contrayéndose antes que las capas internas que están calientes y en estado plástico.

Al disminuir el gradiente térmico, éstas también se contraen, pero no lo hacen libremente, porque existe la fuerza de compresión que genera la rigidez de las capas superficiales.

Al igualarse las temperaturas habrá esfuerzos de compresión en la superficie y de tracción en el interior, como se muestra en la figura 1.3.

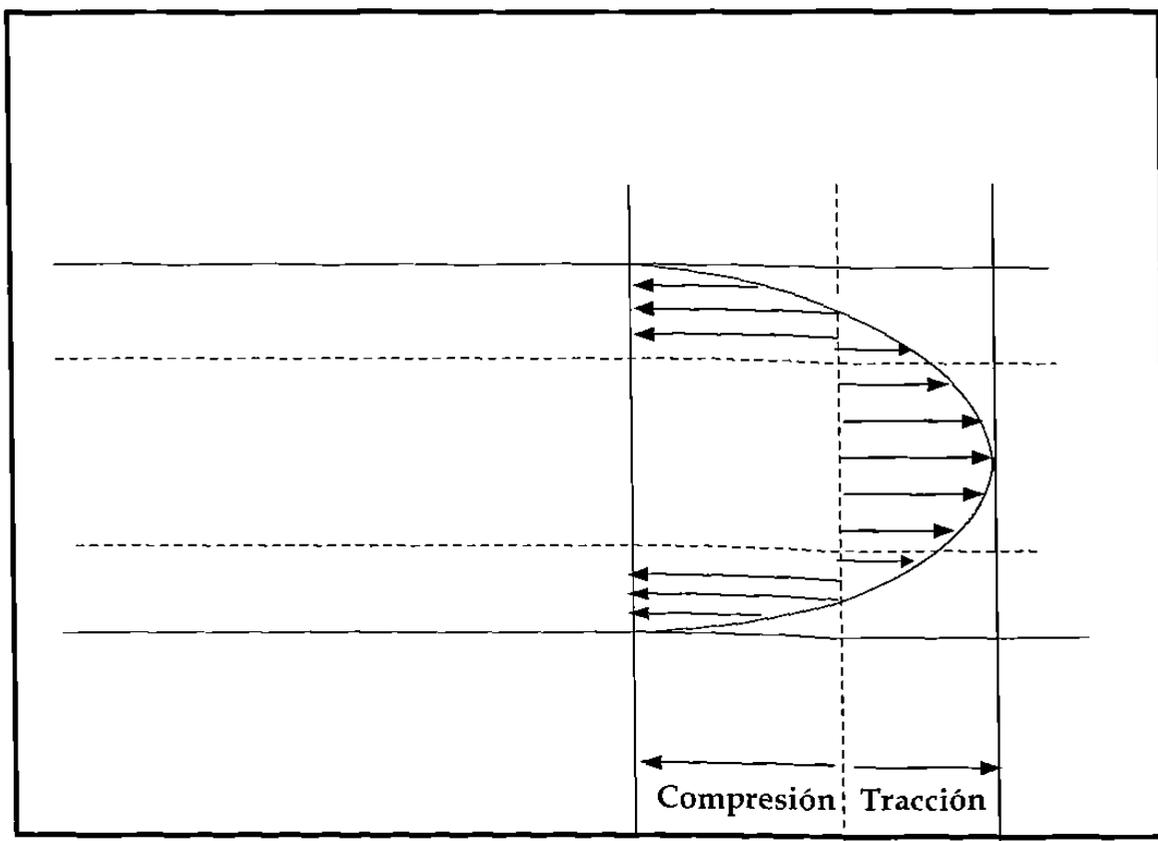


Fig.1.3 Distribución de tensiones originadas por la desaparición rápida de gradiente térmico

1.2 ANTECEDENTES

Del proceso de manufactura del vidrio la etapa que vamos a analizar térmicamente es el proceso prensa - sople. En esta etapa, el paso más vulnerable es cuando la preforma es conformada mediante el sople al producto final, llamando *preforma o parison* [2] a la forma que adopta la gota de vidrio al entrar el pistón. Sabemos que la viscosidad en este momento es importante porque depende de la temperatura y en esta etapa ocurre una disminución de la temperatura en la superficie del vidrio y en el interior se mantiene una temperatura máxima, al transcurrir el tiempo (segundos) ocurre una transferencia de calor del interior a la superficie lo que le llaman *recalentamiento* de la superficie en el vidrio, además se le aplica aire a presión para producir una pared de espesor uniforme.

Necesitamos una distribución de temperatura apropiada en la preforma, por lo tanto conocer la transferencia de calor en el vidrio es fundamental para el mejoramiento y optimización del proceso de fabricación.

Se realizó una búsqueda bibliográfica, los primeros estudios [1] se realizaron en 1958 y en 40 años existe poca literatura respecto al estudio de transferencia de calor por radiación en vidrio en el proceso de formado[4-18]. La existente tiene conclusiones contradictorias: algunos autores indican que la contribución de la radiación en sus experimentos fue importante y otros concluyen que no.

Nuestro estudio está basado en el trabajo de autores que consideraron e incluyeron los diversos factores de la radiación además del fenómeno conductivo.

1.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentó de manera general la composición y estructura del vidrio, se mencionaron algunas propiedades, y los puntos importantes en la curva característica del vidrio, viscosidad vs. Temperatura. Se mencionó la etapa en donde se analizará el efecto de transferencia de calor que es el proceso prensa - sople. En el siguiente capítulo se verá de una manera más detallada el proceso general de fabricación del vidrio y el proceso de formado por prensa - sople.

CAPÍTULO 2

MANUFACTURA DE ENVASE

2.1 PROCESO GENERAL

El vidrio es un material constituido principalmente por arena sílica y óxidos alcalinos, las materias primas básicas son carbonato de sodio, carbonato de calcio y arena sílica. Los porcentajes varían dependiendo de los artículos a fabricar.

El proceso de manufactura [2] consiste en mezclar las materias primas, en éste caso para vidrio sódico cálcico cristalino, con aplicación en artículos de mesa y envases, aproximadamente en las siguientes proporciones: 75% SiO_2 , 15% Na_2CO_3 , 10% CaCO_3 . Son fundidos en un horno a una temperatura de 1500°C , el combustible utilizado es gas natural. El tiempo de residencia es de 24 hrs., al formarse el vidrio es transportado por un canal en el cual la temperatura es de 1300°C . Al final tiene un orificio por donde cae el vidrio, que es cortado por unas cuchillas a tiempos periódicos, dejando caer lo que se le llama **gota**, con un peso constante, en este punto el vidrio tiene una temperatura de 1100°C .

En el horno se lleva a cabo la formación del vidrio ó vitrificación, después se pasa a la etapa de formado, que se inicia cuando cae la gota de vidrio al equipo subsecuente. Existen varios procesos de formado de los cuales los más comunes son: el prensado, prensa - soplo, soplo - soplo, dependiendo del artículo que se requiera. En ésta tesis se decidió analizar el proceso prensa - soplo, mediante el cual se manufacturan artículos de mesa y envases.

Actualmente es factible el control térmico en el horno, debido a que se pueden colocar sensores de temperatura ya sea termopares ó fibra óptica, tanto en los alimentadores como en el horno, y con ellos tomar medidas correctivas. Esto no ocurre en el formado, se dificulta en el proceso de prensa

- soplo porque es impráctico leer temperaturas en este punto con termopares, debido a las altas velocidades de la máquina, por lo que se utilizan sensores de no contacto ó pirómetros. Existen los que registran la temperatura en la superficie [20], y los que miden la temperatura a cierta profundidad llamados de sub-superficie [21]. Siendo éstos últimos lo más nuevo en tecnología de sensores de no contacto.

2.2 PROCESO PRENSA - SOPLO

La figura 2.1, ejemplifica las etapas del proceso prensa - soplo [22]. Este proceso está dividido en dos partes, antes de llegar a la etapa de inversión el vidrio está en el lado del bombillo, después continúa el proceso en el lado del molde.

Iniciamos con la caída de la gota (a), en este momento el vidrio tiene una temperatura aproximada de 1100°C. De inmediato en tiempo aproximado 0.5 seg se cierra el obturador del bombillo (b).

El siguiente paso es la entrada del pistón (c), realizando la **preforma**. En esta etapa la transferencia de calor la consideramos solo conductiva, debido a que el vidrio está en contacto con el metal y a la naturaleza del fenómeno de transferencia de calor, el cual estará constituido mayormente por conducción, que por radiación.

La siguiente etapa es la salida del pistón (d), en este momento inicia el recalentamiento del vidrio, basados en las leyes de Fourier, y Stefan-Boltzmann [23] que se mencionan en el capítulo 3 de ésta tesis. Es difícil

tomar las lecturas en el vidrio debido a que se encuentra el bombillo cerrado y el metal obstruye la visibilidad del vidrio.

Continúa con el inicio de la Inversión (e), en esta etapa la transferencia de calor en el vidrio tiene contribución tanto conductiva como radiativa. La temperatura promedio es de 850°C, debido a la transferencia de calor que existe, entre el vidrio y el bombillo, el último tiene una temperatura aproximada de 550°C. Estos datos han sido tomados experimentalmente [22].

Concluye la etapa de Inversión (f), es muy rápido este movimiento tiene un tiempo promedio de 1.5 seg. Debido a esto debemos de contar con equipos de medición confiables y de respuesta rápida, en nuestro caso menor a 1 seg.

Se llega a la etapa (g) de Recalentamiento, se le llama así debido a que en este paso se puede visualizar la variación de la intensidad del color rojo en el vidrio, indicando un aumento de temperatura que se inició en la etapa (e). Sin embargo, debido al material del bombillo y a las altas velocidades no es posible observar éste aumento de temperatura.

La siguiente etapa es el soplo final (h), donde se pueden tener problemas para obtener un espesor uniforme en la pieza debido a que se somete a un cambio brusco de espesores y es importante la viscosidad que tiene el vidrio para que con un soplado adecuado obtener el espesor requerido.

Finalmente la etapa (i) es la entrega del envase. Tiene una temperatura promedio de 100°C.

