



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**ANÁLISIS TÉRMICO EN UN EQUIPO DE PRUEBA PARA
MEDIR LA TEMPERATURA DE DEFLEXIÓN DE UN
PLÁSTICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA.

P R E S E N T A :

MIGUEL ÁNGEL REYES CORTÉS.

ASESOR: M.I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS
 SUPERIORES - CUAUTITLAN
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
 DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLAN
 PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
 Jefa del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Análisis Térmico en un Equipo de Prueba Para Medir la Temperatura
de Deflexión de un Plástico

Que presenta el pasante Miguel Angel Reyes Cortés

Con número de cuenta: 094095478 para obtener el título de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
 Cuautitlan Izcalli, Mex. a 07 de octubre de 2010.

PRESIDENTE	Ing. Enrique Cortés González	<u>[Firma]</u>
VOCAL	Ing. Bernardo Gabriel Muñoz Martínez	<u>[Firma]</u>
SECRETARIO	M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez	<u>[Firma]</u>
1er SUPLENTE	M.I. Sergio Martín Durán Guerrero	<u>[Firma]</u>
2º SUPLENTE	Ing. Eusebio Reyes Carranza	<u>[Firma]</u>

DEDICADO:

PRIMERAMENTE A DIOS. . .

Antes que nada le doy las gracias a Dios por permitirme haber logrado una meta muy importante más en mi vida, sin Él no habría logrado ni alcanzado este objetivo. Y agradezco a Dios por las bendiciones que ha derramado en el transcurso de mi vida.

Me gustaría compartir toda la *Santa Biblia*, pero en este momento citaré un texto bíblico enfocado a mi carrera:

“E hizo en Jerusalén máquinas inventadas por ingenieros, para que estuviesen en las torres y en los baluartes, para arrojar saetas y grandes piedras. Y su fama se extendió lejos, porque fue ayudado maravillosamente, hasta hacerse poderoso”

2° CRÓNICAS 26:15

Le doy gracias a Dios por darme la bendición de tener las habilidades necesarias para terminar mi carrera con éxito, así como se lo ha dado a muchos de sus siervos. ¡Gracias Dios por ser el **único Dios Todopoderoso!**

“A estos cuatro muchachos Dios les dio conocimiento e inteligencia en todas las letras y ciencias; y Daniel tuvo entendimiento en toda visión y sueños.”

DANIEL 1:17

A MIS PADRES. . .

Le doy muchas gracias a Dios por la vida de mis padres, porque han sido una combinación excelente para mi educación, por una parte, su disciplina, el orden, el meditar las cosas, realizarlas de la manera mas correcta y el temple para saber tomar las decisiones, es lo que he aprendido de mi Padre **Gaudencio Reyes Ortiz**.

Por otra parte, todo lo hermoso, todo el cariño, la comprensión, sus cuidados, su ternura, su constancia, su excelente dedicación, la calidad suprema que le da a la comida, y aún se que estaría dispuesta a dar su vida misma por nosotros y por mi. Solo puedo resumir en dos palabras lo que ha hecho en mi vida y ha tocado mi corazón simplemente. . . es **“EL AMOR”** gracias a mi madre **Ángeles Cortés Rosas**.

“Ponme como un sello sobre tu corazón, como una marca sobre tu brazo; Porque fuerte es como la muerte el amor; Duros como el Seol los celos; Sus brasas, brasas de fuego, fuerte llama. Las muchas aguas no podrán apagar el amor, Ni lo ahogarán los ríos. Si diese el hombre todos los bienes de su casa por este amor, De cierto lo menospreciarían.”

CANTARES 8:6-7

A MIS HERMANOS. . .

Por que veo el amor de Dios reflejado en sus vidas y el amor de hermanos tan desinteresado, tan limpio y bueno en el cual han hecho grandes sacrificios para mi formación.

Rocío Patricia Reyes Cortés: por tu apoyo en todos los aspectos y la ayuda recibida de tu parte para el desarrollo de mi carrera.

Cynthia Milán Pérez: por ser una de las pocas personas que han creído en mí para lograr algo importante en mi vida, por el gran apoyo que me has brindado y por los buenos consejos brindados para seguir adelante. También agradecer a **Mago** y **Betty** por el gran apoyo y cariño que me han brindado.

Pero muy especialmente a mi hermano. . .

V. Jesús Reyes Cortés: por ser un excelente hermano y muy ejemplar, por ser tan bueno conmigo (sin merecerlo) responsable, respetuoso, dadivoso, tu gran apoyo económico, moral y espiritual y **por ser el que ¡pago literalmente mi carrera!** y que has hecho grandes sacrificios por nuestra familia y por mi, ¡Los amo!

A MIS PROFESORES. . .

Muchas gracias le doy a Dios por encontrar en la mayoría de mis profesores (no todos) excelentes profesionales, honestos con sus trabajos, y una dedicación intachable e incorruptible ¡Muchas gracias!
En especial al M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez y al profesor Juan Manuel Torres Merino por ver por las necesidades del alumno y mostrar un gran interés por el ser humano.

A MIS AMIGOS. . .

Aunque son pocos pero realmente su amistad es significativa y de gran valor, les agradezco su apoyo, ayuda y compañía que me brindaron durante la carrera y en especial a **Abram Luna Huítrón** que siempre me brindo de su amistad, ayuda y desarrollo como estudiante.

A t e n t a m e n t e

Miguel Ángel Reyes Cortés.

INDICE.

Pág.

ANTECEDENTES.....	1
--------------------------	----------

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.

1.1 Estructura molecular.....	3
1.1.1 La polimerización.....	3
1.1.2 Los polímeros de ingeniería.....	4
1.2 Clasificación de los polímeros.	4
1.2.1 Polímeros lineales.....	4
1.2.2 Polímeros ramificados.....	4
1.2.3 Los termoplásticos.....	5
1.3 Cristalización y deformación.....	5
1.3.1 Efecto de la temperatura sobre los termoplásticos.....	6
1.3.2 Temperatura de degradación.....	6
1.4 Estado vítreo.....	7
1.4.1 Propiedades mecánicas de los termoplásticos.....	8
1.4.2 Termo fluencia y relajación de esfuerzos.....	9
1.5 Rellenos.	11
1.6 Degradación de los polímeros.	11
1.6.1 Degradación por efectos térmicos.....	12
1.6.2 Degradación por exposición a la intemperie.	12
1.7 Propiedad térmica.	12
1.8 Capacidad calorífica.	12
1.9 Tensiones resultantes de gradientes de temperaturas.....	13

CAPÍTULO 2.

NORMA D 648 98-C ASTM “MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA TEMPERATURA DE DEFLEXIÓN DE LOS PLÁSTICOS BAJO UNA CARGA A LA FLEXIÓN EN LA POSICIÓN DE CANTO.”

2.1. Ámbito.	14
2.2. Documentos de referencia.....	15
2.3. Terminología.	16
2.4. Resumen del método de prueba.	16
2.5. Importancia y uso.	16
2.6. Interferencias.	16
2.7. Aparatos.	17
2.7.1. Aparatos.	17
2.7.2. Apoyos de la probeta.....	17
2.7.3. El baño de inmersión.....	18
2.7.4. Dispositivo para medir la desviación de la probeta.....	18
2.7.5. Los pesos.....	18
2.7.6. Sistema de control de la temperatura.....	20
2.7.7. Los micrómetros.....	20
2.8. Toma de muestras.	20
2.9. Dimensiones de la probeta.....	20
2.10. Preparación de los aparatos.	21
2.11. Acondicionamiento.....	21
2.11.1. Acondicionamiento.....	21
2.12. Procedimiento.	22
2.13. Reporte.	23
2.14. Precisión y parcialidad.	24
2.14.1. La precisión.....	24

CAPITULO 3.

APLICACIÓN DEL FLUJO TERMOSIFÓNICO EN EL EQUIPO DE MEDICIÓN.

3.1. Efecto termosifón.....	25
3.2. Densidad.	26
3.3. Características principales de los aceites.	27
3.3.1. Viscosidad.	27
3.3.2. Como se mide la viscosidad.	28
3.3.3. Punto de Inflamación.	28
3.3.4. Resistencia a la oxidación.	28
3.4. Ficha técnica del aceite Paratherm LR para transferencia de calor.	30
3.5. Cálculo de la Densidad del Aceite Paratherm LR para transferencia de calor.....	33
3.5.1. Definición de Presión Hidrostática.	33
3.5.2. Calculo de la Fuerza Resultante en la Probeta y la Presión Hidrostática.....	34

CAPÍTULO 4.

TRANSFERENCIA DE CALOR.

4.1. Introducción.....	36
4.2. Convección.	37
4.2.1. Convección libre o natural.	38
4.2.2. Consideraciones Físicas.	40
4.2.3. Flujo laminar.	41
4.2.4. El número de Reynolds.	41
4.3 Significado físico de los parámetros adimensionales.	43
4.3.1. Número de Reynolds.	43
4.3.2. Número de Prandtl.	43
4.3.3. Número de Schmidt.	44
4.3.4. Número de Grashof.	44
4.3.5. Número de Nusselt.	44
4.3.6. Número de Rayleigh.....	44

CAPÍTULO 5.

ANÁLISIS TÉRMICO EN UN EQUIPO DE PRUEBA PARA MEDIR LA TEMPERATURA DE DEFLEXIÓN DE UN PLÁSTICO.

5.1. Introducción.	45
5.2. Metodología para un cálculo de convección.	45
5.3. Memoria de cálculo para el análisis térmico.....	46
5.4. Resultado del análisis térmico.....	58
CONCLUSIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61
APÉNDICE.....	64
Tabla I Propiedades termo físicas del aceite Paratherm LR para la transferencia de calor.....	65
Tabla II Unidades derivadas para el cálculo de transferencia de calor.....	66
Tabla III Números adimensionales, coeficientes convectivos y perdidas de calor.....	67

ANTECEDENTES.

El principio de la transferencia de calor se ha desarrollado por la misma necesidad del hombre, primero el hombre se vio obligado a cubrir las necesidades básicas al tener que abrigarse del frío o poder refrescar su cuerpo cuando tenía calor, así como el poder alimentarse ya sea cocinando sus alimentos o manteniéndolos frescos y durables.

Al cubrir estas necesidades después el hombre se vio en la necesidad de desarrollar algunos inventos, maquinas o herramientas para mejorar su calidad de vida y al mismo tiempo desarrollo su propia tecnología la cual también se le debía de prestar atención en cuanto al estudio de calor, viendo que sus diseños y creaciones necesitaban de medios de enfriamiento o de calefacción.

Es por eso que se debe de dar una gran importancia a lo que es el estudio de transferencia de calor el cuál en nuestros días lo vemos reflejado en todo lo que nos rodea, ya sea en la casa, en la escuela, en nuestro trabajo, en los diferentes lugares de diversión que frecuentamos, en los hospitales, iglesias, etc.

La transferencia de calor es la energía que se transfiere de un sistema a otro con menor temperatura, debido únicamente a la diferencia de temperaturas o bien se puede definir como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas.

Podemos citar una infinidad de ejemplos en los cuales ocurre la transferencia de calor como son: nuestros cuerpos cuando transfieren calor a los alrededores, el sistema de enfriamiento del motor en un automóvil cuando la transferencia de calor se da de los cilindros al medio ambiente mediante el radiador, cuando ponemos a calentar una cacerola con agua y la transferencia de calor es el resultado del movimiento del fluido inducido por las burbujas de vapor generadas en el fondo del mismo etc.

En la transferencia de calor los conceptos fundamentales son: el tipo o índice de transferencia de calor y la distribución de temperaturas.

La transferencia de calor es un fenómeno de superficies, es decir, la transferencia de calor ocurre de o hacia una superficie. Son los dos modos de transferencia de calor difusión y radiación.

La difusión en una superficie requiere un medio material adyacente a ella y el efecto en el cambio de temperatura se propaga lentamente comparado con la radiación.

La conducción y convección son dos mecanismos de transferencia de calor de la difusión, la conducción se lleva a cabo a través de sólidos o fluidos estacionarios, mientras que la convección se da entre una superficie sólida y un fluido en movimiento. En contraste, la radiación se lleva a cabo en dos superficies cualquiera y no requiere de un medio para transferir el calor.

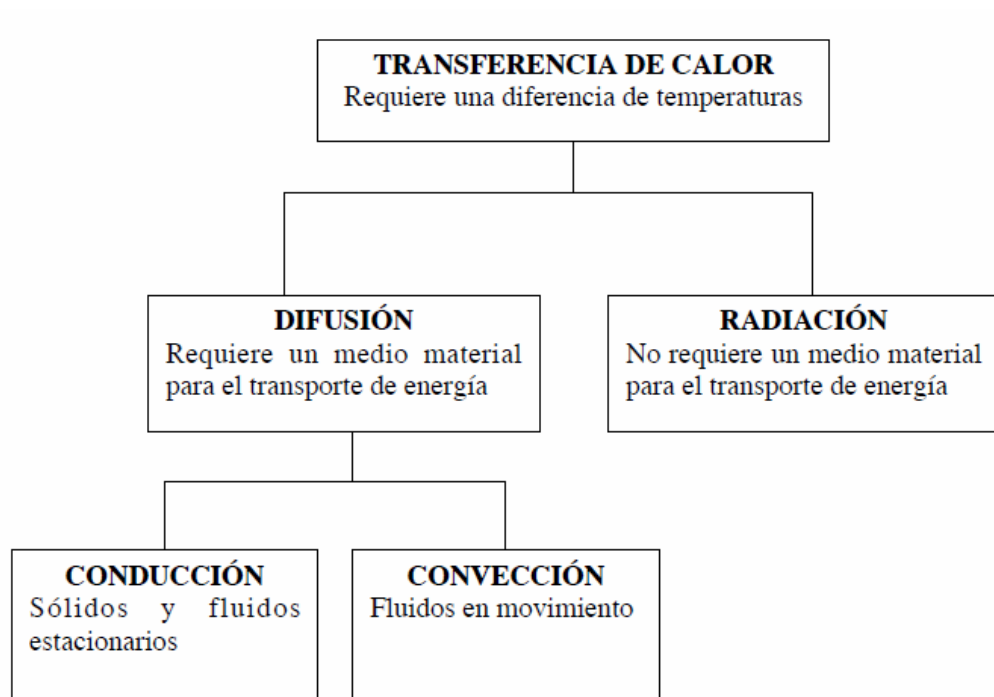


Figura 1 Diagrama de los mecanismos de transferencia de calor.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN.