- *Las principales variables que influyen en el sistema térmico del lado bombillo [22] son las siguientes:*

- * Material del bombillo
- * Material del pistón
- * Tipo de vidrio
- * Temperatura de la gota
- * Geometría del sistema pistón - vidrio - bombillo
- * Temperatura del equipo
- * Velocidad de aire de enfriamiento
- * Temperatura del aire de enfriamiento
- * Velocidad de producción
- * Tiempo de caída de gota

• *Las principales variables que afectan al molde [22] son las siguientes :*

- * Material del molde
- * Geometría del molde
- * Velocidad de aire de enfriamiento
- * Temperatura del aire de enfriamiento
- * Velocidad de producción
- * Tiempo de apertura de molde
- * Tiempo de estiramiento de la preforma
- * Perfil térmico de la preforma

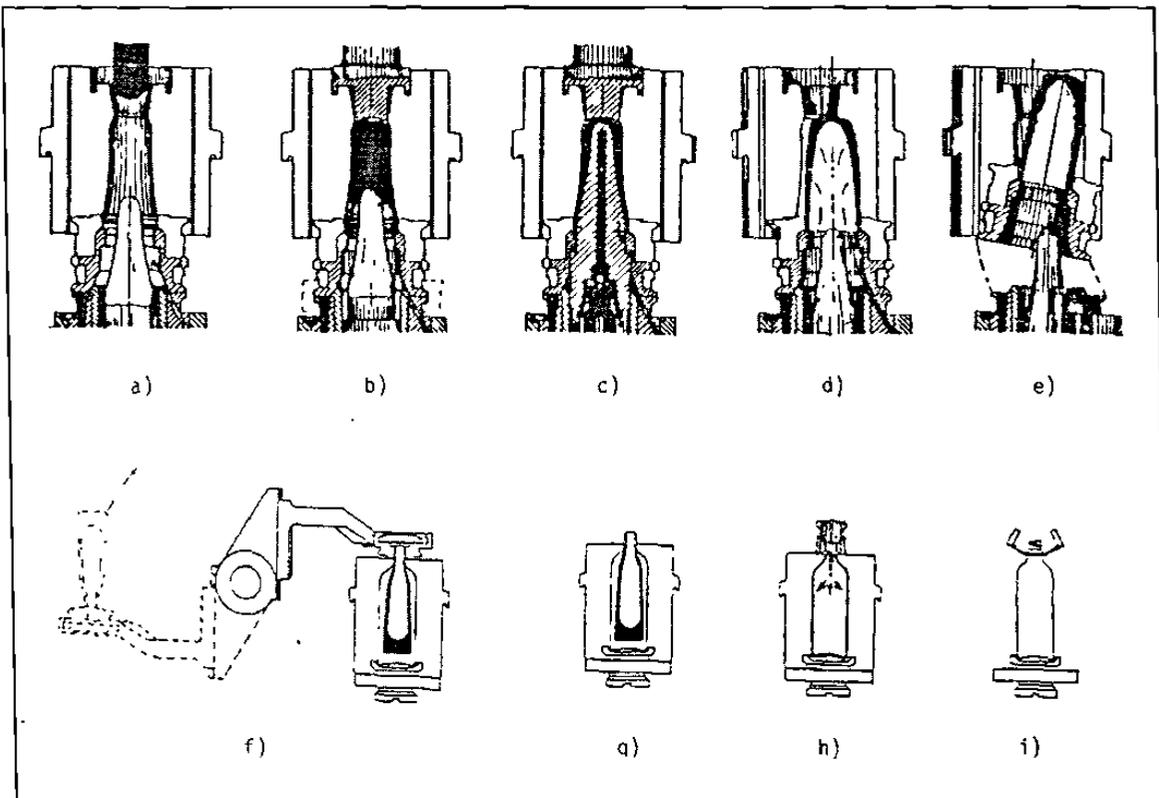


Fig.2.1 Proceso prensa-soplo

2.3 RESUMEN DEL CAPITULO

En éste capítulo se explicaron el proceso de fabricación del vidrio de manera general y el proceso de formado prensa - soplo. En el siguiente capítulo entraremos a la transferencia de calor por conducción y por radiación.

CAPÍTULO 3

TRANSFERENCIA DE CALOR

3.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

La transferencia de calor [23] es aquella ciencia que busca predecir la transferencia de energía que puede ocurrir entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. Existen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección, y radiación.

Cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura. Se dice que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura:

$$\frac{q}{A} \approx \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

Insertando la constante de proporcionalidad:

$$q = -k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.2)$$

q rapidez de transferencia de calor

$\frac{\partial T}{\partial x}$ es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor

k conductividad térmica del material

A la ec.3.2 se le llama ley de conducción de calor de Fourier. El balance de energía de conducción de calor en coordenadas cartesianas y tiempo (x, t) se muestra en la fig.3.1 y en la ecuación (3.3)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_r}{\partial x} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

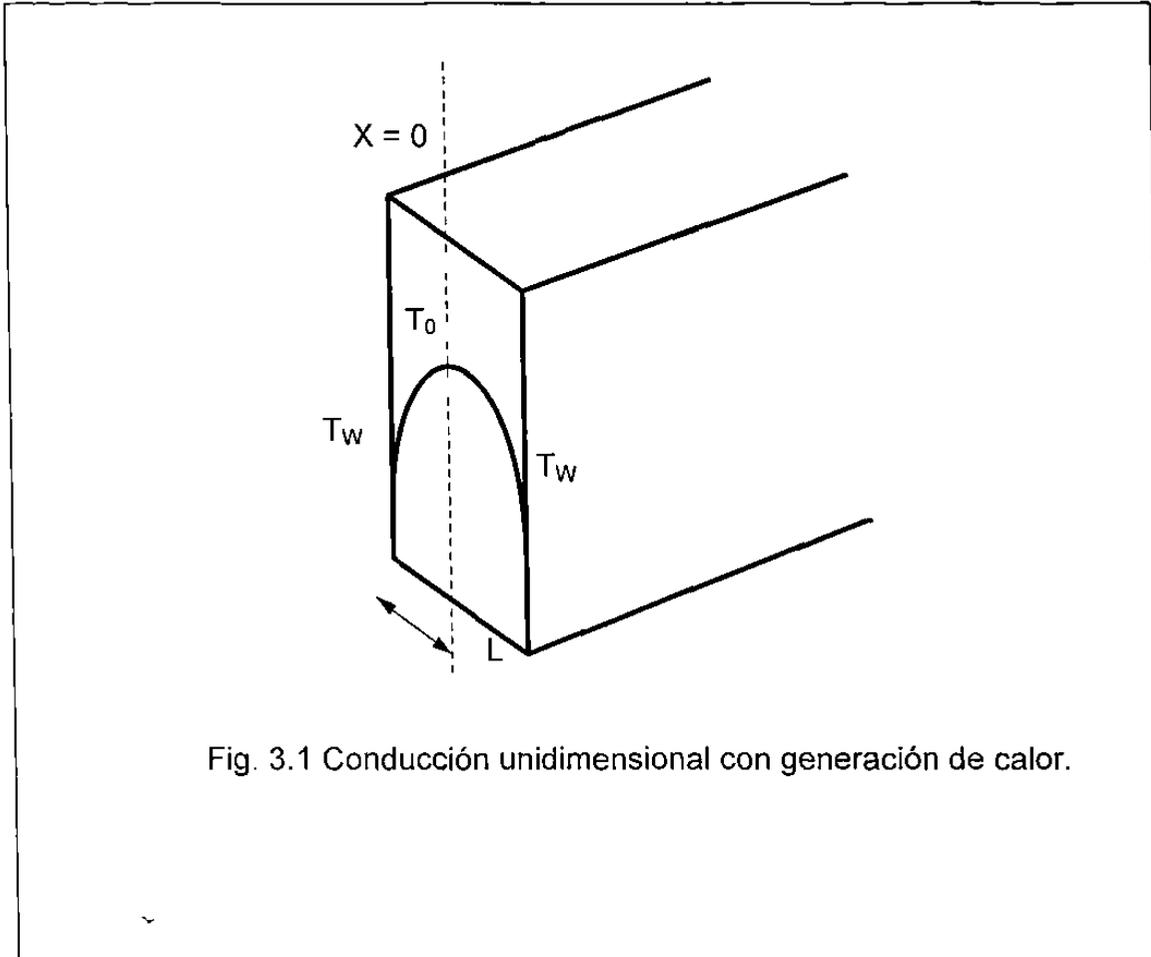


Fig. 3.1 Conducción unidimensional con generación de calor.

$$\frac{dT}{dx} + \frac{q}{k} = 0 \quad T = T_w \text{ en } x = \pm L \quad (3.4)$$

$$T = -\frac{q}{2k}x^2 + c_1x + c_2 \quad T_0 = c_2 \quad (3.5)$$

la distribución de la temperatura es:

$$T - T_0 = -\frac{q}{2k}x^2 ; \quad \frac{T - T_0}{T_w - T_0} = \left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (3.6)$$

3.2 MÉTODO NUMÉRICO DE ANÁLISIS

Existe un gran número de soluciones analíticas para los problemas de transferencia de calor. Sin embargo, en numerosas situaciones prácticas, la geometría o condiciones de frontera son tales que no se ha podido obtener una solución analítica, o si se ha desarrollado una solución es tan compleja que la evaluación se vuelve muy difícil.

La técnica que se utiliza en el programa de conducción es la de diferencias finitas [23], siendo una de las técnicas mas fructíferas. Consideremos un cuerpo bidimensional que se ha de dividir en incrementos iguales tanto en dirección x como en y , como se muestra en la fig.3.2. Los puntos nodales están designados como se muestran; las posiciones m indican el incremento x y las n indican el incremento y . Deseamos establecer las temperaturas en cualquiera de estos puntos nodales dentro del cuerpo,

utilizando la ec.(3.7) $\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ como una condición dominante.

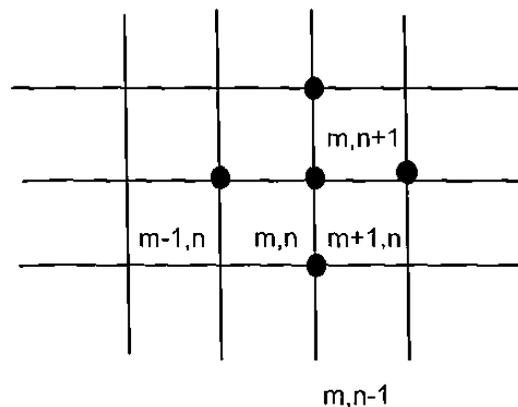


Fig.3.2 Esquema que ilustra la nomenclatura utilizada en el análisis numérico de conducción de calor.

Se usan diferencia finitas para aproximar incrementos diferenciales en las coordenadas de temperatura y espacio; y entre más pequeños escojamos estos incrementos finitos, más exacta será la aproximación de la verdadera distribución de temperatura.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{m+1/2,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.8)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{m-1/2,n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (3.9)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right]_{m,n+1/2} \approx \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (3.10)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right]_{m,n-1/2} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y} \quad (3.11)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right]_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{m+1/2,n} + \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{m-1/2,n}}{\Delta x} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (3.12)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right]_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right]_{m,n+1/2} + \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right]_{m,n-1/2}}{\Delta y} \approx \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \quad (3.13)$$

La aproximación de diferencias finitas para la ec.3.1 se convierte en:

$$\frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} = 0; \quad \Delta y = \Delta x \quad (3.14)$$

$$(T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} = 0) \quad (3.15)$$

Estamos considerando conductividad térmica constante. Si consideramos la generación de calor añadimos el término q/k .

$$\frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} + \frac{q}{k} = 0 \quad (3.16)$$

$$T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + \frac{q(\Delta x)^2}{k} - 4T_{m,n} = 0 \quad (3.17)$$

Cuando se considera convección, las temperaturas se calculan de manera diferente. El balance de energía en el nodo es:

$$-k\Delta y \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} - k \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{m,n} - T_{m,n+1}}{\Delta y} - k \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y} = h\Delta y (T_{m,n} - T_{\infty}); \Delta x = \Delta y \quad (3.18)$$

$$T_{m,n} \left(\frac{h\Delta x}{k} + 2 \right) - \frac{h\Delta x}{k} T_{\infty} - \frac{1}{2} (2T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) = 0 \quad (3.19)$$

3.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

El calor también se puede transferir a regiones donde existe el vacío perfecto, en este caso el mecanismo es la radiación electromagnética [24].