A lo largo de cientos de años se han utilizado los polímeros naturales procedentes de plantas y animales. Estos materiales incluyen madera, caucho, lana, cuero y seda. Desde principios del siglo XX, la moderna investigación científica ha determinado la estructura molecular de este grupo de materiales y ha desarrollado numerosos polímeros sintetizados a partir de pequeñas moléculas orgánicas. Desde el fin de la Segunda Guerra Mundial, el campo de los materiales se ha visto revolucionada por la llegada de los polímeros sintéticos. En algunas aplicaciones los metales y la madera se sustituyen por polímeros, que tienen propiedades idóneas y se pueden fabricar a bajo costo. Las propiedades de los polímeros, como en el caso de los metales y de las cerámicas, están relacionadas con la estructura elemental de la materia.

1.1 Estructura molecular.

Las características físicas de un polímero no solo dependen del peso molecular y de la forma, sino que también dependen de las diferencias en la estructura de las cadenas moleculares. Las técnicas modernas de síntesis de polímeros permiten un gran control sobre varias posibilidades estructurales entre ellas las lineales, ramificadas, entrecruzadas y reticuladas, y también varias configuraciones isométricas.

Los **plásticos** son materiales compuestos principalmente de polímeros de origen natural y modificados o de polímeros hechos artificialmente que a veces contienen aditivos como fibras, cargas, pigmentos y otros similares que mejoran mas aún sus propiedades. Entre los plásticos encontramos los termoplásticos, los termoestables y los elastómeros.

1.1.1 La polimerización

Es el proceso mediante en el cual pequeñas moléculas de una sola unidad (conocidas como **monómeros**) o de unas cuantas unidades (**oligómeros**) se unen químicamente para crear moléculas gigantes. Por lo común, la polimerización comienza con la producción de largas cadenas en los cuales los átomos están fuertemente unidos mediante un enlace covalente. Los plásticos se utilizan en una increíble cantidad de aplicaciones como: encerres domésticos, elementos estructurales, materiales biomédicos, solo por mencionar algunos.

Los plásticos también se usan para fabricar componentes electrónicos debido a su capacidad aislante y a su constante dieléctrica baja.

1.1.2 Los polímeros de ingeniería

Están diseñados para dar una mejor resistencia o un mayor rendimiento a temperaturas elevadas teniendo como característica su elevado costo. Algunos de los polímeros de ingeniería pueden funcionar a temperaturas tan altas como 350 °C; otros, usualmente como fibras, tienen resistencias superiores a las del acero.

1.2 Clasificación de los polímeros.

Los polímeros se clasifican de varias formas distintas: según la síntesis de sus moléculas, según su estructura molecular o de acuerdo con la familia química a la que pertenecen. Una manera de clasificar a los polímeros es establecer si se trata de un polímero lineal o de un polímero ramificado. Un polímero lineal, está formado de cadenas moleculares en forma de espagueti. En un polímero ramificado hay cadenas primarias de polímero y cadenas más pequeñas secundarias (ramales) que nacen de cadenas principales. Una mejor manera de describir a los polímeros es en función de su comportamiento mecánico y térmico.

1.2.1 Polímeros lineales.

En un **polímero lineal** las unidades monoméricas se unen unas a otras formando cadenas sencillas. Estas largas cadenas son flexibles y se comportan como una masa de fideos, donde cada círculo representa una unidad monomérica. Las cadenas de los polímeros lineales pueden unirse entre si por fuerzas de van der Waals.

1.2.2 Polímeros ramificados.

Se sintetizan polímeros cuya cadena principal está conectada lateralmente con otras cadenas secundarias llamados polímeros ramificados. Las ramas, que forman parte de la cadena molecular principal, son el resultado de las reacciones locales que ocurren durante la síntesis del polímero. La eficacia del empaquetamiento de la cadena se reduce con las ramificaciones y, por lo tanto, también disminuye la densidad del polímero. Ver figura 1.1

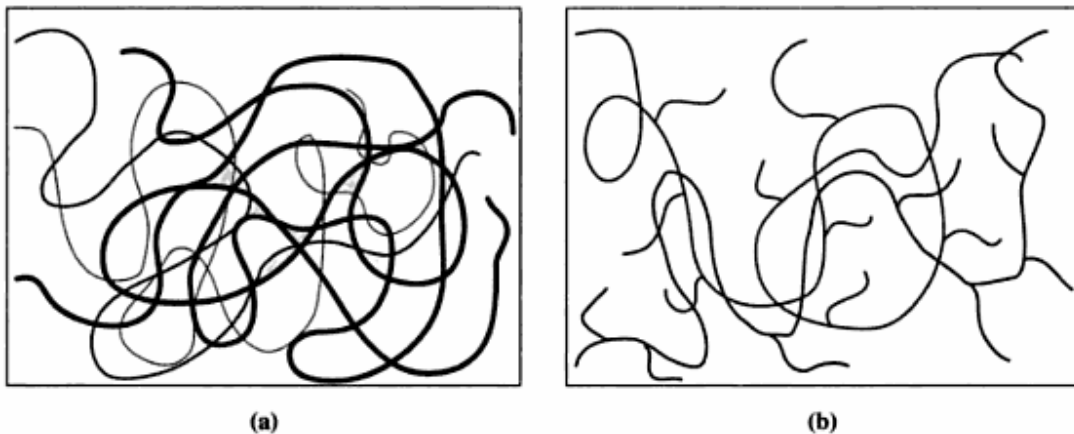


Figura 1.1 Esquema que muestra (a) Polímero Lineal no Ramificado y (b) Polímero lineal Ramificado.

1.2.3 Los termoplásticos

Están formados por largas cadenas producidas al unir monómeros: comúnmente se comportan de una manera plástica y dúctil. Las cadenas pueden o no estar ramificadas. Las cadenas individuales entrelazadas. Entre los átomos de cadenas diferentes existen enlaces de van der Waals relativamente débiles.

En los **termoplásticos** las cadenas se pueden desenlazar mediante un esfuerzo a la tensión. Los termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos. Al calentarse se ablandan y se funden. Se procesan en ciertas formas calentándolos a temperaturas elevadas. Los termoplásticos se pueden reciclar fácilmente.

1.3 Cristalización y deformación.

La cristalinidad, es importante en los polímeros, ya que afecta sus propiedades mecánicas y ópticas. La cristalinidad se presenta durante el procesamiento de los polímeros como resultados de cambios en la temperatura y de esfuerzos aplicados; alentar la cristalización del polímero también ayuda a incrementar su densidad, resistencia al ataque químico y propiedades mecánicas, incluso a temperaturas mas elevadas, debido a la fuerte unión existente entre las cadenas. Además la deformación endereza y alinea las cadenas, produciendo una orientación preferente.

1.3.1 Efecto de la temperatura sobre los termoplásticos.

Las propiedades de los termoplásticos cambian en función de la temperatura. Es necesario saber la forma en que ocurren estos cambios, ya que pueden ayudarnos a:

- a) El diseño de mejores componentes.
- b) Guiar el tipo de técnicas de procesamiento que deban utilizarse.

Se pueden observar varias temperaturas y estructuras críticas, las cuales una vez que se hayan enfriado por debajo de la temperatura de fusión, los materiales termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos. Con mayor frecuencia **los termoplásticos de ingeniería** están formados por regiones amorfas y cristalinas. La cristalinidad de los materiales termoplásticos puede introducirse por temperatura (enfriamiento lento) o mediante aplicación de esfuerzos que desenreden cadenas. Ver figura 1.2

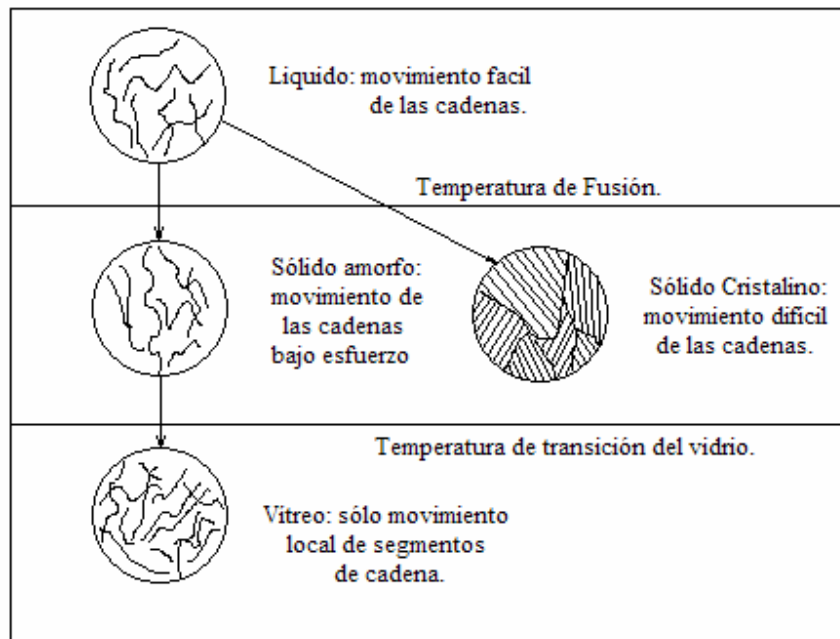


Figura 1.2 Efecto de la temperatura en la estructura y en el comportamiento de los materiales termoplásticos.

1.3.2 Temperatura de degradación.

A temperaturas muy altas pueden destruirse los enlaces covalentes entre los átomos dentro de la cadena lineal y el polímero puede quemarse o carbonizarse. En los polímeros termoplásticos, la descomposición se presenta en estado líquido esta sería la temperatura de degradación.

Algunos materiales agregados a los termoplásticos como, por ejemplo, la piedra caliza, el talco, la alúmina, etc. Actúan como estabilizadores térmicos, es decir, estabilizadores de calor. Absorben el calor protegiendo la matriz polimérica.

La exposición a otras formas de productos químicos o energías por ejemplo, oxígeno, radiación ultravioleta y ataques por bacterias también hace que el polímero se degrade o se envejezca lentamente, incluso a bajas temperaturas.

1.4 Estado vítreo.

Puesto que las propiedades mecánicas de los polímeros dependen de los cambios de temperatura. La temperatura de fusión y/o de Transición Vítreo de un polímero se determina como en el caso de los materiales cerámicos.

Algunos de los factores que influyen en la temperatura de transición vítrea es cuando a bajas temperaturas las vibraciones de los átomos tienen pequeñas amplitudes y son relativamente independientes. Al aumentar la temperatura, las vibraciones incrementan su magnitud y se coordinan hasta el punto en que se producen movimientos de traslación de cadenas que, a elevadas temperaturas, implica a muchos átomos en cadena.

A temperatura de fusión el movimiento de las cadenas tiene tanta energía que es capaz de romper gran número de enlaces secundarios y generar una estructura molecular altamente desordenada. El valor de temperatura de fusión de un polímero cristalino o semi-cristalino depende de los elementos estructurales que modifican la capacidad de las cadenas para formar enlaces de van der Waals y/o de hidrógeno.

La temperatura de transición vítrea también depende de la estructura de los componentes, la cual influye en la capacidad de las cadenas moleculares para vibrar y rotar a medida que la temperatura aumenta. Probablemente la flexibilidad de las cadenas ejerce la mayor influencia. Cuanto más rígida sea una cadena, la probabilidad que experimente un movimiento de rotación cuando la temperatura aumenta es menor.

Por debajo de la Temperatura de Transición Vítreo T_g el polímero amorfo lineal se hace duro, frágil y como el vidrio. Nuevamente no se trata de una temperatura fija, sino de un rango de temperaturas. Cuando el polímero se enfría por debajo de la temperatura de transición vítrea,

ciertas propiedades, como la densidad o el modulo de elasticidad, cambian a una velocidad diferente. Ver figura 1.3

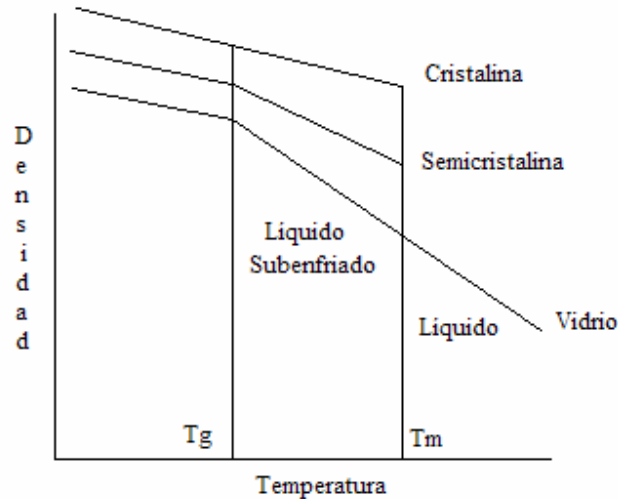


Figura 1.3 Relación entre densidad y temperatura del polímero mostrando temperaturas de Fusión (T_m) y de transición vítrea (T_g).

A pesar de que los polímeros vítreos tienen una mala ductilidad y formabilidad, poseen buena tenacidad, rigidez y resistencia a la termo fluencia. Varios polímeros importantes, tienen temperaturas de transición vítrea por encima de la temperatura ambiente. La temperatura de transición vítrea comúnmente es de 0.5 a 0.75 veces la temperatura absoluta T_m . también hay muchos materiales termoplásticos que se vuelven rígidos a temperaturas mas bajas.