La radiación electromagnética que es propagada como resultado de una diferencia de temperaturas se le llama radiación térmica.

El fenómeno se explica de tal manera que la radiación emitida por los cuerpos es debida a su temperatura; los átomos, moléculas, o electrones son llevados a estados de excitación, regresando espontáneamente a estados de baja energía y de esta manera emitiendo energía en forma de radiación electromagnética. Esto es debido a que la emisión resultante de los cambios en los estados electrónico, rotacional y vibracional de los átomos y moléculas, y a que la radiación emitida es usualmente distribuida en un rango de longitudes de onda.

La radiación térmica fluctúa entre 0.1 a 100 μm . El espectro de radiación electromagnética es dividido en bandas de longitud de onda, representado en la fig.3.3.

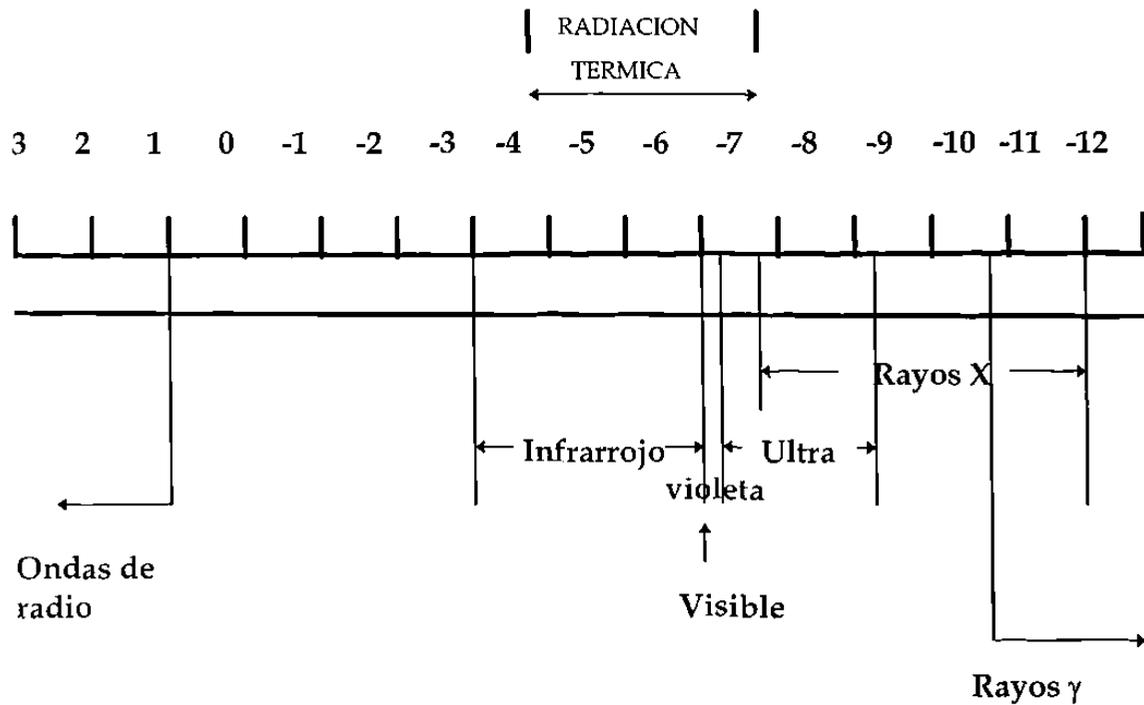


Fig.3.3 Espectro electromagnético en micrómetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$).

Independientemente de las longitudes de onda o direcciones de la radiación incidente en el cuerpo negro, toda la radiación será absorbida. Un cuerpo negro es un concepto ideal, debido a que un material real reflejará algo de la radiación o permitirá que pase algo de la radiación a través de él. En la naturaleza no existen cuerpos negros, como ejemplo podemos mencionar un espesor grueso de negro de carbón, que puede absorber un 99% de la radiación térmica incidente. Esta ausencia de radiación reflejada es la razón para llamarlo cuerpo negro.

Cuando la densidad de energía se integra sobre todas las longitudes de onda, la energía total emitida en un cuerpo negro es proporcional a la

temperatura absoluta a la cuarta potencia, y podemos calcular la energía con la ley de Stefan-Boltzmann [30]:

LEY DE STEFAN - BOLTZMANN

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3.20)$$

E_b Energía radiada por tiempo y área unitarios (watts/m² °k)

σ Constante de Stefan-Boltzmann (5.669 x 10⁻⁸ w/m² k⁴)

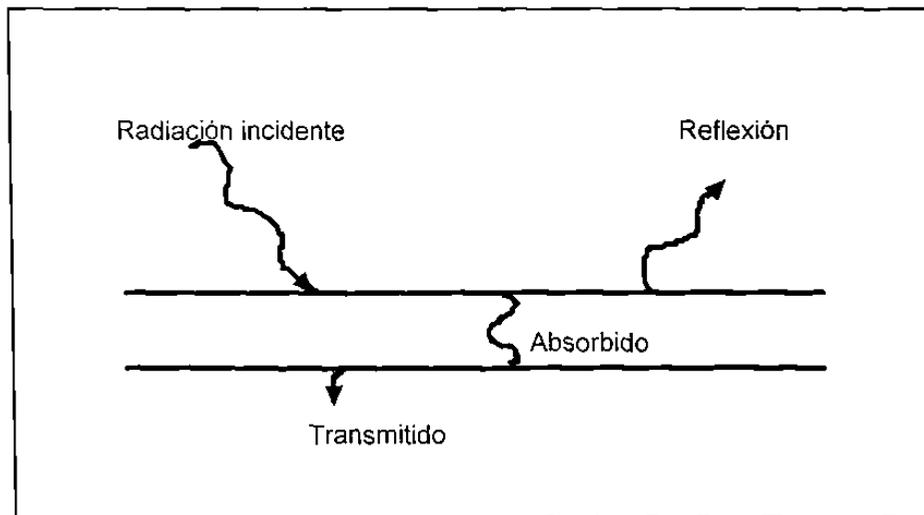


Fig.3.4 Radiación de un cuerpo opaco

Existen materiales semitransparentes y diatérmicos [25] que definiremos a continuación.

Un material semitransparente transmite parcialmente la radiación en una o más bandas del espectro. Los materiales diatérmicos, son transparentes a la radiación en al menos una región del espectro electromagnético. Y un material opaco no transmite radiación.

Nuestro material de estudio es vidrio, el cual es semitransparente y diatérmico, no se comporta como un material negro y considerarlo así nos registraría un porcentaje de error en nuestros cálculos, debido a que no tomaríamos en cuenta las emisiones y reabsorciones de energía dentro del material. Lo que podemos inferir es que esta contribución interna es importante a temperaturas elevadas debido a que en la ecuación de Stefan-Boltzman, la temperatura está exponencialmente a la cuarta potencia. Además es prácticamente opaco a la radiación de alguna longitud de onda. Todos los vidrios silicatos son opacos a la radiación de longitud de onda mayor de 4.5μ .

Para el presente proyecto se analizó la literatura y se seleccionó el trabajo de Robert Gardon [1] porque consideramos que realiza un análisis más completo de radiación y de acuerdo a nuestro objetivo de tesis es el que mejor concuerda, no sin descartar que es una referencia clásica para este tema, en el que se han basado los que han investigado este fenómeno. En él se hicieron las siguientes consideraciones :

a) Efectos de la radiación interna.

Estos efectos se refieren solamente a longitudes de onda en que el vidrio es transparente. Inicia con la emisión interna de radiación, siendo la emisión un efecto de volumen, todo elemento de material, sin importar su posición en la placa, emite radiación con un valor que depende de su temperatura. Parte de esta radiación emitida internamente alcanza la superficie de la placa y sale al exterior, constituyendo parte del intercambio de energía entre la placa y el

ambiente. El resto de la radiación emitida internamente es reabsorbida dentro de la placa, parte directamente y parte después de una o más reflexiones internas.

b) Determinación del perfil de temperatura

El valor del cambio instantáneo de temperatura en un nivel dado dentro de la placa está determinado por el valor neto de ganancia o pérdida de energía por unidad de volumen en cada nivel

c) Considera estado transiente

d) Transferencia de calor unidimensional

e) Conducción de calor

f) Dispersión constante

Modelo Robert Gardon

$$\frac{\partial T(X)}{\partial t} = \frac{1}{C_p} [Q_c(X) + Q_A(X) - Q_E(X) + Q_R(X)] \quad (3.21)$$

- Q_C Valor de absorción de energía en el plano por conductividad de calor dentro de la placa
- Q_A Valor de absorción en el plano de radiación del exterior de la placa
- Q_E Valor de emisión de radiación del plano mismo
- Q_R Valor de reabsorción en el plano de radiación emitida en otras partes de la placa

◆ **Absorción de Radiación Externa**

$$Q_A(r) = 2n^2 \sum \gamma_j W_{Hj} \varphi \quad \text{ec.(3.22)}$$

γ Coeficiente de absorción en un intervalo de longitud de onda
 W_{Hj} Flujo de radiación en el j-ésimo intervalo de longitud de onda

◆ **Emisión Interna**

$$Q_E(r) = 4n^2 \sum \gamma_j W_{Bj}(T) \quad \text{ec.(3.23)}$$

$$W_{Bj}(T) = 1.355 \times 10^{12} P_j(T) T^4 \quad \text{ec.(3.24)}$$

P_j Fracción de radiación de un cuerpo negro a la temperatura T, se obtiene de tablas de la ecuación de Planck.