1.4.1 Propiedades mecánicas de los termoplásticos.

Las propiedades mecánicas de los polímeros se especifican con los mismos parámetros utilizados para los metales: módulo elástico y resistencia a la tracción, al impacto y a la fatiga. El ensayo esfuerzo-deformación se emplea para caracterizar parámetros mecánicos de muchos materiales poliméricos. La mayoría de las características mecánicas de los polímeros son muy sensibles a la velocidad de deformación, a la temperatura y a la naturaleza química del medio (presencia de agua, oxígeno, disolventes orgánicos, etc.). Ver figura 1.4

La mayoría de los polímeros termoplásticos exhiben un comportamiento no newtoniano y visco elástico. El comportamiento no es newtoniano; es decir, el esfuerzo y la deformación no están relacionados linealmente para la mayor parte de la curva esfuerzo-deformación.

El comportamiento visco elástico significa que cuando a un polímero termoplástico se le aplica una fuerza externa, ocurren deformaciones tanto elásticas como plásticas.

El comportamiento mecánico está íntimamente ligado a la forma en que las cadenas poliméricas se mueven bajo carga en relación con las demás. En los termoplásticos la deformación es más complicada. El proceso de deformación depende a la vez del tiempo y de la velocidad a la cual se aplica una carga.

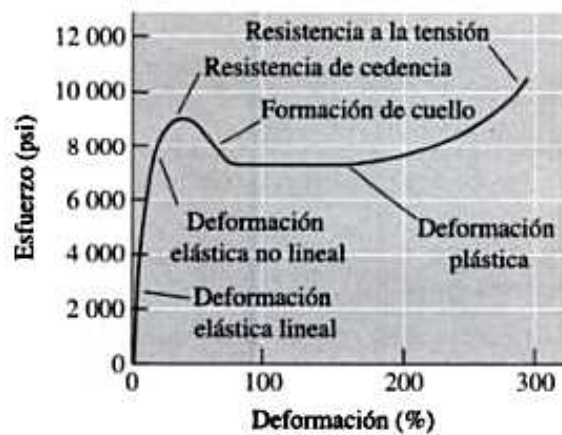


Figura 1.4 Curva Esfuerzo-Deformación de un polímero termoplástico.

1.4.2 Termo fluencia y relajación de esfuerzos.

Los polímeros termoplásticos también exhiben termo fluencia, una deformación permanente que depende del tiempo ante un esfuerzo o una carga constante. También muestran relajación de esfuerzos; es decir, bajo una deformación constante, el nivel de esfuerzo se reduce con el tiempo. La relajación de esfuerzo, al igual que la termo fluencia, es una consecuencia del comportamiento visco elástico del polímero. Ver figura 1.5

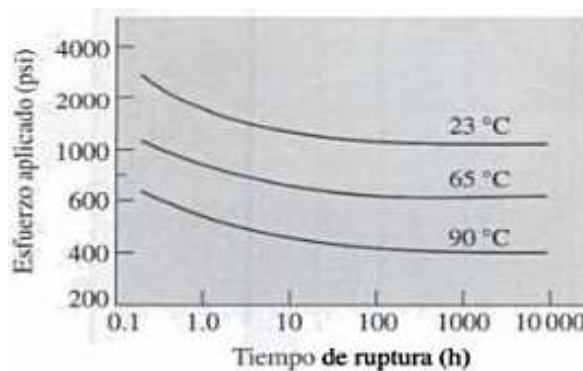


Figura 1.5 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento esfuerzo-ruptura.

Una medida mas práctica de las propiedades de alta temperatura y de termo fluencia de un polímero es la **temperatura de deflexión térmica** o **temperatura de distorsión térmica** bajo una carga, que es la temperatura a la cual ocurre una deformación dada en una viga para una carga estándar.

Una temperatura de deflexión elevada indica una buena resistencia a la termo fluencia y nos permite comparar varios polímeros en la tabla 1.1 donde se muestran las temperaturas de deflexión de varios polímeros, que proporciona la temperatura requerida para causar una deflexión de 0.01 pulg bajo un esfuerzo de 264 psi en el centro de una barra que descansa sobre los puntos de apoyo separados cuatro pulgadas.

Tabla 1.1 Temperatura de deflexión para polímeros seleccionados bajo un esfuerzo de 264 psi.

Polímero	Temperatura de Deflexión (°C)
Poliéster	40
Polietileno	40
Polipropileno	60
Fenólica	80
Poliamida	90
Poliestireno	100
Polioximetileno	130
Poliamidaimida	280
Epoxi	290

Las características mecánicas de los polímeros son mucho más sensibles a las variaciones de temperatura, en condiciones ambientales que las de los metales, los polímeros son, en muchos aspectos, mecánicamente distintos de los metales.

Las propiedades mecánicas de los polímeros dependen en gran medida de la magnitud de las fuerzas intermoleculares débiles. El peso molecular es otra característica de las cadenas moleculares que influye en el comportamiento mecánico. En los polímeros de bajo peso molecular, la resistencia mecánica aumenta al aumentar el peso molecular.

1.5 Rellenos.

Los materiales de relleno se adicionan a los polímeros para incrementar las resistencias a la tracción, a la compresión y a la abrasión, la tenacidad, la estabilidad dimensional y térmica y otras propiedades. Como relleno se utiliza serrín, sílice, arena, vidrio, arcilla, talco, caliza e incluso polímeros sintéticos, todos ellos totalmente pulverizados. Los tamaños de las partículas van de 10 nm a dimensiones macroscópicas. El coste del producto final disminuye porque estos materiales baratos substituyen una parte del volumen de los polímeros mas caros.

1.6 Degradación de los polímeros.

Los materiales poliméricos también experimentan deterioro mediante interacciones con el medio ambiente. Sin embargo, para referirse a estas interacciones no deseadas, se utiliza el término de degradación en vez de corrosión ya que los procesos son distintos. La degradación polimérica implica fenómenos físicos y químicos, mientras que las reacciones de la corrosión metálica suelen ser electroquímicas. Además, en la degradación de los polímeros tiene lugar gran variedad de reacciones y consecuencias adversas. Los polímeros se deterioran por inchamiento y por disolución. La ruptura de enlaces covalentes, ya sea por energía térmica, por reacciones químicas, y también por radicación, generalmente va acompañada de una disminución de la integridad mecánica. Debido a la complejidad química de los polímeros, los mecanismos de su degradación no se conocen lo suficiente.

1.6.1 Degradación por efectos térmicos.

La degradación térmica consiste en la escisión de cadenas moleculares a elevadas temperaturas. Una consecuencia de esto es que algunos polímeros experimentan reacciones químicas que producen especies gaseosas. Estas reacciones se evidencian por la pérdida del peso del material; la estabilidad térmica de los polímeros es una medida de su resistencia a esta descomposición. La estabilidad térmica se relaciona principalmente con la magnitud de las energías de enlace de

los diferentes componentes de un polímero: las energías más elevadas corresponden a los materiales más estables térmicamente.

1.6.2 Degradación por exposición a la intemperie.

La mayoría de los materiales poliméricos en servicio están expuestos al exterior. El deterioro resultante se denomina **degradación por exposición a la intemperie** que a menudo resulta una combinación de varios procesos distintos. En estas condiciones el deterioro es principalmente consecuencia de la oxidación iniciada por la radiación ultravioleta del sol. Algunos polímeros absorben agua y disminuyen su dureza y tenacidad. La resistencia a la degradación por exposición a la intemperie de los polímeros es dispar.

1.7 Propiedad térmica.

Por propiedad térmica se entiende a la respuesta de un material al ser calentado. A medida que un sólido absorbe energía en forma de calor, su temperatura y sus dimensiones aumentan. La energía puede transportarse a las regiones más frías de la muestra si existe un gradiente de temperatura y, finalmente, la muestra puede fundirse. La capacidad calorífica, la dilatación térmica y la conductividad térmica son propiedades muy importantes en la utilización práctica de los polímeros.

1.8 Capacidad calorífica.

Cuando se calienta un material sólido, este tiene un aumento de temperatura, indicando con ello que absorbe energía. La capacidad calorífica es una propiedad que indica la capacidad de un material de absorber calor de su entorno; representa la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura en una unidad. En términos matemáticos la capacidad calorífica (C) puede expresarse como:

$$C = \frac{dQ}{dT} \dots\dots (1.1)$$

Donde dQ es la energía necesaria para producir un cambio dT en la temperatura. Normalmente, la capacidad calorífica se expresa por mol de material (J / mol-K, cal / mol-K) a veces se utiliza el calor específico; este representa la capacidad calorífica por unidad de masa y sus unidades

son ($J / Kg \cdot K$, $cal / g \cdot K$). Existen dos métodos para medir esta propiedad, según cuales sean las condiciones del medio en que se realiza la transferencia de calor. Uno es medir la capacidad calorífica mientras se mantiene la muestra a volumen constante, (C_v); el otro es bajo presión constante (C_p) y siempre es mayor que C_v ; sin embargo, esta diferencia es muy pequeña para la mayoría de los materiales sólidos a temperatura ambiente e inferiores.

En estos materiales la transferencia de calor se realiza por vibración, traslación y rotación de moléculas. La magnitud de las conductividades térmicas depende del grado de cristalinidad; un polímero con un alto grado de cristalinidad y una estructura ordenada tendrá una conductividad mayor que el material amorfo equivalente.

1.9 Tensiones resultantes de gradientes de temperaturas.

Cuando un cuerpo es calentado o enfriado, la distribución de temperatura dependerá de su tamaño y forma, de la conductividad térmica del material y de la velocidad del cambio de temperatura. Como el resultado de los gradientes de temperatura en el interior del cuerpo, debidos frecuentemente a calentamientos o enfriamientos en los que la temperatura externa cambia más rápida que la interna, se producen tensiones térmicas; los cambios dimensionales diferenciales restringen la dilatación o contracción libres de elementos de volumen adyacentes dentro de la pieza.

CAPÍTULO 2.

NORMA D 648 98-C ASTM “MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA TEMPERATURA DE DEFLEXIÓN DE LOS PLÁSTICOS BAJO UNA CARGA A LA FLEXIÓN EN LA POSICIÓN DE CANTO.”

2.1. Ámbito.

2.1.1. Este método de prueba cubre la determinación de la temperatura en la cual existe una deformación arbitraria cuando la probeta esta en una posición apropiada bajo las condiciones de prueba necesarias.

2.1.2. Este método de prueba es aplicable a materiales moldeados y de probetas disponibles en espesores de 3 mm (1/8 in) o más grandes los cuales son rígidos o semirígidos a temperaturas normales.

Nota 1: las probetas menores a 3 mm (0.125 in) pero mayores a 1 mm (0.040 in) en espesor pueden ser comparadas usando otra muestra que tenga un espesor de 3 mm. La probeta debe tener una distribución uniforme a la tensión. Se ha preparado una probeta como muestra por cementación en los extremos de la probeta, dando suavidad en los bordes de la probeta con lija para eliminar imperfecciones. La dirección de la carga debe ser perpendicular a la probeta de prueba.

2.1.3 Los valores establecidos están en unidades SI y serán contempladas como estándar. Los valores dados en paréntesis son únicamente informativos.

2.1.4 Esta norma no pretende dirigir todo lo concerniente a la seguridad de esta prueba, en su caso, asociadas con el uso de la misma. Es la responsabilidad del usuario de esta norma establecer la práctica apropiada, sana, con seguridad y determinar la aplicabilidad en cuanto a las limitaciones reglamentarias del uso de la norma.

2.2. Documentos de Referencia.

2.2.1. Normas ASTM:

D 618 Practica para condicionamiento de plásticos y materiales de aislamiento eléctrico para pruebas.

D 883 Terminología relacionada a los plásticos.

D 1898 Prácticas para muestras de plásticos.

D 1999 Guía para la selección de la preferencia de las probetas y parámetros de prueba estándar de la ISO/IEC.

D 5947 Métodos de prueba para dimensiones físicas y plásticas de las probetas de prueba.

E 1 Especificación para los termómetros según la Norma ASTM.

E 77 Método de verificación y graduación de los termómetros de vidrio.

E 177 Práctica para el uso de los términos de precisión y descentramiento en los métodos de prueba de la probeta en la norma ASTM.

E 220 Método de calibración de termopares por técnicas de comparación.

E 608 Especificación para los termopares con cubierta metálica y base de metal.

E 644 Métodos de pruebas industriales para medir la resistencia del termómetro.

E 879 Especificación para el registro de la temperatura a través del sensor para laboratorios clínicos.

E 1137 Especificación de pruebas industriales para medir la de resistencia del termómetro de platino.

2.2.2. ISO Estándar:

ISO 75-1 **Plásticos**-Determinación de la temperatura de deflexión bajo carga- parte 1 Método general de prueba.

ISO 75-2 **Plásticos**- Determinación de la temperatura de deflexión bajo carga- parte 2 Plásticos.

2.2.3. NIST:

NBS Publicación Especial 250-22

2.3. Terminología.

2.3.1. En general- La definición de plásticos usados en este método de prueba están de acuerdo con la *terminología D 883* a menos que se indique otra cosa.

2.4. Resumen del método de prueba.

2.4.1. La probeta de sección transversal rectangular será probada en posición de canto tan simple como una viga con una carga aplicada en el centro de la probeta dándole una máxima tensión de 0.455 MPa (66psi) o 1.82 MPa (264 psi). La probeta estará bajo una carga puntual en un medio de transferencia de calor provisto con un sistema de incremento de temperatura de 2 ± 0.2 °C/min. La temperatura del medio será registrada cuando la barra de prueba se haya desviado 0.25 mm (0.010 in). Esta temperatura será registrada como la temperatura de deflexión bajo esfuerzo sobre la probeta de la prueba.

2.5. Importancia y uso.

2.5.1. Esta prueba es particularmente propia para control y desarrollo del trabajo. Los datos obtenidos por este método de prueba no serán admitidos para predecir el comportamiento de los materiales plásticos a temperaturas elevadas excepto en aplicaciones en las cuales el factor tiempo, temperatura, método de carga, y el esfuerzo sean similares a los especificados en este método de prueba. Los datos no son destinados para usos de diseño o predecir la resistencia a temperaturas elevadas.