◆ **Reabsorción de Radiación Emitida Internamente**

$$Q_{Ir}(r) = 2n^2 \sum (\gamma_j \sum W_{Bj}(s) \Psi) \quad \text{ec.(3.25)}$$

Ψ Función auxiliar

◆ **Reflexiones Internas Múltiples**

a) Radiación polarizada

$$G_{\lambda\alpha\perp}^{**} = G_{\lambda\alpha0\perp}^* (\rho_{\perp} / 1 + \rho_{\perp}' e^{-\gamma\lambda L \text{SEC } \alpha}) [e^{-\gamma\lambda X \text{SEC } \alpha} + e^{-\gamma\lambda (L - X) \text{SEC } \alpha}] \quad \text{ec.(3.26)}$$

b) Radiación no polarizada

$$G_{\lambda\alpha}^{**} = G_{\lambda\alpha0}^* P' [e^{-\gamma\lambda X \text{SEC } \alpha} + e^{-\gamma\lambda (L - X) \text{SEC } \alpha}] \quad \text{ec.(3.27)}$$

Las propiedades físicas que se deben de considerar son :

a) Coeficiente de absorción (γ) . El rango de temperaturas de interés es desde la ambiente a la temperatura de fusión del vidrio; las longitudes de onda comprenden valores de 1 a 15 μ . Los valores utilizados fueron los de la fig.3.3, esto lleva a tomar las siguientes simplificaciones :

1) En todo instante, los coeficientes son determinados por la temperatura media instantánea de la placa, y las variaciones locales en γ (coeficiente de absorción) debidas a gradientes de temperatura son despreciadas.

2) Como la temperatura media de la placa varía, se deben hacer los cambios necesarios en los valores de (γ) usados.

Tabla No.1 Coeficientes de absorción R.Gardon

Longitud de Onda (μm)	Coeficiente de Absorción (cm^{-1})
1 - 2.75	0.5
2.75 - 4	5
4 - ∞	∞ (vidrio opaco)

Para el vidrio cristalino se han determinado sus coeficientes de absorción como se muestra en la tabla 1. Se utiliza una relación entre coeficiente de absorción- longitud de onda-temperatura, se presenta una gráfica de esta relación en la fig.3.5. Una de las razones para elegir esta relación como una función escalón es que los valores del coeficiente de absorción (γ) determinan las funciones auxiliares ϕ y ψ .

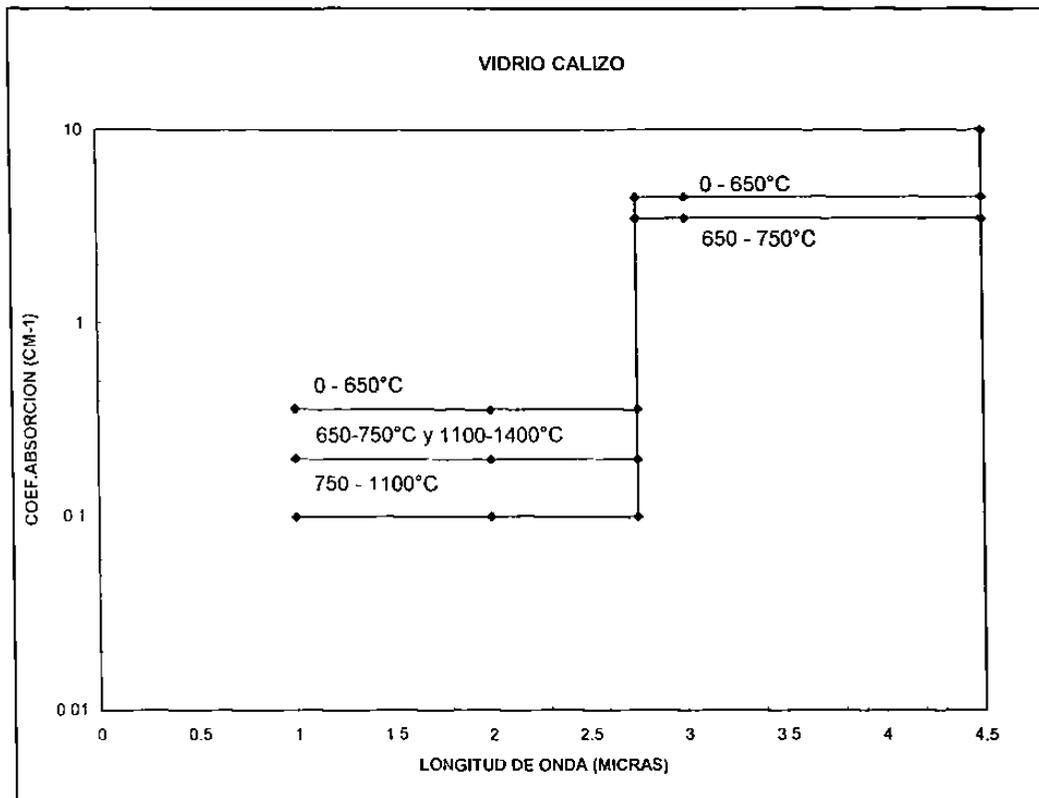


Fig.3.5 Longitud de onda vs. coeficiente de absorción para vidrio calizo

b) Índice de refracción (n). Las variaciones grandes del índice de refracción en el infrarrojo lejano, coinciden con regiones de longitud de onda de fuerte absorción, así que los valores de "n" no entran en estos cálculos, siendo $n=1.5$ un valor adecuado para la mayoría de los vidrios.

3. Propiedades térmicas. Son el calor específico volumétrico C_p y la conductividad térmica k .

El material de la placa se supone homogéneo e isotrópico y la reflexión en las superficies de la placa satisface las ecuaciones de Fresnel [25] para materiales dieléctricos. Además, la atenuación de un haz monocromático de

radiación sigue la ley de Bouguer-Lambert [32]: $I = I_0 e^{-\gamma x}$ ec.(3.28) donde γ es el coeficiente de absorción y x la longitud de la trayectoria de la radiación.

El fenómeno que ocurre en el interior del vidrio son las reflexiones internas múltiples, la fig.3.6 muestra dos haces monocromáticos de radiación polarizada perpendicularmente de intensidades $G_{\lambda\alpha 0L}$ y $g_{\lambda\alpha 0L}$ que llega por dentro a las superficies de la placa en un ángulo α de incidencia. En las superficies los haces son parcialmente refractados y parcialmente reflejados.

Los componentes reflejados son atenuados al atravesar la placa, y vuelven a reflejarse en la superficie opuesta de la placa. Esto sucede de manera infinita.

La lamina tiene un espesor L , un plano dentro de la lámina y a una distancia X de una superficie es atravesada por las múltiples reflexiones de los haces en ambas direcciones.

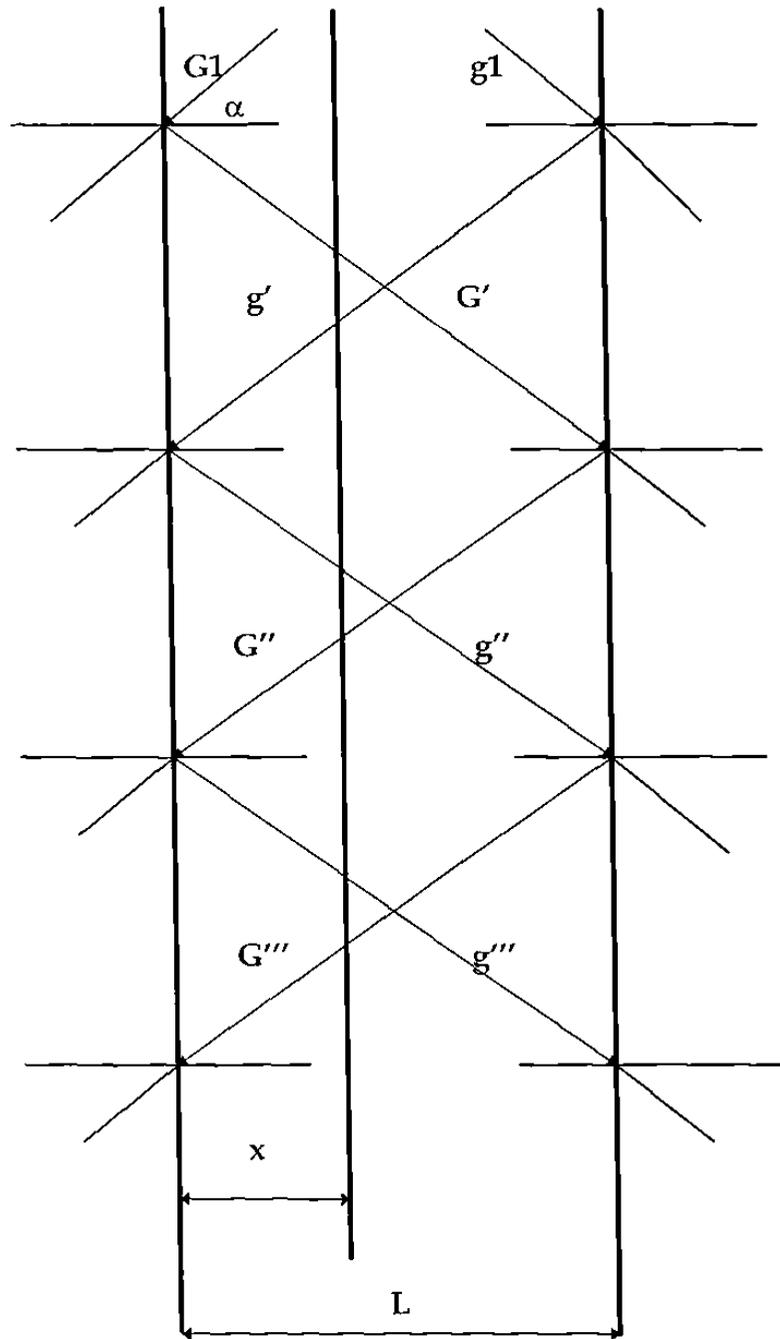


Fig.3.6 Reflexiones internas múltiples de radiación entre las superficies de una placa de vidrio. Ley de Bouguer Lambert $I = I_0 e^{-\gamma L}$

3.3 RESUMEN DEL CAPITULO

En el presente se trabajaron los balances de energía de transferencia de calor por conducción y por el mecanismo de radiación que es referido a la literatura. En el siguiente capítulo se presenta la parte experimental de la tesis, que consta de la medición de lecturas en planta y de la simulación de transferencia de calor por conducción en el enfriamiento de una placa de vidrio calizo.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS EXPERIMENTALES

4.1 EXPERIMENTAL

Las mediciones experimentales se realizaron en una planta, específicamente en Vidriera Monterrey del Grupo VITRO.

El planteamiento inicial era utilizar una máquina prototipo, de alta velocidad, diseñada con el objetivo único de estas pruebas, que era determinar las temperaturas en distintos puntos con varios sensores de no contacto; teniendo oportunidad de variar velocidades y registrar varias corridas.

En las pruebas fue difícil tomar las lecturas, debido a que las realizamos en una máquina de línea, y estuvimos limitados en velocidades y tiempo. La máquina estaba produciendo envase para vino, tenía una velocidad de 26.6 cpm.

Los equipos de medición utilizados fueron dos pirómetros, uno de superficie marca IRCON que adicionalmente traía el registrador de temperaturas, y el de sub-superficie, marca MINOLTA CYCLOPS 152 que tiene integrado el registrador. Este pirómetro obtiene la temperatura hasta una profundidad de 10 cm. Se muestra en la fig. 4.1 los coeficientes de absorción contra longitud de onda para vidrio cristalino, según literatura de MINOLTA.

El tiempo para tomar las lecturas es corto debido a que el proceso prensa - soplo (Cap.2) tiene un tiempo de 8 seg para este artículo, y la etapa (g) que corresponde al recalentamiento nos daba 1 seg. para registrar la lectura. Las lecturas se tomaron primero con el pirómetro de superficie, el cual se soportó en un tripié para mantener fijo el punto de medición, el orificio de medición tiene un diámetro de 1 mm, esto lo hace

mas preciso; sin embargo ajustarlo a cada punto del envase fue laborioso debido al ángulo de visión, y a la velocidad de la máquina.

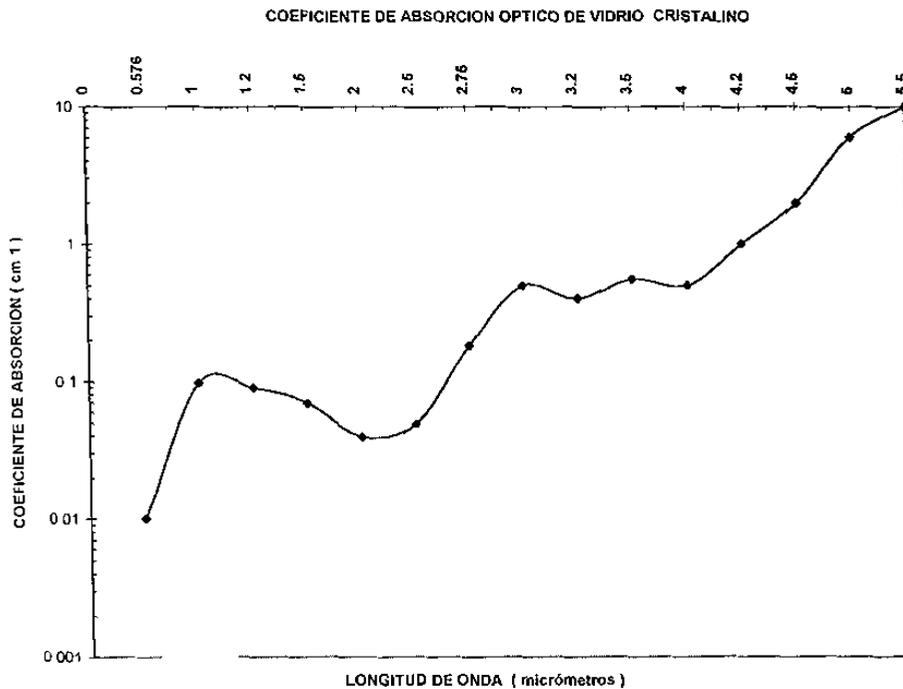


Fig.4.1 Coeficiente de absorción para vidrio cristalino

Se registraron 10 lecturas de cada punto; y se cambió de pirómetro, continuando con el de sub-superficie. Las lecturas se registraron en:

- a) corona
- b) mitad
- c) fondo

Se utilizaron estos equipos aún cuando el tiempo de respuesta es de 1 seg., lento para nuestras necesidades. Debido a esto la prueba se prolongó por repetición de lecturas. El pirómetro de sub-superficie que se solicitó tiene una respuesta de 0.25 seg.

Se registraron las lecturas de cada punto, donde obtuvimos más consistencia de lecturas fue en la mitad del envase y en la corona. En el fondo se observaron inicialmente fluctuaciones, que se estabilizaron después. En el Apéndice A aparecen las gráficas (A.1,A.2,A.3) donde se observa la diferencia de las temperaturas en la superficie y a cierta profundidad en el vidrio, las lecturas de temperaturas se hicieron en los mismo puntos en cada envase.

4.2 SIMULACIÓN EN COMPUTADORA

Se utilizó un programa que considera la transferencia de energía unidimensional de calor por conducción, se simuló el enfriamiento libre de una placa de vidrio sódico cálcico cristalino, con las siguientes condiciones mostradas en la tabla 2:

Tabla No.2 Condiciones iniciales de conducción.

Temperatura inicial (°C)	707
Temperatura final (°C)	27
Coef. transferencia calor (Btu/ft ² h °F)	2.20
Espeşor (cm)	0.30
Conductividad térmica (W/m °K)	1.163

Se obtienen los datos de las temperaturas en el centro y en la superficie del vidrio a diferentes tiempos, con esos valores obtenemos la temperatura promedio y utilizamos la ecuación de Vogel Fulcher Tamman $\text{Log } \eta = A + B / T - T_0$, para calcular la viscosidad, donde el valor de las constantes es :

$$A = ((L1- L2) (L3T3- L2T2) - (L2-L3) (L2T2 - L1T1)) / ((L1-L2) (T3- T2) - (L2- L3) (T2-T1)) \quad (4.1)$$

$$T_0 = (L1T1-L2T2 -A (T1 -T2)) / (L1 -L2) \quad (4.2)$$

$$B = (T_i -T_0) (L_i - A) \quad (4.3)$$

4.3 RESUMEN DEL CAPITULO

En este capítulo se presentaron los métodos experimentales, que constan de las lecturas en planta de temperaturas de superficie y de sub-superficie del vidrio, y la simulación por el mecanismo de conducción del enfriamiento de una placa de vidrio calizo. Continuaremos con los resultados de los datos obtenidos en parte experimental.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

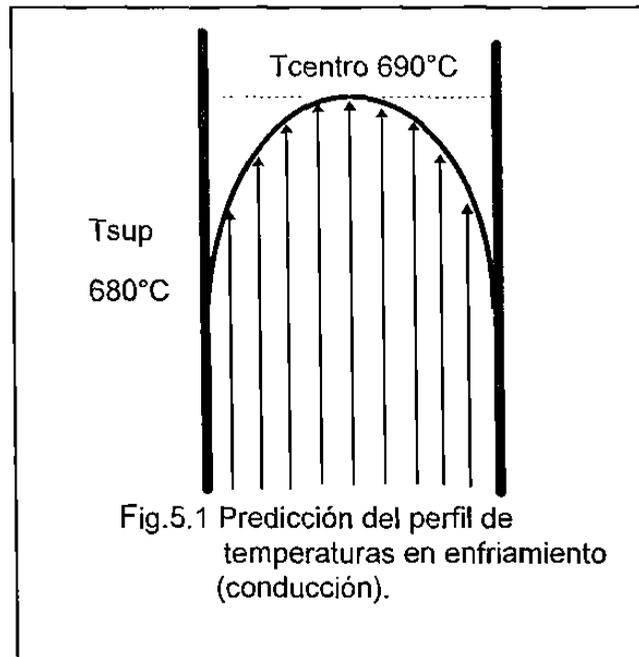
5.1 RESULTADOS

Utilizando la ecuación de Vogel Fulcher Tamman en los datos del modelo conductivo obtenemos los siguientes resultados :

Tabla No.3 Modelo Conductivo

Tiempo (seg)	Temp.°C centro	Temp.°C superficie	Temp.°C promedio	Log viscosidad
6	690.8	680.3	685.5	8.84
10	678.0	667.6	672.8	9.22
20	646.9	637.0	641.9	10.15
30	617.3	607.9	612.6	11.09
60	536.8	528.7	532.7	13.91

Con los datos anteriores se puede predecir un perfil de temperaturas, tenemos la temperatura en el centro y la temperatura en la superficie del vidrio.



Los datos calculados son graficados y comparados contra la curva del modelo teórico donde se considera transferencia de calor por conducción más radiación, de Robert Gardon.

Utilizando la Fig.5.2 Gardon, que representa un enfriamiento libre de una placa de vidrio a las mismas condiciones que el de transferencia de calor por conducción.

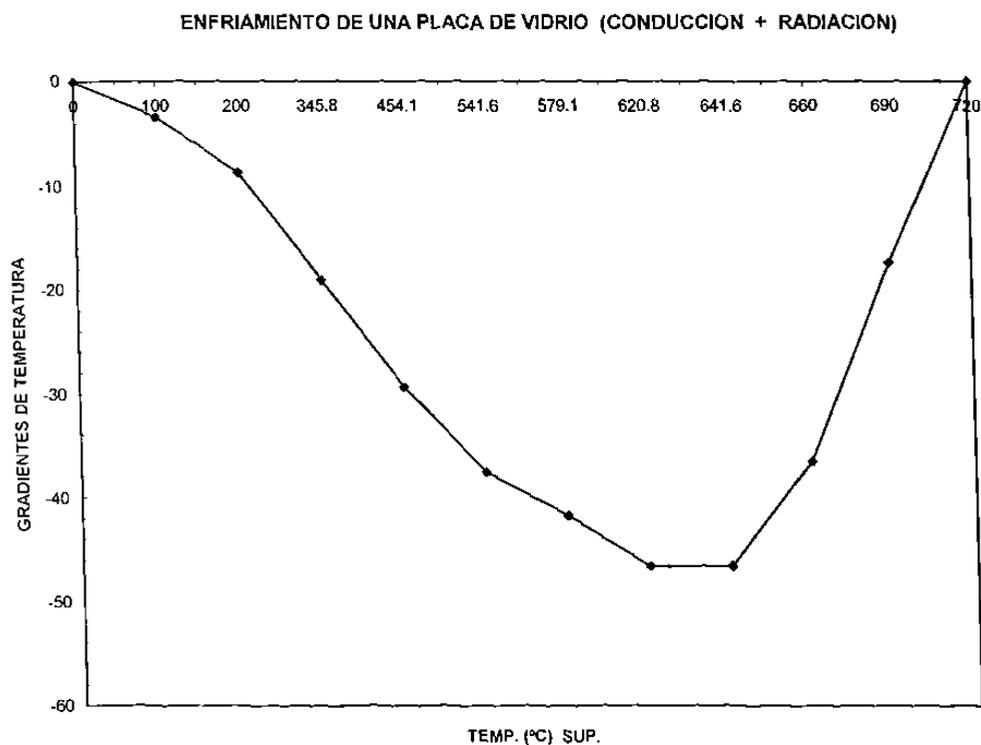
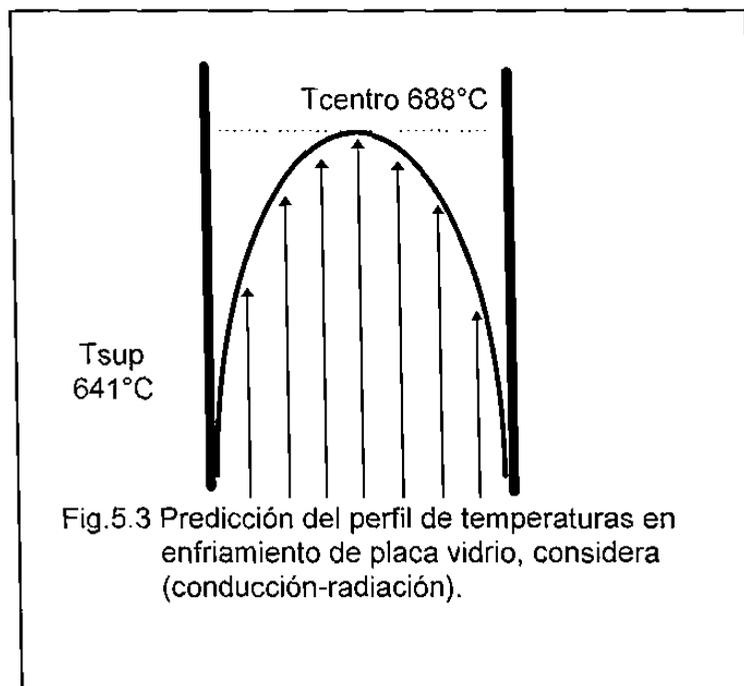