2.6. Interferencias.

2.6.1. Los resultados de la prueba pueden depender del valor de transferencia de calor entre el fluido, la probeta de prueba y la conductividad térmica del fluido.

2.6.2. Los resultados de esta prueba pueden depender de las dimensiones del ancho y la altura de la probeta y la deflexión final en la que la temperatura de deflexión es determinada.

2.6.3. El tipo de molde y el proceso de moldeo usados para producir las probetas de prueba también afectarán los resultados obtenidos en la prueba. Las condiciones de moldeo se

harán de conformidad con los mismos criterios con ese material o serán acordadas en cooperación con los laboratorios.

2.7. Aparatos.

2.7.1. El aparato será construido esencialmente de acuerdo a lo que se muestra en la figura 2.1 y estará compuesto de los siguientes elementos:

2.7.2. *Apoyos de la probeta*, los apoyos para la probeta serán fabricados de metal, la probeta será de 100 ± 2 mm (3.94 ± 0.08 in) también se debe permitir que la carga que se aplicará en la parte superior de la probeta sea perpendicular y esté a la mitad entre los soportes. El contacto entre los soportes de apoyo y de la probeta en la cual la carga es aplicada serán redondeados en un radio de 3 ± 0.2 mm (0.118 ± 0.008 in)

Nota 2- la prueba debe de ser hecha con el aparato mencionado usando una barra ejecutadora hecha de un material que tenga un bajo coeficiente de expansión. El valor de la temperatura que se utilice deberá cubrir un factor de corrección determinado para cada rango de temperatura. Si su espesor es de 0.013 mm (0.0005 in) o mayor, este es un signo algebraico el cual deberá ser notado y el factor debe ser aplicado para cada prueba agregándolo algebraicamente para poder obtener la deflexión aparente en la prueba de la probeta.

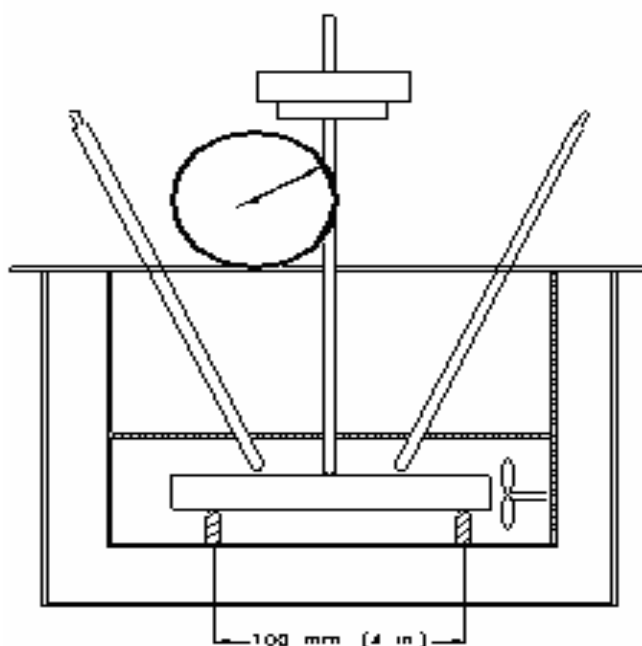


Figura 2.1. Aparato para la determinación de temperatura de deflexión.

2.7.3. El baño de inmersión- se debe de usar un adecuado líquido de transferencia de calor en el cual la probeta estará inmersa. Este medio de transferencia de calor será muy bien agitado durante la prueba y será provisto por un medio de incremento de temperatura con un valor uniforme de 2 ± 0.2 °C/min. Este valor calorífico será considerado apropiado si, sobre todos los intervalos de 5 min durante la prueba, la temperatura del fluido se haya incrementado 10 ± 1 °C en la probeta colocada en el medio de transferencia de calor.

Nota 3- un líquido como medio de transferencia de calor será elegido el cual no afectará a la probeta. Los aceites minerales son considerados como seguros a igniciones hasta 115 °C. Los aceites de silicona pueden ser calentados hasta alrededor de 260 °C por periodos cortos de tiempo. Para temperaturas aun más altas, se debe usar un medio especial de transferencia de calor. Para mejorar el desempeño y para alargar la vida del aceite se puede usar CO₂ u otro gas inerte para aislar la superficie del aceite de la atmósfera.

Nota 4- un horno con circulación de aire caliente puede ser usado si este puede mostrar que los resultados obtenidos sean equivalentes a lo especificado en esta norma.

2.7.4. Dispositivo para medir la desviación de la probeta- el dispositivo debe de ser adecuado para medir la desviación de la probeta por lo menos 0.25 mm (0.010 in). Este deberá ser legible para mediciones desde 0.01 mm (0.0005 in) o menores. El dispositivo puede ser un instrumento de calibración digital o algún otro indicador o aparato que registre o grabe la desviación de la probeta, incluyendo sensores de desplazamiento eléctrico.

2.7.5. Los pesos- un peso de magnitud adecuada hará que la probeta se encuentre bajo un esfuerzo a la tensión de 0.455 MPa (66 psi) \pm 2.5% o 1.82 MPa (264 psi) \pm 2.5%. El peso de la barra ejecutadora, en donde se aplica la fuerza de prueba, será determinado e incluido como parte de la carga total. La fuerza ejercida por el resorte del calibrador será determinada y será incluida como parte de la carga. La fuerza calculada de la prueba y la masa deben de ser agregadas para conseguir la tensión deseada como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$F = \frac{2Sbd^2}{3L} \dots\dots (2.1)$$

$$F^1 = \frac{F}{9.80665} \dots\dots(2.2)$$

$$m_w = (F - F_s)/9.80665 - m_r \dots\dots (2.3)$$

Donde:

F = carga, **N**.

F¹ = carga **kgf**.

S = esfuerzo a la tensión sobre la probeta (0.455 MPa o 1.82 MPa)

b = ancho de la probeta, **mm**.

d = altura de la probeta, **mm**.

L = espacio a lo largo entre los soportes (100 **mm**)

M_w = masa agregada, **Kg**.

F_s = es la fuerza ejercida por cualquier componente del resorte envuelto, (**N**); este es un valor positivo si la compresión del resorte es hacia la probeta de prueba (hacia abajo), o un valor negativo si la compresión del resorte es opuesto al descenso de la barra ejecutadora, o cero si tal componente no esta relacionado.

M_r = es la masa de la barra ejecutadora que se aplica a la probeta de prueba, **Kg**.

Nota 5-En algunos de los diferentes diseños de este aparato, la fuerza del resorte del calibrador es directamente ascendente (opuesto a la dirección del espécimen de carga,) lo cual reduce la fuerza neta aplicada en la probeta. En otros diseños del aparato, la fuerza del resorte del calibrador actúa en forma descendente (en dirección del espécimen de carga), el cual incrementa la fuerza neta aplicada en la probeta. La masa aplicada a la carga de la barra ejecutadora debe ser ajustada de acuerdo a (incrementar la línea de fuerza hacia arriba y un decremento de la línea de fuerza hacia abajo) una compensación. En determinados calibradores cuando la fuerza que ha sido ejercida por el resorte puede marcar ciertas variaciones que pueden ser considerables sobre su misma trayectoria, esta fuerza se debe medir en toda la trayectoria recorrida del resorte en el

calibrador. Se sugieren procesos para determinar la carga total requerida para corregir la fuerza del calibrador.

2.7.6. Sistema de control de la temperatura- consiste de un termopar, termómetro, resistencia-termómetro, termistor, etc., como sensor, en asociación con la instrumentación correspondiente para cubrir un rango apropiado de temperatura. El termómetro tendrá alguna de las siguientes características, o su equivalente, como se menciona en la especificación de E1: el termómetro debe de contar con escalas de 1°C o 2°C, teniendo rangos de -20 hasta 150 °C o de -5 hasta 300 °C respectivamente, cualquiera de los dos debe cubrir el rango de temperatura lo mas aproximado posible. El termómetro de vidrio con mercurio será ajustado a la profundidad necesaria de inmersión de acuerdo con los *métodos E 77*. Los termopares deben cumplir con los requerimientos de los *métodos E 644* y la *especificación E 1137*. Los termistores deben de cumplir con los requerimientos de la *especificación E 879* y ser ajustados de acuerdo con *NIST publicación especial. 250-22*.

2.7.7. Los micrómetros- los micrómetros deben reunir lo requerido en los *métodos de prueba D 5947* y serán ajustados de acuerdo a este método de prueba.

2.8. Toma de muestras.

2.8.1. A menos que se especifique lo contrario, la probeta cumplirá con el procedimiento de toma de muestras prescrito en la *Práctica D 1898*. Una muestra estadística adecuada será considerada una alternativa aceptable.

2.9. Dimensiones de la probeta.

2.9.1. Por lo menos dos probetas serán usadas para cada prueba bajo un esfuerzo a la tensión. La probeta deberá ser de 127 mm (5 in) de longitud, 13 mm (½ in) de altura, y cualquier ancho de espesores desde 3 mm (1/8 in) hasta 13 mm (1/2 in). La tolerancia dimensional será en el orden de ± 0.13 mm (0.0005 in) sobre la longitud de la probeta.

Nota 6- Los resultados de prueba obtenidos en una probeta de 13 mm de ancho pueden ser de 2 a 4 °C por encima de los obtenidos en las probetas de 4 mm de ancho, esto podría ser causado por una pobre transferencia de calor a través de la probeta.

2.9.2. La probeta deberá tener las superficies planas y suaves, libre de cortes, y marcas profundas etc.

2.9.3. Las condiciones de moldeo estarán en acuerdo con la especificación para este material o estarán de acuerdo con la cooperación de los laboratorios que realicen estas pruebas.

Las discrepancias en los resultados de prueba debidas a la variación en las condiciones de moldeo pueden ser minimizadas por un recocido a la probeta de prueba antes de ser sometida a la prueba. De los diferentes materiales requeridos, diferentes condiciones de recocido, los procedimientos de recocido deben de ser empleados solo si se requiere por el mismo material a someter a la prueba o por los procesos acordados en cooperación con los laboratorios que realicen estas pruebas.

2.10. Preparación de los aparatos.

Los aparatos deberán ser arreglados de modo que la deflexión de la probeta en el punto de pandeo sea registrado por el instrumento de medición descrito en 2.7.4. El aparato puede arreglarse para apagar el calor automáticamente y suene una alarma o registre la temperatura cuando la deflexión específica haya sido alcanzada. El líquido para la transferencia de calor debe cumplir con las características necesarias para ser usado en esta prueba y cubrir los termómetros hasta el punto especificado en su calibración, o a 76 mm (3 in) en el caso de los termómetros de la norma ASTM referidas en el punto 2.7.6.

Nota 7- Es deseable tener un medio de enfriamiento para el sistema para reducir la temperatura en el sistema después de que la prueba se haya completado. Este puede estar compuesto por un serpentín de refrigeración instalado en el sistema, o un sistema externo de transferencia de calor para que circule el aceite caliente a través de este. Si el rango del incremento de temperatura del aceite es afectado adversamente por la presencia de un refrigerante con residuos en el serpentín, el refrigerante debe ser purgado previamente para realizar la siguiente prueba.

2.11. Acondicionamiento.

2.11.1. Acondicionamiento- el acondicionamiento de la probeta debe ser a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^{\circ}\text{F}$) y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa no menor a 40 h. antes de la prueba de acuerdo con el procedimiento de la *Practica D 618*. A menos que se especifique lo contrario en el material a probar o por el contrato entre las partes interesadas de los laboratorios. En caso de

que haya algún desacuerdo, las tolerancias deberán de ser de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (1.8°F) y $\pm 2\%$ de humedad relativa.

Nota 8- Se pueden acortar los periodos de acondicionamiento y pueden ser usados cuando muestren que estos no afectan los resultados de esta prueba. Los periodos largos de acondicionamiento pueden ser requeridos para algunos materiales que tengan un continuo cambio en función del tiempo para observar si no hay deformaciones críticas.

2.12. Procedimiento.

2.12.1. Se debe medir la altura y el ancho de la probeta con un micrómetro adecuado (como se describe en 2.7.7.) en varios puntos a lo largo de su longitud. El promedio de sus respectivas lecturas son necesarias para obtener la altura y el ancho nominal de los valores de la probeta. Estos valores son usados para determinar la cantidad de fuerza aplicada necesaria para producir el esfuerzo a la tensión en cada probeta sometida a la prueba.

2.12.2. La posición de la probeta dentro del aparato será de canto y debe de asegurarse que esté apropiadamente alineada sobre los soportes así como en la dirección de la fuerza en la prueba la cual será perpendicular a la probeta.

2.12.3. El termómetro de bulbo o la parte sensitiva del aparato de medición de la temperatura debe ser posicionado tan cerca como sea posible a la probeta (aproximadamente 10 mm de distancia) sin tocarla.

2.12.4. Se debe de asegurar que la temperatura del líquido para la transferencia de calor es la adecuada. La temperatura del líquido debe de estar a temperatura ambiente en el inicio de la prueba a menos que previamente haya demostrado que, por el material en particular bajo la prueba, no se genera ningún error al empezar a elevar la temperatura.

2.12.5. Aplicar cuidadosamente la carga de la barra ejecutadora a la probeta y observar que el asentamiento sea correcto entre ambas partes.

2.12.6. Ajustar la carga hasta llegar al esfuerzo deseado de 0.455 MPa (66 psi) o 1.82 MPa (264 psi) sea obtenido.

Nota 9- la verificación de la carga debe ser hecha con un equipo nuevo después de reemplazar el instrumento de calibración, o siguiendo cualquier otro cambio que pudiera afectar la carga. La

verificación de la carga debe ser realizada periódicamente para asegurarse que el equipo esta dentro de los parámetros especificados dependiendo del tipo de aparato de medición usado para el registro de la deflexión, puede ser necesario ajustar el aparato de tal manera que registre la deflexión con una tolerancia de desplazamiento del aparato donde la prueba sea hecha.