Fig.5.2 Gráfica de enfriamiento de una placa de vidrio, considerando conducción-radiación. R.Gardon

Tabla No.4 Modelo Conducción-Radiación

Tiempo (seg)	Temp.°C superficie	Temp.°C centro	Gradiente temp.	Temp.°C promedio	Log viscosidad
6	641.6	688.1	46.5	664.8	9.45
10	620.8	667.3	46.5	644.0	10.09
20	579.1	620.8	41.7	599.9	11.51
30	541.6	579.1	37.5	560.3	12.89
60	454.1	483.4	29.3	468.7	16.49

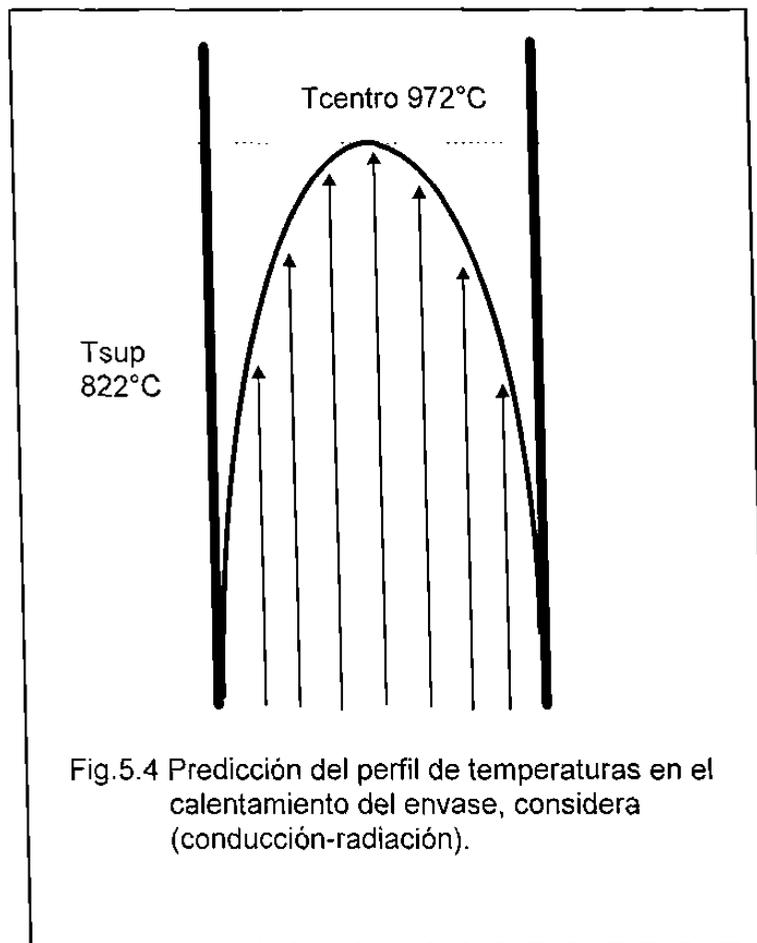


De las mediciones que se realizaron en planta en envase de vino, se presentan los siguientes resultados

Tabla No.5 Resultados de temperatura en la superficie y sub-superficie del envase.

Temp.sup (°C) IRCON	Temp.sub- sup.(°C) CYCLOPS	Temp.sup. (°C) IRCON	Temp.sub. sup.(°C) CYCLOPS	Temp.sup. (°C) IRCON	Temp.sub. sup.(°C) CYCLOPS
fondo	fondo	mitad	mitad	corona	corona
868	1027	822	972	978	964
797	1056	821	972	977	963
802	1041	820	970	976	960
800	1013	819	971	976	960
819	1022	818	971	975	958
818	1023	818	974	975	959
822	1018	818	976	974	961
825	1021	817	976	974	958
824	1021	817	977	973	964

La distribución de temperaturas sería parecida al de conducción-radiación, en éste caso el gradiente de temperatura en la mitad del envase, que es donde se podría considerar como una placa plana es de 156°C en promedio.



5.2 RESUMEN DEL CAPITULO

En el actual capítulo se presentaron los resultados obtenidos, tanto del tratamiento de simulación por conducción como el de conducción-radiación referenciado en literatura y de los datos tomados en planta. En el siguiente continuaremos con la discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

DISCUSIÓN

Mencionando nuestra hipótesis, que es el considerar que la transferencia de calor por radiación tiene una influencia en el proceso de formado del vidrio, y que es necesario determinar, porque puede sobrepasar los parámetros de manufactura.

Para llevar a cabo el proceso de fabricación debemos de tener control de las variables, siendo la **temperatura** el factor crítico para evitar los siguientes efectos :

- a) deformación excedida en la preforma cuando ocurre la transferencia de calor.
- b) soplado final inadecuado en el molde.

La función principal de la distribución de temperaturas es la de que el vidrio tenga soporte estructural, llamando de ésta manera al estado óptimo para la etapa de inversión (e) Fig.2.1. Que no haya escurrimientos de vidrio, ni que se llegue a pegar en el pistón.

Si comparamos los experimentos de McGraw [11], quien comenta que en sus resultados la radiación no fue importante, encontramos que no utilizó sensores de sub-superficie, los espesores son distintos, menciona que los datos en la superficie fueron extrapolados. Sus pruebas incluyen prensado normal, enfriamiento lento, así como recalentamiento de la superficie. Otros como Farag , Believe y Curran [8], no mencionan el coeficiente de absorción que utilizaron.

Jones [14] comenta que encontró una contribución significativa, sólo para espesores gruesos. Para Karl Storck [19], en los resultados de sus pruebas no encontró contribución de radiación, en sus suposiciones no consideró la emisión y reabsorción de energía en el vidrio, utilizó la ley de Stefan-Boltzmann para cuerpos opacos y consideró otros factores en el proceso.

En la hipótesis la cual de acuerdo a nuestros resultados fue confirmada, analizamos el impacto de la radiación en las propiedades de una placa de vidrio sódico cálcico y encontramos que en base a nuestros experimentos la contribución es importante, de tal magnitud que podemos estar ubicados en puntos críticos para el vidrio tan distantes como el punto inferior ó en el superior de recocido.

Esta diferencia es importante debido a que la estructura del vidrio con estas fluctuaciones de temperaturas y por consiguiente de viscosidad, provoca el tener problemas en el proceso prensa - sople. En el momento de transferir la preforma al molde puede ocurrir que haya escurrimientos de vidrio, si su viscosidad es baja o en su defecto que se adhiera al pistón si la viscosidad es alta.

El tener una mínima diferencia en temperaturas del vidrio impacta por un factor de 10 en la viscosidad, recordando que la relación es logarítmica. Esto trae por consecuencia estar **fuera del rango de viscosidad permisible para trabajar**. Además tiene efecto en el coeficiente de expansión y por consiguiente en la relajación de tensiones.

Tomamos como base una temperatura promedio para realizar los cálculos, considerando que son los resultados mas representativos de acuerdo

a nuestros equipos de medición, que fueron pirómetros de superficie y de sub-superficie.

Analizamos los resultados de la prueba en planta observamos que tenemos una diferencia de (150°) comparado contra el de conducción y de 100°C contra el de conducción-radiación de Gardon. Las diferencias son debidas principalmente a que en la planta se estaba realizando un calentamiento del vidrio, y en los otros dos procesos era un enfriamiento, además de variar la geometría y espesor del artículo. Sin embargo aún con estas diferencias se observa que el cálculo conducción-radiación es mas cercano de los valores tomados en planta.

CONCLUSIONES

- Al interpretar la gráfica de enfriamiento, concluimos que existe una diferencia del 75.74 %, entre un cálculo de conducción y en el que se incluye conducción mas radiación, según los resultados estamos hablando de una diferencia en gradientes de temperatura de 10° contra 40° para el de conducción - radiación.
- Encontramos que la diferencia entre la curva de viscosidad de conducción vs. radiación no sólo se ve afectada por cada uno de los fenómenos, además por el tiempo, debido que a tiempos cortos de 10 seg. existe una diferencia de 37% menor que a tiempos de 60 seg.
- Analizando el impacto en sus propiedades específicamente en la curva de **viscosidad**, observamos que las lecturas son tan distintas que fluctúan entre el rango de recocido. El impacto es del orden de 1 en la escala logarítmica, estando fuera de los intervalos de manufactura.
- El efecto de la temperatura en **el coeficiente de expansión lineal** es importante, porque al variar éste, también varía la resistencia al choque térmico y a la tensión, debido a que la relación es directamente proporcional.
- Se realizó una búsqueda bibliográfica extensa y se obtuvieron los artículos publicados desde la primera publicación en 1958 hasta la más reciente de 1995. Por lo que concluimos que la información obtenida es valiosa

debido a que no se conoce publicación alguna al respecto ó en su defecto podría estar como secreto industrial, y es útil para Know How.

- Los datos obtenidos son básicos para todos aquellos que quieran patentar una máquina, ó modificar la existente. El efecto de aumentar la velocidad de la máquina se refleja en una disminución de costos.
- Los resultados experimentales de Vidriera Monterrey, se acercan aún cuando es grande la diferencia, a los resultados de enfriamiento de una placa de vidrio en los que se incluye radiación mas conducción. Concluimos que las diferencias entre las lecturas de temperaturas son debidas a que no ocurre el mismo fenómeno, una es calentamiento y otro es enfriamiento, varía la geometría, el espesor y el coeficiente de absorción. Sin embargo la tendencia es de aumentar la temperatura al incluir la radiación para ambos experimentos.
- Con los resultados obtenidos del modelo conductivo, de las lecturas de planta y las tomadas de literatura no es posible asegurar un perfil de temperaturas, pero sabemos que el perfil de conducción-radiación tiene temperaturas más altas que el de conducción. Y sabemos que es importante continuar con pruebas experimentales para determinarlo.