2.12.7. Cinco minutos después de aplicar la carga, se debe de ajustar el aparato de medición de la deflexión de la probeta a cero o registrar la posición inicial. El calentamiento por medio del líquido de transferencia de calor estará en un rango de 2.0 ± 0.2 °C/min.

Nota 10- el periodo de espera de 5 minutos se proporciona para compensar parcialmente el deslizamiento exhibido por algunos materiales a la temperatura ambiente en el laboratorio cuando sea sometido a la tensión nominal especificada en la superficie. La parte del deslizamiento que ocurra en los 5 minutos iniciales es por lo general una fracción muy significativa de lo que va a ocurrir en los primeros 30 minutos.

2.12.8. Se debe de registrar la temperatura del líquido de transferencia de calor en la cual la probeta ha obtenido la deflexión específica bajo un esfuerzo a través de la carga.

Nota 11-Se deben de hacer continuamente las lecturas de deflexión contra la temperatura incluso más allá de la deflexión estándar ya que esto podría ser útil en situaciones especiales.

2.13. Reporte.

2.13.1. Reportar la siguiente información:

2.13.2. Una completa identificación del material de prueba,

2.13.3. Preparación del método de prueba de la probeta,

2.13.4. Procesos para el acondicionamiento,

2.13.5. La altura y el ancho de la probeta, para que mida una deflexión de 0.025 mm,

2.13.6. La deflexión estándar, la deflexión de la temperatura, y el correspondiente esfuerzo a la tensión de cada probeta,

2.13.7. El medio de inmersión, la temperatura inicial de la prueba, y el actual rango de calor,

2.13.8. La temperatura promedio de la deflexión de la probeta,

2.13.9. Ante cualquier característica atípica observada en la probeta durante la prueba, ésta debe de retirarse del aparato, (tal como torceduras, flexión no uniforme, decoloración, y expansión), y

2.13.10. Especificar el tipo de prueba, automática o manual.

2.14. Precisión y descentramiento.

2.14.1. La *precisión*- En un programa de prueba Inter laboratorios que se llevó a cabo con la participación de 7 laboratorios utilizando ambos instrumentos manuales y automáticos. Cuatro polímeros fueron incluidos en este programa. La información estadística se resume a continuación en la tabla 2.1

Polímero.	Valor Promedio ^B	Desviación Standard	Diferencia Crítica ^C , dentro de Laboratorios	Diferencia Crítica, entre de Laboratorios
Polietileno, 0.45MPa.	85.3	4.8	6.0	9.4
Policarbonato, 0.455 MPa	142.0	2.0	2.3	3.9
Metil Metacrilato, 1.82 MPa	97.6	2.9	4.0	5.7
Polisulfona, 1.82 MPa	173.8	2.8	2.3	5.5

^A Todos los valores dados en °C

^B Promedio de pares.

^C Valores entre pares.

CAPÍTULO 3.

APLICACIÓN DEL FLUJO TERMOSIFÓNICO EN EL EQUIPO DE MEDICIÓN.

3.1. Efecto termosifón.

El principio del efecto termosifón se debe a que, cuando el fluido al calentarse sufre un desplazamiento vertical y hacia arriba basado en la disminución de la densidad con el aumento de temperatura. Esto provoca, que el fluido contenido en un depósito se encuentre estratificado, ocupando las posiciones más altas, las de mayor energía o temperatura.

La idea fundamental del flujo termosifónico consiste en tomar el fluido contenido en la parte inferior del depósito (el más frío), y hacerlo circular a través de la probeta y el material aislante para elevar su temperatura y devolverla de nuevo a la parte superior del depósito (la más caliente), de esta forma vamos incrementando la temperatura del fluido frío a caliente, lo cual es nuestro objetivo. El mismo depósito sirve de acumulador para disponer de un fluido caliente en los periodos de baja o nula radiación.

El concepto básico de flujo termosifónico es: un flujo al movimiento de un fluido, es decir, más concretamente un flujo termosifónico es el movimiento o desplazamiento de un fluido (aceite en este caso) basado en la existencia de un gradiente de densidad. El efecto global es una fuerza de flotación que provoca corrientes convectivas, siendo el caso más común cuando el gradiente de densidad se debe a un gradiente de temperatura y la fuerza de cuerpo proviene de un campo gravitacional.

Se puede ejemplificar lo anterior dando una explicación breve de lo que se supone ocurre en el prototipo del instrumento de medición para registrar la temperatura de deflexión. Esto consta principalmente de un recipiente de material con un coeficiente de transferencia de calor relativamente bajo, una resistencia eléctrica, aceite sintético para transferencia de calor, dos placas de material aislante térmico, probeta, soportes y barra ejecutadora de carga.

La manera en la que se propone se logrará la homogenización del medio será por medio de un flujo termosifónico. La resistencia eléctrica que cubre la mitad de la base del recipiente sirve como fuente de energía calorífica (transferencia de calor por convección principalmente) de

manera que aumenta la temperatura en la mitad del aceite contenido en el recipiente, esta mitad se diferencia por la probeta en posición de canto y dos placas de material aislante coplanares a la probeta.

Una vez que se empieza a elevar la temperatura del aceite que esta en contacto directo con la resistencia tiende a subir por tener una densidad menor y ahora el aceite con densidad mayor que se encontraba en la parte superior baja por convección, una vez que se logra el equilibrio térmico entre la resistencia, parte del aceite que ese encuentra en la mitad donde se aloja la fuente de energía calorífica y parte de la estructura del contenedor en ese momento se hace presente la importancia de la probeta y las placas de material aislante térmico, estas placas tienen la finalidad de dirigir las líneas convectivas (línea de corriente) de tal manera que tomen una dirección de forma vertical y cíclica.

El flujo termosifónico se hace presente cuando bajo el principio de la Ley Cero de la Termodinámica, la parte caliente atrae al aceite con menor temperatura creando un efecto sifón o de depresión de tal manera que ahora el aceite que se encuentra a la misma temperatura de la resistencia eléctrica brinca a la mitad donde no existe ninguna fuente de calor y por otra parte el aceite que se encontraba en esa mitad con una temperatura mucho menor pasa a la mitad donde se encuentra la fuente calorífica de esta manera y con lapsos de tiempo razonables (según *Norma D-648 98 c*) es como obtendremos la homogenización de temperatura.

3.2. Densidad.

La densidad puede obtenerse de forma indirecta y de forma directa. Para la obtención indirecta de la densidad, se miden la masa y el volumen por separado y posteriormente se calcula la densidad. La masa se mide habitualmente con una balanza, mientras que el volumen puede medirse determinando la forma del objeto y midiendo las dimensiones apropiadas o mediante el desplazamiento de un líquido, entre otros métodos.

Entre los instrumentos más comunes para la medida de densidades tenemos:

- El densímetro, que permite la medida directa de la densidad de un líquido.
- El picnómetro, es un aparato que permite la medida precisa de la densidad de sólidos, líquidos y gases.

- La balanza de Mohr es una variante de balanza hidrostática que permite la medida precisa de la densidad de líquidos.



Figura. 3.1. Picnómetro.

También podemos definir a la densidad como la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia. Por tanto se puede denotar a la densidad como sigue:

$$\rho = m/V \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde (V) es el volumen de la sustancia que tiene la masa (m). Las unidades de la densidad son kilogramos por metro cúbico en el sistema internacional.

3.3. Características principales de los aceites.

3.3.1 Viscosidad.

La viscosidad es por mucho la propiedad más importante de los aceites. Se define como la resistencia de todo fluido a fluir, o en forma más simple, como su espesor, por tanto, si un aceite tiene una viscosidad baja este fluye rápidamente, en tanto que si su viscosidad es alta el aceite fluye lentamente.

La viscosidad de los aceites es afectada por la temperatura. A medida que la temperatura de un aceite aumenta, su viscosidad disminuye, es decir, se vuelve más delgado. Por el contrario, cuando su temperatura disminuye la viscosidad aumenta, es decir, se vuelve más grueso.

$$\text{Viscosidad} = \frac{\text{Fuerza de corte (unitaria)}}{\text{regimen de corte}} \text{ a una temperatura especificada} \dots\dots\dots(3.2)$$

Al seleccionar un aceite deberá tenerse en cuenta la temperatura ambiental y de operación del lugar en que se va a trabajar.

3.3.2. Como se mide la viscosidad.

Existen varios dispositivos para medir la viscosidad y casi todos se basan en la medida del tiempo necesario para que una determinada cantidad de aceite a una temperatura definida fluya a través de un orificio o tubo capilar. Entre los viscosímetros más empleados se encuentra el viscosímetro de Saybolt, el cinemático, también llamado de Ostwald modificado, el Reewood y el Engler. Ver figura 3.2.



Figura 3.2. Viscosímetro de Saybolt y Viscosímetro de Ostwald.

3.3.3. Punto de Inflamación.

Es la temperatura a la cual los aceites despiden vapores que se incendian momentáneamente cuando se exponen a una flama. Si el aceite se sigue calentando va a llegar un momento en el cual el aceite no solo se inflama, sino que continúa quemándose, a esta temperatura se le llama temperatura de incendio.

3.3.4. Resistencia a la oxidación.

Cuando un aceite se expone al contacto del aire, se combina con el oxigeno en un proceso conocido como oxidación, otra de las propiedades básicas de los aceites. El proceso de oxidación de los aceites se acelera cuando estos se someten a agitación y altas temperaturas. La Tabla 3.1 resume toda la información dada anteriormente.

Tabla 3.1. Propiedades físicas de los aceites.

ACEITES.			
Viscosidad.	Resistencia interna al movimiento; grado de consistencia.		
Índice de Viscosidad.	Cambio relativo de viscosidad con las variaciones de temperatura.		
Gravedad Específica.	Medida de la Densidad (peso).		
*API	Debajo de 10°	10° API	Arriba de 10°
	Más pesado que el agua.	Gravedad específica de 1.0	Más ligero que el agua.
Punto de Inflamación.	Medida de la volatilidad; la menor temperatura a la que puede inflamarse el vapor.		
Punto de Ignición.	Temperatura mínima para una ignición sostenida.		
Punto de Fluidez	Temperatura mínima a la que fluye el aceite por gravedad.		
Color.			
Residuo de Carbón.	Residuo sólido resultante de una destilación destructiva.		

3.4. Ficha técnica del aceite *Paratherm LR* para transferencia de calor.

Paratherm LR™ es un fluido de transferencia térmica clasificado de gama baja para un servicio de -40°F a 400°F (-40°C a 204°C). Este fluido no es tóxico, ni aromático y es muy seguro de utilizar y fácil de desechar.

Resistente y durable, el fluido Paratherm LR ha sido diseñado para una amplia variedad de aplicaciones en las que se requiera de enfriamiento y calentamiento, como por ejemplo en la industria farmacéutica, química, etc.

Para industrias de procesos continuos. LR proporciona un excelente y prolongado desempeño, siendo un producto seguro y fácil de manejar aún bajo las más exigentes condiciones.

Seguridad ambiental.

El fluido LR es amigable en planta y seguro de usar. Este fluido cristal claro no contiene sustancias tales como hidrocarburos tratados con cloro, aromatizantes, metales pesados o compuestos de sulfuro o nitrógeno.

Toxicidad del fluido.

El fluido Paratherm LR no es tóxico. A diferencia de otros fluidos utilizados para calor/frío, LR no emite ningún olor acre o nocivo. Antes de utilizar el aceite Paratherm LR, se recomienda leer las hojas de seguridad.

Desechar el fluido térmico.

Los fluidos de transferencia térmica de Paratherm LR se producen a base de materias primas naturales, por lo cual son excepcionalmente seguros de utilizar y fáciles de desechar. Ya usados o contaminados, los fluidos de Paratherm pueden ser combinados de manera segura con aceites lubricantes gastados y ser reciclados. Paratherm sugiere e insiste en el reciclaje del fluido de transferencia térmica usado, con el objetivo primordial de conservar los recursos naturales y minimizar el problema de su disposición en rellenos sanitarios. A este respecto se sugiere la verificación de las regulaciones federales, estatales y locales.

Análisis del fluido.

El recalentamiento, la oxidación y la contaminación del fluido de transferencia térmica pueden reducir significativamente su rendimiento en el proceso. La calidad del producto puede sufrir y en casos severos pueden presentarse daños en el sistema. Mediante el análisis periódico del fluido se pueden detectar problemas en las primeras etapas lo cual puede resultar en ahorros considerables.

Control de calidad.

Cada lote de fluido térmico producido es cuidadosamente analizado, para asegurarnos que se ajusta perfectamente a las especificaciones de calidad del producto. Cada despacho de producto se compara con la muestra patrón, cuyos resultados han sido archivados en Paratherm Corporation. **Propiedades Típicas***

Tabla 3.2. Propiedades Físicas.

Propiedades típicas*	
Nombre químico.	Hidrocarburos parafínicos.
Apariencia.	Líquido agua blanca.
Olor.	Inodoro.
Temperatura máxima recomendada de película.	550 ° F/288 ° C
Se recomienda un máximo de temperatura de funcionamiento.	480 ° F/249 ° C
Temperatura mínima de funcionamiento. 20 cPs (20 mPa-s)	-57 ° C ° F/-49 ° C
Mínimo de puesta en marcha de la temperatura. 300 cps (300 mPa-s)	-112 ° C ° F/-80 ° C
Viscosidad a 60 ° C F/15.5 ° cSt (mm ² /sec)	2,4
Densidad a 60 ° C F/15.5 ° libras / galón (Kg./m ³)	6.4 (766)
Etiqueta del punto de inflamación de Flama (D56)	> 130 ° F/54 ° C
Temperatura de auto ignición (máximo 10 seg. de retardo de la ignición)	> 500 ° F/260 ° C
Presión de vapor @ temperatura máxima de 450 ° F/232 ° C psia (kPa)	21 (145)
Promedio del volumen de expansión,% / 100 ° F (100 ° C)	6,8 (12,2)
Peso molecular promedio	160
Desglose de tensión dieléctrica D1816-04 (kV, 0,1 " gap)	22.15
La constante dieléctrica (1 Khz.) D924-04	2,03
Factor de disipación (1 Khz.) D924-04	0.00001
El calor de la combustión (aproximado) BTU / lb. (kJ / Kg.)	20.000 (46.300)
El calor de vaporización (aproximado) BTU / lb. (kJ / Kg.)	113 (262)
Punto de fluidez D97	<-75 ° C ° F/-59 ° C

* Estos son valores típicos de laboratorio, y no están garantizados para todas las muestras.

3.5. Cálculo de la Densidad del Aceite Paratherm LR para transferencia de calor.

De las especificaciones técnicas del aceite sabemos que su gravedad específica a 25°C es igual 0.794 de tal manera que:

$$\text{Gravedad específica a } 25^\circ\text{C} = 0.794 = \gamma_{\text{aceite LR}} / \gamma_{\text{agua}}$$

Sabemos que $\gamma_{\text{aceite LR}} = \rho_{\text{aceite LR}} * \text{constante gravitacional}$

Sustituyendo en la primera ecuación

$$Sg \text{ a } 25^\circ\text{C} = 0.794 = (\rho_{\text{aceite LR}} * \text{constante gravitacional}) / \gamma_{\text{agua}}$$

Despejamos la densidad del aceite LR

$$\rho_{\text{Aceite LR}} = (0.794) (\gamma_{\text{agua}}) / \text{cte. Gravitacional}$$

Sustituyendo valores y unidades

$$\rho_{\text{Aceite LR}} = (0.794) (9810 \text{ N/m}^3) / 9.81 \text{ m/s}^2 = \mathbf{794 \text{ Kg. /m}^3}$$

$$\gamma_{\text{Aceite LR}} = (794 \text{ Kg. /m}^3) (9.81 \text{ m/s}^2) = \mathbf{7,789.14 \text{ N/m}^3}$$

Lo relevante de este análisis es predecir el comportamiento de la probeta dentro del fluido.

La densidad mínima de los polímeros la presenta el Polipropileno $\rho_{\text{polipropileno}} = 905 \text{ Kg. /m}^3$, de esta manera se asegura que la probeta de cualquier tipo de polímero se sumerja en el aceite, teniendo un valor muy insignificante de la fuerza boyante.

3.5.1. Definición de Presión Hidrostática.

Un fluido pesa y ejerce presión sobre las paredes, sobre el fondo del recipiente que lo contiene y sobre la superficie de cualquier objeto sumergido en él. Esta presión, llamada presión hidrostática, provoca, en fluidos en reposo, una fuerza perpendicular a las paredes del recipiente o a la superficie del objeto sumergido sin importar la orientación que adopten las caras. Si el líquido fluyera, las fuerzas resultantes de las presiones ya no serían necesariamente perpendiculares a las superficies. Esta presión depende de la densidad del líquido en cuestión y de la altura a la que esté sumergido el cuerpo y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\boxed{P = \rho gh + P_0} \dots\dots\dots (3.3)$$

Donde, usando unidades del SI,

- P es la presión hidrostática (en Pascales)
- ρ es la densidad del líquido (en kilogramos sobre metro cúbico)
- g es la aceleración de la gravedad (en metros sobre segundo al cuadrado)
- h es la altura del fluido (en metros). Un líquido en equilibrio ejerce fuerzas perpendiculares sobre cualquier superficie sumergida en su interior.
- P_0 es la presión atmosférica.

3.5.2. Calculo de la Fuerza Resultante en la Probeta y la Presión Hidrostática.

Para comprender de manera sencilla las fuerzas que actúan en el centroide de la probeta se realiza un diagrama de cuerpo libre (DCL).

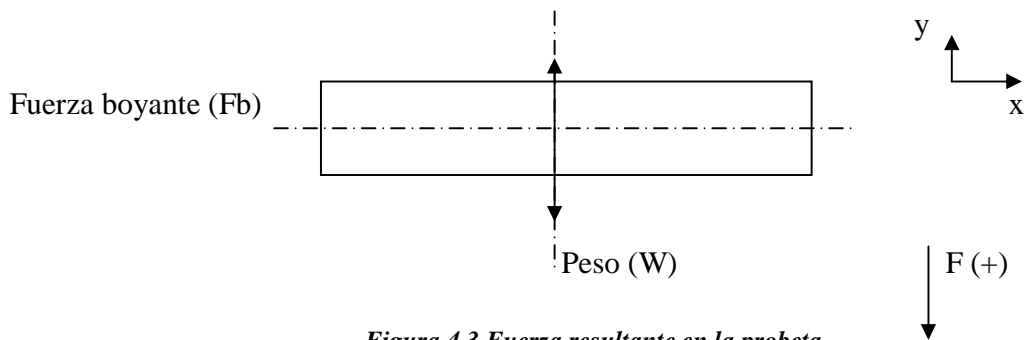


Figura 4.3 Fuerza resultante en la probeta.

Supóngase que la probeta esta construida de plástico PET.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = W - F_b$$

Donde la fuerza boyante (bajo el Principio de Arquímedes, dice que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado) es igual a:

$$F_b = \gamma_{\text{aceite LR}} * \text{Volumen}_{\text{desplazado}}$$

Nota: El volumen desplazado es igual al volumen de la probeta.

Sustituyendo valores y unidades se tiene:

$$F_b = (7,789.14 \text{ N/m}^3) ((127 \times 10^{-3} \text{ m}) (3 \times 10^{-3} \text{ m}) (13 \times 10^{-3} \text{ m}))$$

$$F_b = 0.03858 \text{ N} = 0.003933 \text{ kg}_f$$

Donde el peso es igual a:

$$W = \gamma_{\text{PET}} * \text{Volumen}_{\text{probeta}}$$

Sustituyendo valores y unidades tenemos:

$$W = (13,341.60 \text{ N/m}^3) ((127 \times 10^{-3} \text{ m}) (3 \times 10^{-3} \text{ m}) (13 \times 10^{-3} \text{ m}))$$

$$W = 0.066081 \text{ N} = 0.006736 \text{ kg}_f$$

$$\therefore \Sigma F_y = W - F_b = 0.006736 \text{ kg}_f - 0.003943 \text{ kg}_f = \mathbf{0.002803 \text{ kg}_f}$$

Nota: El análisis de la fuerza resultante que se realizó para una probeta de PET se puede realizar para cualquier polímero.

La presión hidrostática se define como la presión que ejerce el fluido sobre un cuerpo que se encuentra en él. Depende del medio y de la altura que se encuentre sumergido.

$$\text{La Presión Hidrostática} = P_h = \gamma_{\text{aceite LR}} * h$$

En el prototipo la probeta estará sumergida una altura $h = 43.5 \text{ mm} = 0.0435 \text{ m}$

$$\therefore P_h = (7,789.14 \text{ N/m}^3) (0.0435 \text{ m}) = 338.828 \text{ N/m}^2 = \mathbf{338.828 \text{ Pa}}$$

Esta presión tiene poco efecto sobre la fuerza resultante que actúa sobre la probeta ya que si se calcula la fuerza con la que actúa en cada superficie de la muestra las fuerzas se anularían ya que se trata de un prisma simétrico.

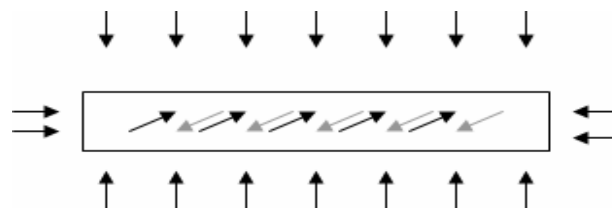


Figura 3.4. Presión hidrostática en la probeta.

CAPÍTULO 4.

TRANSFERENCIA DE CALOR.

4.1. Introducción.

La energía es una propiedad que no se puede determinar directamente; solo a través de sus efectos, entre ellos el valor que toma la temperatura del sistema bajo consideración, es posible medirla o cuantificarla. La energía de un cuerpo se puede transmitir a otro mediante el desarrollo de un *trabajo* o bien, en forma de *calor*, cuando existe una diferencia de temperaturas entre ellos como se sabe, a la realización de cualquiera de los dos efectos esta sujeta a las leyes de la termodinámica. Podría pensarse entonces que bastaría considerar los principios, los métodos y los resultados que esta ciencia ofrece para poder analizar los diversos problemas relacionados con la transmisión de calor.

Sin embargo, conviene recordar que la termodinámica estudia los sistemas en *equilibrio* y es muy útil cuando se trata específicamente de determinar la energía necesaria para pasar de un estado de equilibrio a otro; no se le puede emplear para cuantificar que tan *rápido* se efectúa el cambio. Tal es el objetivo fundamental de la *transferencia de calor*. La diferencia fundamental entre ambas disciplinas consiste efectivamente, en la consideración de la variable *tiempo*.

La transferencia de calor se dedica al estudio de los aspectos como la rapidez la interacción y de que manera se transmite el calor, así ampliando el análisis termodinámico en sus diferentes modos de transferencia de calor y por medio del desarrollo de relaciones matemáticas para calcular velocidades de transferencia de calor, en pocas palabras la transferencia de calor es: “*la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas*” siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe de transcurrir una transferencia de calor y aquí trataremos solo el análisis de transferencia de calor por **convección** es decir; la transferencia de calor que se producirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas.

Se utiliza el termino “convección” para describir la transferencia de energía entre una superficie y un fluido que se mueve sobre esta. Aunque el mecanismo de difusión contribuye a esta transferencia, generalmente la aportación dominante es la del movimiento global o total de las partículas del fluido. En este tratamiento nuestros objetivos serán, además de comprender los

mecanismos físicos que fundamentan la transferencia por convección, deseamos desarrollar los medios para llevar los cálculos de transferencia por convección.

En particular, se realiza un esfuerzo para concentrar en un lugar muchos de los fundamentos. Se discuten los orígenes físicos y se desarrollan los parámetros adimensionales relevantes así como analogías importantes.

4.2. Convección.

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al *movimiento molecular aleatorio*, la energía también se transfiere mediante el *movimiento global o microscópico* del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven en forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido, se acostumbra a utilizar el término convección cuando se hace referencia a este transporte acumulado.

La transmisión por *convección*, entre un cuerpo sólido y un fluido en movimiento a temperatura diferente, constituye un mecanismo más complejo. Primeramente las partículas de fluido en contacto inmediato con la superficie sólida aumentan o disminuyen su energía (dependiendo de cual de los dos cuerpos tenga mayor temperatura) mediante el mecanismo de conducción de calor. Estos elementos, con su energía interna modificada, se mueven hacia regiones de temperatura diferentes, dejando en su lugar a otras partículas, que a su vez tomarán o cederán energía en la superficie sólida.

El modo de transferencia de calor por convección se sustenta tanto en el movimiento molecular aleatorio como en el movimiento volumétrico del fluido. La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo.

Finalmente, las primeras partículas del fluido, al llegar a regiones de diferente temperatura, se mezclan. Como es de suponerse, además de las propiedades físicas tanto del sólido como del fluido, es necesario tomar en cuenta la naturaleza del movimiento. Aspectos tales como la

velocidad del fluido, la rugosidad de la superficie y la capacidad de mezclado del escurrimiento (la cual depende del régimen del flujo, laminar o turbulento) juegan un papel importante en la transferencia de calor por convección.

4.2.1. Convección libre o natural.

El origen de la convección libre o natural se origina cuando una fuerza de cuerpo ejerce su acción en un fluido donde existe un *gradiente de densidad*. Es la diferencia de densidades en el fluido, generalmente asociada a una diferencia de temperaturas, se trata de una fuerza de flotación que provoca corrientes convectivas y se debe a un gradiente de temperatura y la fuerza del cuerpo proveniente de un campo gravitacional. Induciendo al fluido a moverse sin que exista un agente externo para ello. La densidad entonces constituye una variable de campo, y al igual que la temperatura, la velocidad y la presión, puede cambiar de un punto a otro. Siendo las velocidades de convección mas pequeñas en relación a un flujo convectivo forzado.

Como las velocidades de flujo de convección libre son por lo general mucho mas pequeñas que las que se asocian con la convección forzada, las transferencias de calor por convección correspondientes son mas pequeñas, la convección libre proporciona la mayor resistencia a la transferencia de calor y por lo tanto juega un papel importante en el diseño o funcionamiento del sistema.

Nota 1: la existencia de un gradiente de temperaturas en el fluido origina diferencias en su densidad que, en presencia del campo gravitacional, hace que el fluido se mueva por un efecto de flotación.

Nota 2: debido al diferencial de densidad, se obtiene una fuerza de flotación resultante, provocando que el fluido mas ligero se eleve o reemplace otra cantidad del fluido mas frío, repitiéndose continuamente este proceso quedando establecido por fuerzas naturales, y a este tipo de convección se le llama convección natural o libre.

El flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido. Regida por la siguiente formula:

$$\boxed{q'' = h(T_s - T_\infty)} \dots\dots(4.1)$$

Donde (q'') es el flujo de calor por convección (W/m^2), es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido $T_s - T_\infty$, respectivamente. Esta expresión se conoce como la *ley de enfriamiento de Newton* y la constante de proporcionalidad h (w/m^2-K) se denomina *coeficiente de transferencia de calor por convección* este depende de la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y del transporte. Es decir; todo se reduce a un estudio de los medios por lo que es posible determinar h .

Usando la ecuación anterior se supone que el flujo de calor por convección es positivo si el calor se transfiere desde la superficie ($T_s > T_\infty$) y negativo si el calor se transfiere hacia la superficie ($T_\infty > T_s$). Sin embargo, si $T_\infty > T_s$, no hay nada que impida expresar la ley de Newton como:

$$q'' = h(T_\infty - T_s) \dots (4.2)$$

Calor por convección negativo.

En cuyo caso la transferencia de calor es positiva si es a la superficie. Ver figura 4.1.