Recomendaciones para futuros trabajos:

a) Utilizar los resultados de ésta tesis y efectuar experimentos de enfriamiento desde 1100°C a temperatura ambiente, en forma libre y con enfriamiento rápido. Así como de calentamiento en rangos de temperatura de la ambiente a 1100°C, incluyendo enfriamiento rápido, variar velocidades de aire, variar tiempos.

b) Una de las variables importantes es el % de composición, sugerimos hacer las formulaciones actuales, con variaciones del 1% y analizar la influencia de cada óxido, realizar la prueba para vidrios transparentes y opacos, llevar la estadística de los experimentos.

c) Realizar pruebas en diferentes composiciones de vidrio, colocando sensores de contacto y de no contacto para lectura de temperatura a diferentes profundidades en el vidrio (0.2 cm a 15 cm) de esta manera se podría comparar datos y obtener la diferencia o factor entre los dos equipos de medición, beneficiando de inmediato las lecturas de línea.

d) Crear un programa de conducción - radiación, para realizar comparaciones y poder modificar acertadamente los experimentos.

e) Conocemos que el fenómeno de la radiación es función del volumen, por lo tanto un factor relevante en este estudio es considerar el espesor del vidrio. Realizar experimentos para diferentes espesores, y para diferentes tipos de vidrio, y analizar el efecto de la radiación.

f) Efectuar evaluaciones al vidrio de pruebas de resistencia y ópticas.

g) Realizar las pruebas en la máquina destinada para tal objetivo.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS

- [1] Gardon R. " Calculation of temperature distribution in glass plates undergoing heat treatment " J.A.C.S. 41 (6) pp.200-209 june 1958
- [2] Fernández Navarro J.M. "El Vidrio " Instituto de Cerámica y Vidrio. Madrid 1985.
- [3] Littleton, J.T. The softening point of glasses. J.Soc.Glass Technology.24 (1940) 176-185
- [4] Kunugi M. & Murakami " Temperature distribution and heat transfer in container glass during forming operation " Mem.Fac.Engn.Kyoto.33 (4), pp.369-375, 1971.
- [5] J.Manthuruthil, T.R.Sikri, and G.A.Simmons " Simplified mathematical model simulating heat transfer in glass forming molds " J.A.C.S. 57(8), PP.345-350 august 1974.
- [6] Bonancina C., Strada M. " Finite element analysis of the temperature fields in glass moulds" Glass Technology, 23(4), pp.172-176,1982.
- [7] Rijsmus A. " Mass and heat transfer during TV pressing proceedings of XIII International Glass Congress, Hamburg, R.F.A 1983.
- [8] Curran R.L., Farag I.H. " Modeling radiation pyrometry of glass during the container forming process" Glastech Ver.61, Nr 12, pp.341-347, 1988.
- [9] Farag I.H. "Radiation pyrometry of galss plates with non-uniform temperature distribution" Glastech.Ver.56k, Bd 1,pp.319-324,1983.

- [10] Farag I.H." Heat transfer during glass forming " Chem.Eng.Comm. 52,21-32,1987.
- [11] McGraw D.A. " Heat transfer at the glass mould interfase " Glastech.Ver.40 (5) pp.89-91,1973.
- [12] Kent R., Rawson. " An experimental and theoretical investigation of glass pressing " Glass Tech., 12,5, pp.117-127, 1971.
- [13] Howse T.K.G., Kent R. " The determination of glass mould heat fluxes from moulds temperature measurements" Glass Tech. 12 (4) pp.84-93 august 1971.
- [14] Jones S.P. " Computer modelling as an aid to the thermal design of moulds for glass containers manufacture " Proceedings of XIII International Glass Congress, Hamburg,R.F.A.,1983
- [15] Viskanta "Effect of surface emisivity on heat transfer by simultaneous conduction and radiation " Int.J.Heat mass transf. 5, 729-734, 1962.
- [16] Gardon R. " A review of radiation heat transfer in glass " J.A.C.S., 44 (7) PP.353-363, july 1961.
- [17] Gardon R., " The emisivity of transparents materials " J.A.C.S. 39 (8) PP.278-287, august 1956.
- [18] Farag I.H. " Heat transfer simulation during forming glass containers " AICHE Symp.Ser.,Vol.81 : Heat transfer, Denver, pp.77-83, 1985.

- [19] Storck Karl, Linkoping Studies in Science and Technology, Thesis No.526. Sweden.1995
- [20] Land Infrared Ltd. England.MINOLTA/LAND CYCLOPS 39. High precision non contac temperature measurement.
- [21] Land Infrared Ltd. England.MINOLTA/LAND CYCLOPS 152. High precision non contac temperature measurement.
- [22] Manual de Simuladores térmicos.(1/3) Grupo Vitro.1990
- [23] J.P.Holman " Transferencia de calor "., pp-129-179, 341-437. 1996.
- [24] E.M. Sparrow, R.D. Cess, " Radiation Heat Transfer ", Brooks/Cole Publishing Company, Belmont, California, 1996.
- [25] R.Viskanta, E.E. Anderson, " Heat transfer in semitransparent solids " Advances in heat transfer Series. Vol 11, pp.317-441. Academic Press 1975.

APÉNDICE A

TRANSFERENCIA POR CONDUCCION

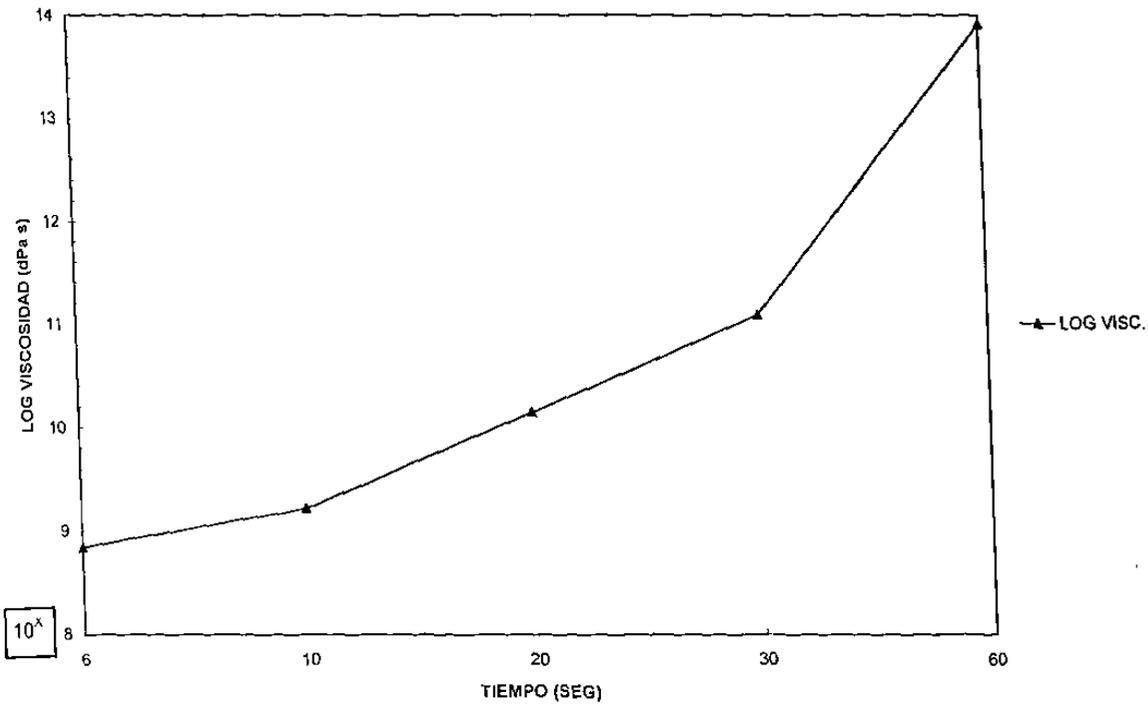


Fig.A.1 Viscosidad vs Temperatura (Conducción)

TRANSFERENCIA CONDUCCION + RADIACION

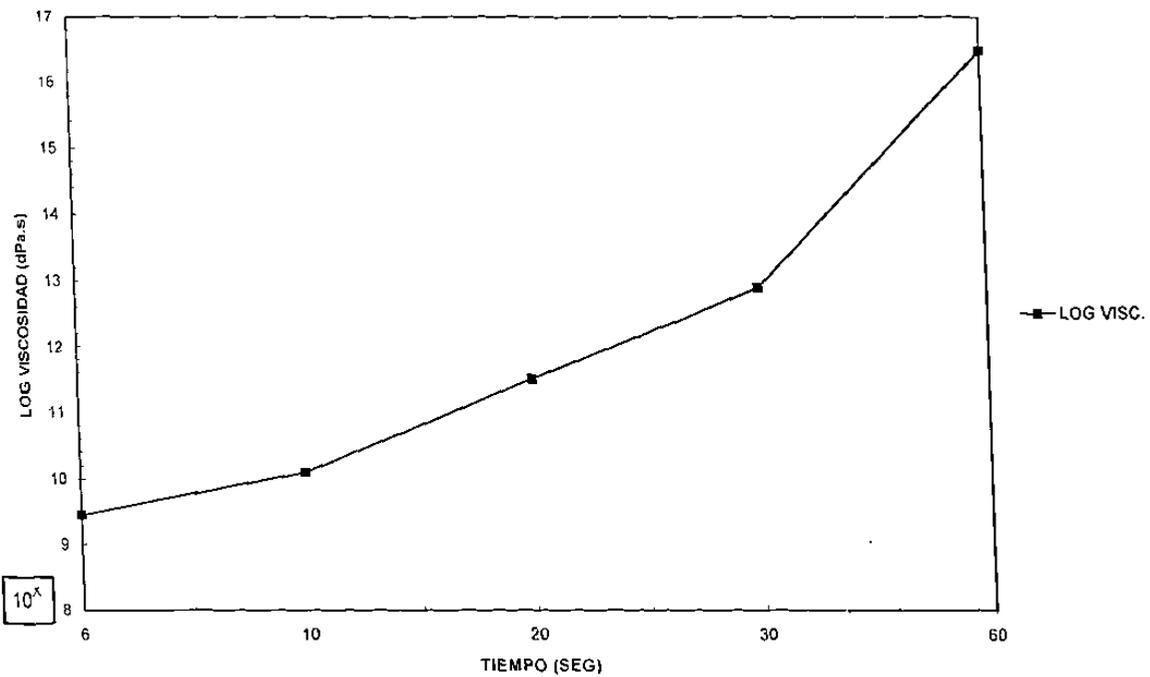


Fig.A.2 Viscosidad vs. Temperatura (Conducción-Radiación)

GRAFICA COMPARATIVA ENFRIAMIENTO

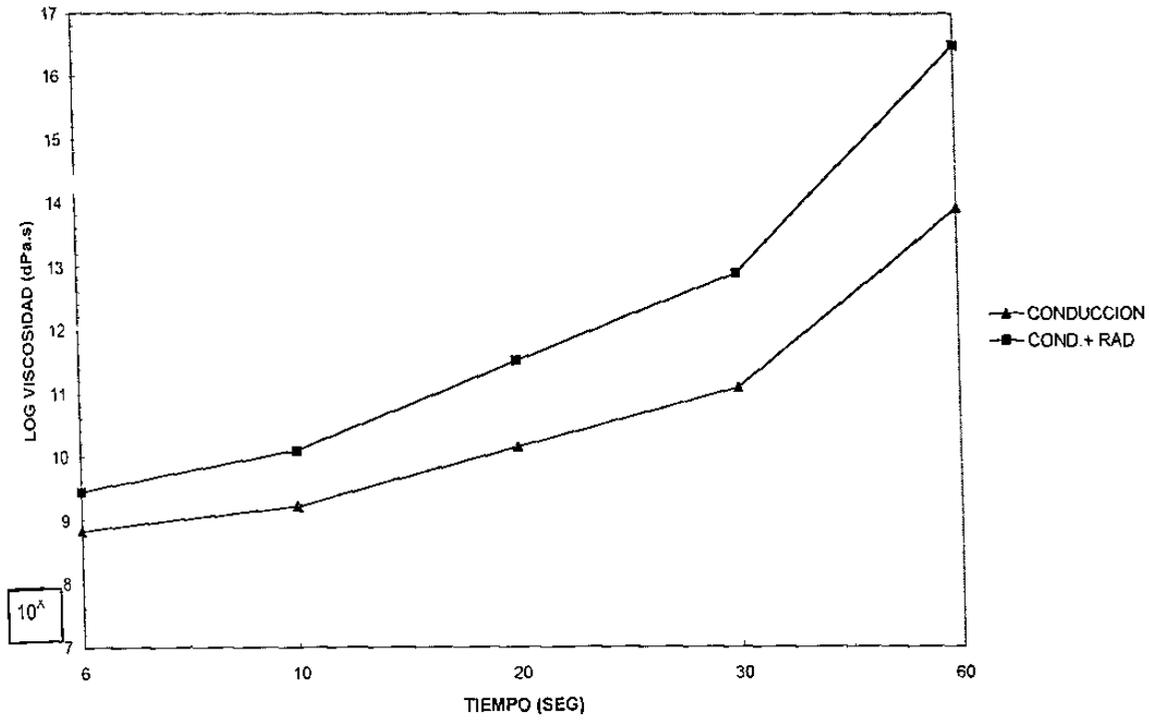


Fig A 3 Comparación de enfriamiento por Conducción vs. Conduccion-Radiación

APÉNDICE B

VIDRIERA MTY MAQUINA IS (CORONA)

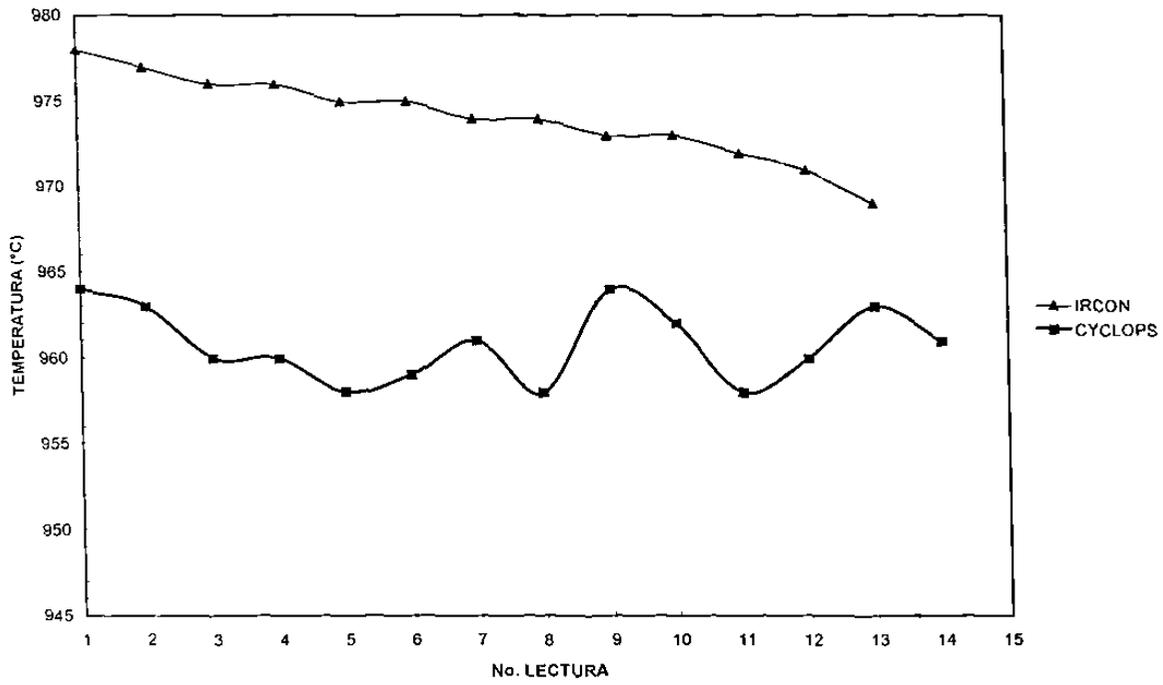


Fig. B.1 Temperatura en envase (corona)

VIDRIERA MONTERREY (MITAD)

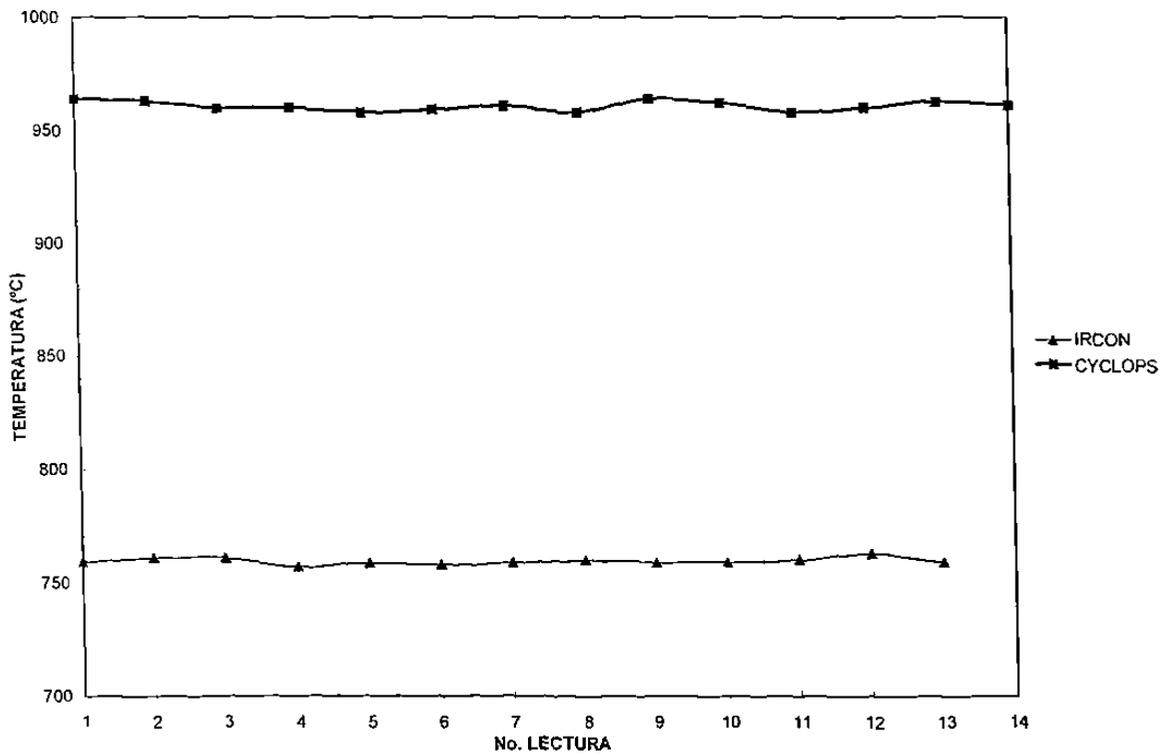


Fig.B.2 Temperatura en envase (mitad)

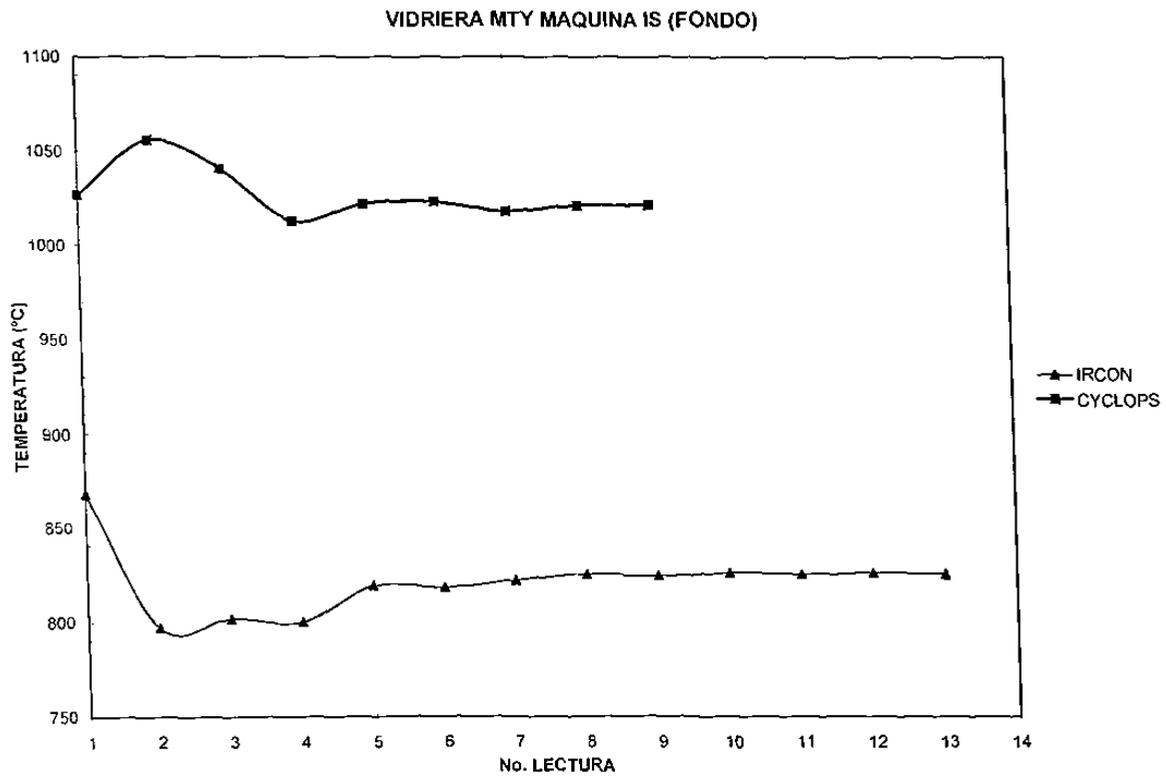


Fig.B.3 Temperatura en envase (fondo)