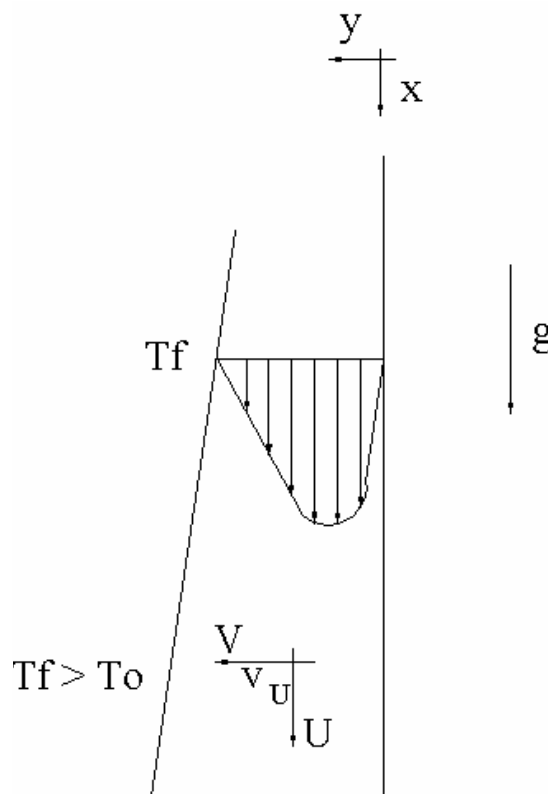


Figura 4.1. Convección libre en una pared vertical; pared mas fría que el fluido.

4.2.2. Consideraciones Físicas.

En la convección libre, el movimiento del fluido se debe a las fuerzas de empuje dentro de este. *El empuje se debe a la presencia combinada de un gradiente de densidad del fluido y una fuerza de cuerpo que es proporcional a la densidad.*

En los problemas de convección libre el gradiente de densidad se debe a un gradiente de temperatura y en los que la fuerza de cuerpo es gravitacional. Los flujos por convección libre se pueden clasificar de acuerdo a si el flujo esta limitado por una superficie. En ausencia de una superficie contigua, los flujos de frontera libre pueden ocurrir en forma de un penacho o chorro ascendente.

Un penacho se asocia con la elevación de un fluido desde un objeto caliente sumergido aunque el ancho del penacho aumenta con la distancia del elemento calefactor, el penacho mismo finalmente se disipa como resultado de los efectos viscosos y de una reducción en la fuerza de empuje ocasionada por el enfriamiento del fluido en el penacho.

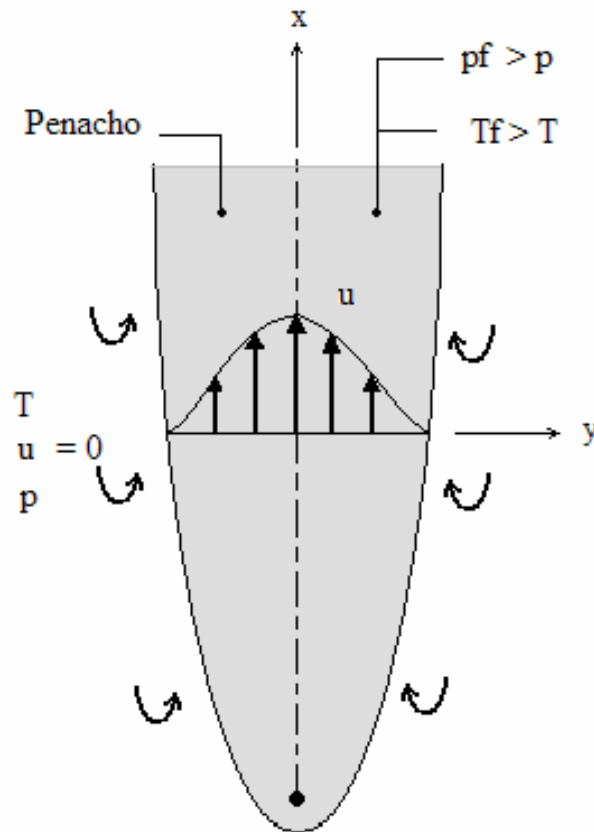


Figura 4.2. Formación de penacho sobre un alambre caliente.

4.2.3. Flujo laminar.

Es uno de los dos tipos principales de flujo en fluidos. Se llama **flujo laminar** o **corriente laminar**, al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos, o en capas cilíndricas coaxiales.

Los términos flujo laminar y flujo viscoso generalmente se usan de manera indistinta para dar a entender el movimiento de un fluido en laminas o capas mas o menos paralelas, a diferencia de un flujo turbulento el cual se mueve de forma desordenada e irregular. Lo que sucede en realidad es que tanto las características dinámicas como las geométricas del escurrimiento son las que determinan si se trata de un flujo laminar o turbulento.

De manera mas específica, es la relación entre las fuerzas debidas a la viscosidad y las fuerzas debidas al movimiento o de inercia, expresada a través del conocido *número de Reynolds*, la ecuación que resume el comportamiento del fluido como laminar o turbulento es:

$$\boxed{Re = \frac{\rho V L}{\mu}} \dots\dots(4.3)$$

Donde ρ , μ y V son respectivamente la densidad, la viscosidad dinámica, y la velocidad del fluido y L es una longitud característica de la geometría del sistema, la cual permite especificar, basándose en los resultados experimentales, la transición del régimen laminar.

4.2.4. El número de Reynolds.

El comportamiento de un fluido, en particular en lo que se refiere a las perdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Por esta razón, se necesita un medio para predecir el tipo de flujo sin tener que observarlo en realidad. Mas aún, la observación directa es imposible para fluidos que van por secciones opacas, se demuestra en forma experimental y se verifica de un modo analítico, que este carácter depende de cuatro variables: la densidad del fluido ρ , su viscosidad η , el diámetro del tubo D y la velocidad promedio del flujo V . Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que es posible pronosticar el flujo laminar o turbulento si se conoce la magnitud de un número adimensional, al que hoy se le denomina número de Reynolds (N_R).

Este es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, para diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

Como todo número adimensional es un cociente, en una comparación. En este caso es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos.

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa. La fuerza de inercia se desarrolla a partir de la segunda ley del movimiento de Newton.

Aquellos fluidos con viscosidad alta y/o que se mueven a velocidades bajas, tendrán números de Reynolds bajos y tenderán a comportarse en forma laminar.

La ecuación para calcular el número de Reynolds adopta una forma diferente para secciones transversales que no sean circulares, canales abiertos y el flujo alrededor de cuerpos sumergidos.

✓ Para valores de $Re \leq 2,100$ el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por laminas delgadas, que interactúan sólo en base a esfuerzos tangenciales, por eso a este flujo se le llama flujo laminar. El colorante introducido en el flujo se mueve siguiendo una delgada línea paralela a las paredes del tubo.

✓ Para valores de $2,100 \leq Re \leq 4,000$ la línea del colorante pierde estabilidad formando pequeñas ondulaciones variables en el tiempo, manteniéndose sin embargo delgada. Este régimen se denomina de transición.

✓ Para valores de $Re \geq 4,000$, después de un pequeño tramo inicial con oscilaciones variables, el colorante tiende a difundirse en todo el flujo. Este régimen es llamado turbulento, es decir caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

Consideraremos para nuestro caso que, cuando el número de Reynolds es menor a 2,100 se dice que el flujo es laminar. En el flujo laminar, todas las partículas del fluido se desplazan en trayectorias paralelas en dirección del flujo. En el caso del flujo laminar, la transferencia de calor del fluido a la tubería, o viceversa, incluyendo sistemas en donde se apliquen flujos de pared vertical, la cual se realiza sustancialmente por conducción a través de la delgada capa superficial, que tiene muy poco o ningún movimiento.

El número de Reynolds se puede considerar como un parámetro representativo del cociente de las fuerzas de inercia entre las fuerzas asociadas a la viscosidad, de tal manera que su valor permite conocer la influencia relativa de estos tipos de efectos.

4.3 Significado físico de los parámetros adimensionales.

4.3.1. Número de Reynolds.

La interpretación física del número de Reynolds esta en relación con las condiciones de la capa límite, el cual se interpreta como la *razón de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas* en la capa límite hidrodinámica. Para un volumen de control diferencial en esta capa límite, las fuerzas de inercia se asocian con un aumento del flujo que se mueve a través del volumen de control.

Recuerde que el número de Reynolds determina la existencia de flujo laminar o turbulento. Para números de Reynolds pequeños, las fuerzas viscosas son suficientemente grandes con relación a las fuerzas de inercia para evitar esta amplificación, es decir, por ello se mantiene el flujo laminar.

4.3.2. Número de Prandtl.

La interpretación física del número de Prandtl se sigue de su definición como una razón de la difusividad del momento (ν) a la difusividad térmica (α). El número de Prandtl proporciona *una medida de la efectividad relativa del transporte del momento y energía por difusión en las capas límite hidrodinámica y térmica* respectivamente.

$$\boxed{Pr = \nu/\alpha} \dots\dots\dots(4.4)$$

Para los aceites $Pr. \gg 1$. De esta interpretación se sigue que el valor de $Pr.$ influye fuertemente en el crecimiento relativo de las capas límite hidrodinámica y térmica. De hecho, para capas límite laminares es razonable esperar que

$$\boxed{\delta / \delta_t \approx Pr^n} \dots\dots\dots(4.5)$$

4.3.3. Número de Schmidt.

El número de Schmidt proporciona una medida de la efectividad relativa del transporte del momento y masa por difusión en las capas límite hidrodinámica y de concentración, respectivamente.

$$\boxed{Sc \equiv \frac{v}{D_{AB}}} \dots\dots\dots(4.6)$$

4.3.4. Número de Grashof.

El número de Grashof proporciona una medida de *la razón de las fuerzas de empuje a las fuerzas viscosas en la capa límite hidrodinámica*. Su papel en la convección libre es, con mucho, el mismo que tiene el número de Reynolds en la convección forzada.

$$\boxed{Gr_{RL} = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2}} \dots\dots\dots(4.7)$$

4.3.5. Número de Nusselt.

El número de Nusselt se define en términos de la conductividad térmica del fluido, es decir, es *el gradiente de temperatura adimensional en la superficie*.

$$\boxed{Nu = \frac{h L}{k}} \dots\dots\dots(4.8)$$

4.3.6. Número de Rayleigh.

Es la transición en una capa límite de convección libre depende de la magnitud relativa de las fuerzas de empuje y viscosas en el fluido. El cual se obtiene con el producto de los números de Grashof y Prandtl.

$$\boxed{Ra_{AL} = Gr_{RL} \cdot Pr} \dots\dots\dots(4.9)$$

CAPÍTULO 5.

ANÁLISIS TÉRMICO EN UN EQUIPO DE PRUEBA PARA MEDIR LA TEMPERATURA DE DEFLEXIÓN DE UN PLÁSTICO.

5.1. Introducción.

El término “*convección*” se utiliza para describir la transferencia de energía entre una superficie y un fluido que se mueve sobre esta. Aunque el mecanismo de difusión contribuye a esta transferencia, generalmente la aportación dominante es la del movimiento global o total de las partículas del fluido.

En el estudio de la convección tenemos dos objetivos principales. Además de comprender los mecanismos físicos que fundamentan la transferencia por convección, deseamos desarrollar los medios para llevar a cabo los cálculos de transferencia de calor por convección.

En este capítulo concentraremos nuestra atención en el problema de calcular la transferencia de calor, en este flujo las capas límite se producen libremente, sin restricciones impuestas por las superficies contiguas. En consecuencia, siempre existe una región del flujo fuera de la capa límite en que los gradientes de velocidad, temperatura y/o concentración son despreciables.

El objetivo principal es determinar los coeficientes de convección para diferentes geometrías de flujo, es decir, formas específicas de las funciones que representan estos coeficientes.

5.2. Metodología para un cálculo de convección.

1. *Conocer de inmediato la geometría del flujo.* La forma física de la correlación de convección depende de geometrías como placa plana, esfera o cilindro, por supuesto, de la geometría.
2. *Especificar la temperatura de referencia apropiada y evaluar las propiedades del fluido pertinentes a esa temperatura.* Para diferencias moderadas de temperatura de la capa límite, puede usarse la temperatura de película, con este propósito. Sin embargo, consideraremos correlaciones que requieren la evaluación de las propiedades a la temperatura de la corriente

libre e incluyen una variación de las propiedades para explicar el efecto de propiedad no constante.

3. *Calcular el número de Reynolds.* Las condiciones de la capa límite están fuertemente influenciadas por este parámetro. Si la geometría es una placa plana en un flujo paralelo, determinar si el flujo es laminar o turbulento.

4. *Decidir si se requiere un coeficiente local o promedio en la superficie.* Recuerde que, para una temperatura superficial o densidad de vapor constante, el coeficiente local se usa para determinar el flujo en un punto particular sobre la superficie, mientras que el coeficiente promedio determina la transferencia para toda la superficie.

5.3. Memoria de cálculo para el análisis térmico.

Para realizar la memoria de cálculo del análisis térmico, se ha propuesto el modelo mostrado en la figura 5.1 en base a las especificaciones de la Norma *ASTM 648 98 c* con las correspondientes dimensiones propuestas para el desarrollo de transferencia de calor mostrándose en la figura 5.2. Un modelo en 3D del mismo.

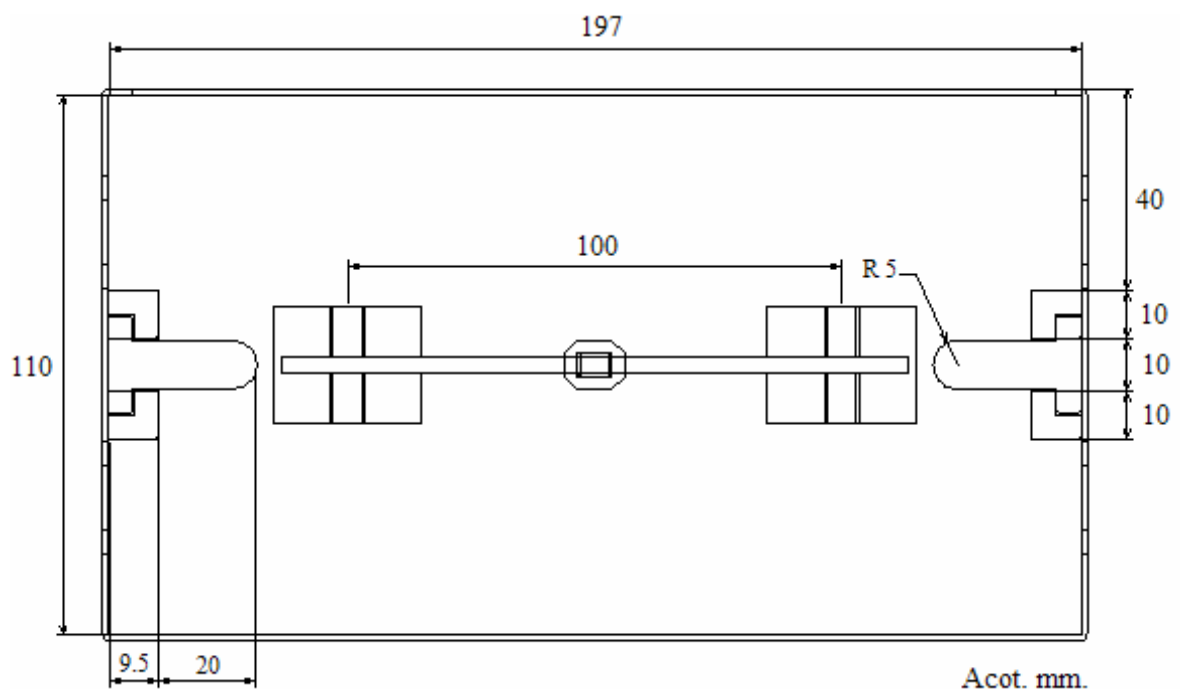


Figura 5.1. Vista superior del aparato de medición para la deflexión de polímeros.

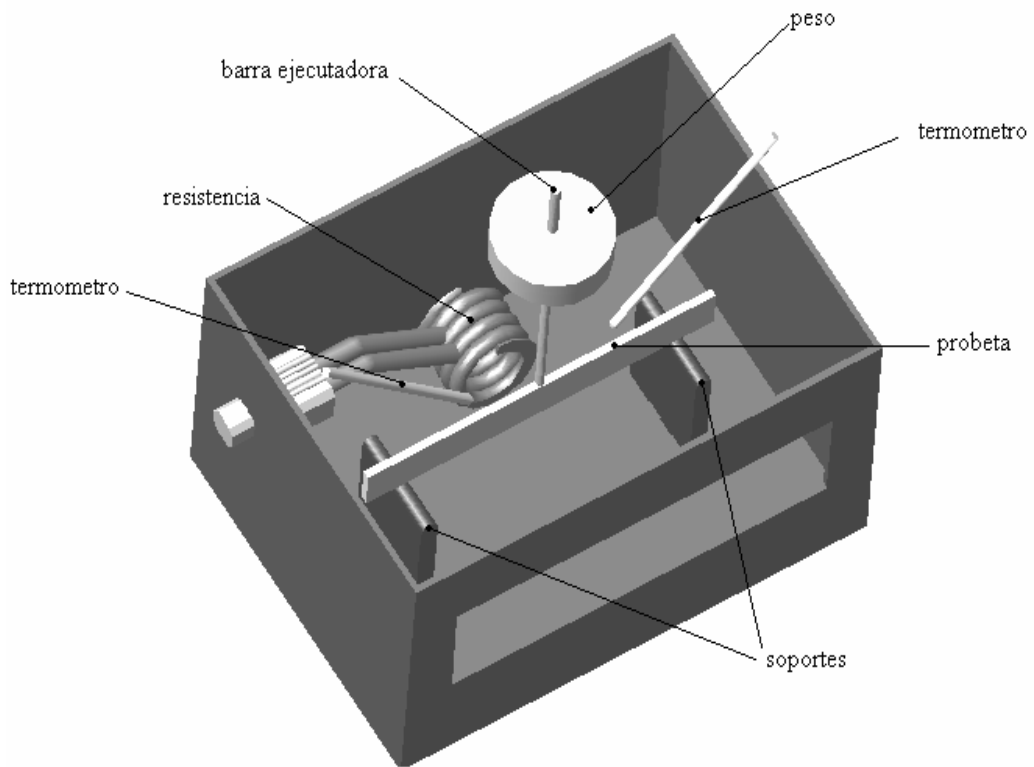


Figura 5.2. Modelo 3D del aparato de medición para la deflexión de polímeros.

Primero, se obtiene el radio hidráulico. (Para secciones no circulares). Análisis a 20 °C

$$R = \frac{A}{P.M.} \dots\dots (5.1)$$

$$A = 0.0203104 \text{ m}^2$$

$$P.M. = 0.9854159 \text{ m}$$

$$R.h. = 0.0203104 \text{ m}^2 / 0.9854159 \text{ m}$$

$$\mathbf{R. h. = 0.0206110 \text{ m}}$$

Se calcula la masa.

$$m = \rho V$$

$$m = (799 \text{ Kg. /m}^3) (0.001670 \text{ m}^3)$$

$$\mathbf{m = 1.33451 \text{ Kg.}}$$

Se obtiene la velocidad de transferencia de calor.

$$\dot{Q} = \frac{m C_p \Delta T}{t} \dots\dots (5.2)$$

$$\dot{Q} = (1.33451 \text{ Kg.}) (2,370 \text{ J/Kg. K}) (10 \text{ K}) / 300 \text{ s.}$$

$$\dot{Q} = 105.42633 \text{ W}$$

De la obtención del flujo másico se puede obtener la velocidad.

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} \dots\dots (5.3)$$

$$V = (0.0044483 \text{ Kg. /s}) / (799 \text{ Kg. /m}^3 * 0.020310 \text{ m/s})$$

$$V = 0.000274116 \text{ m/s.}$$

Se obtiene el Número de Reynolds (N_{REX}) (Para secciones no circulares).

$$N_{REX} = \frac{V 4 R.h. \rho}{\mu} \dots\dots (5.4)$$

$$N_{REX} = (0.000274116 \text{ m/s} * 4 (0.020610 \text{ m}) * 799 \text{ Kg. /m}^3) / (0.0074307 \text{ Kg. /m-s})$$

$$N_{REX} = 2.43$$

Obtener el Número de Grashof (G_{RL})

$$G_{RL} = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \dots\dots (5.5)$$

$$G_{RL} = (9.81 \text{ m/s}^2 * 0.001376 \text{ K}^{-1} * 10 \text{ K} * (0.08\text{m.})^3) / (9.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2$$

$$G_{RL} = 799,500.937$$

Se obtiene el Número de Rayleigh (R_{AL})

$$\boxed{R_{AL} = G_{FL} \cdot Pr} \dots\dots\dots(5.6)$$

$$R_{AL} = (799,500.937 \cdot 132.4117)$$

$$\mathbf{R_{AL} = 105, 863,295.7}$$

Se obtiene el Número de Nusselt local promedio para placa vertical flujo laminar (\check{N}_{UX})

$$\boxed{\bar{N}_{ux} = \left[0.825 + \frac{0.387 R_{AL}^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2} \dots\dots\dots(5.7)$$

$$\bar{N}_{ux} = \left[0.825 + \frac{0.387 (105, 863,296)^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / (132.4117)^{9/16}) \right]^{8/27}} \right]^2$$

$$\mathbf{\check{N}_{UX} = 83.50203243}$$

Se obtiene el Coeficiente de Convección Promedio. (\check{h})

$$\boxed{\check{h} = \frac{\bar{N}_{ux} k}{L}} \dots\dots\dots(5.8)$$

$$\mathbf{\check{h} = 138.8221289 \text{ W/m}^2\text{-K}}$$

Estos números adimensionales y coeficientes convectivos se obtuvieron para realizar el análisis de transferencia de calor en el equipo de medición, y a continuación se realiza la memoria de cálculo para el equipo de prueba.

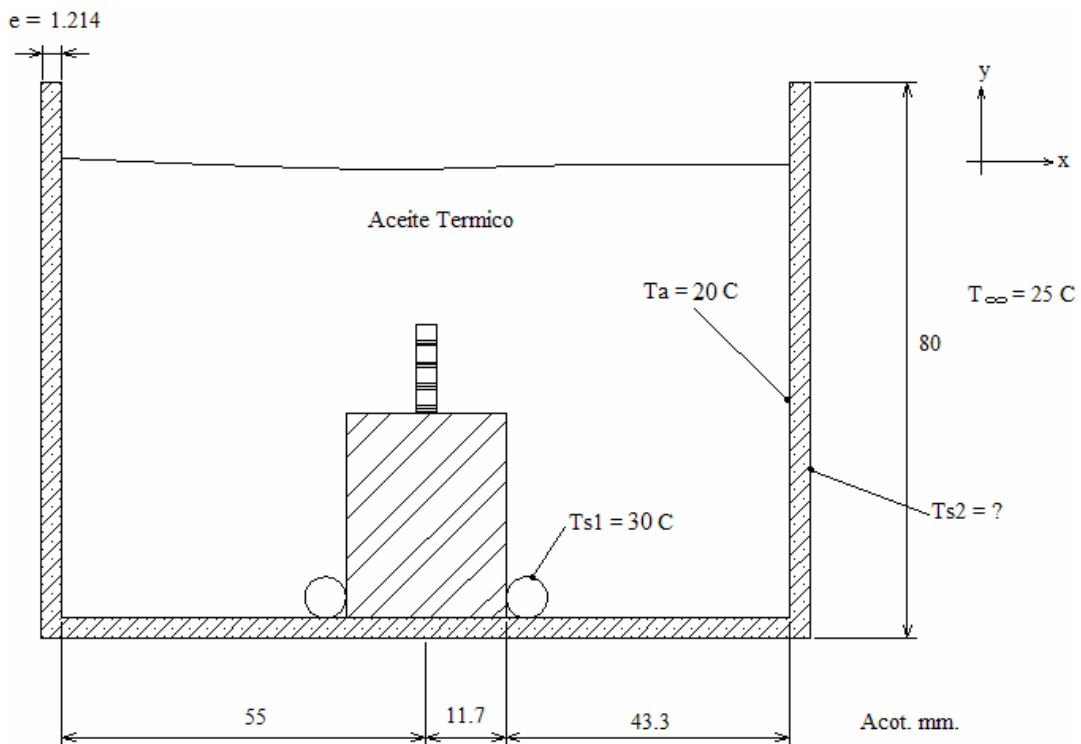


Figura 5.2. Sección transversal del equipo de medición.

Se realiza el análisis unidimensional de transferencia de calor por convección. (Eje "X")

$$q_x = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \dots \dots \dots (5.9)$$

$$q_x = (138.82212 \text{ W/m}^2\text{-K}) (0.01576 \text{ m}^2) (10\text{K})$$

$$q_x = 21.878367 \text{ W}$$

Se realiza el análisis de transferencia de calor por conducción.

$$\dot{Q} = k A_c \frac{T_1 - T_s}{e} \dots \dots \dots (5.10)$$

Se despeja Ts y sustituyendo los valores ya conocidos, teniendo como única variable faltante a la conductividad térmica de acero $K_{\text{acero}} = 51.9 \text{ W/m-K}$ nos queda que. . .

$$T_s = - ((21.8783 \text{ W/m}^2\text{-K}) (0.001214 \text{ m}) / (51.9 \text{ W/m-K}) (0.01576 \text{ m}^2)) + 308 \text{ K}$$

$$T_s = 34.967 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por lo tanto la cantidad de pérdida de calor por convección, conducción y a su vez convección por medio del siguiente diagrama es:

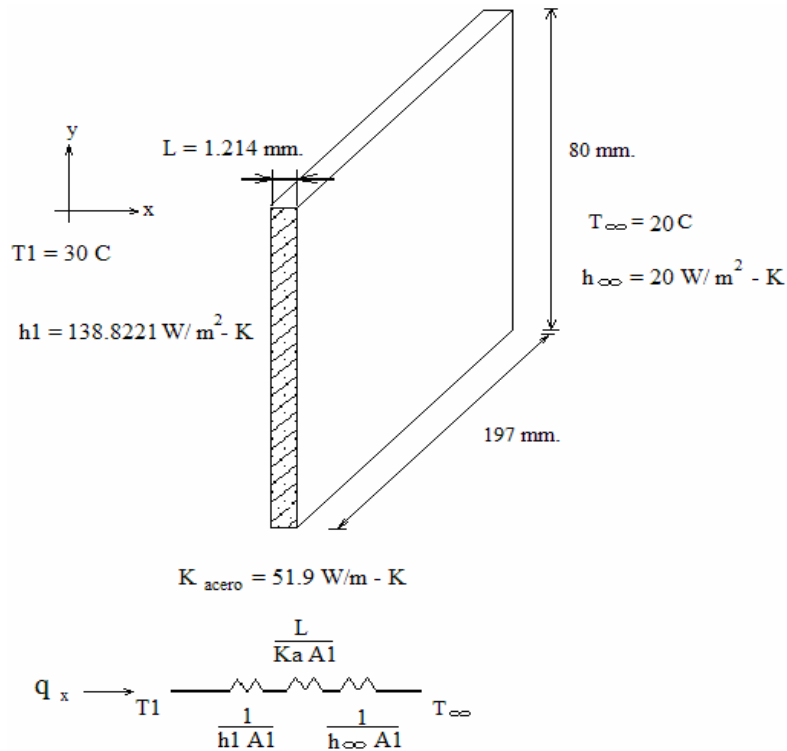


Figura 5.3. Análisis de transferencia de calor.

$$\boxed{\dot{Q}_{x \text{ conv. cond.}} = \frac{\Delta T}{R_T}} \dots \dots \dots (5.11)$$

Donde: $R_{Tx} = (L/h_1 * A_1) + (L/K_a * A_1) + (1/h_\infty * A_1)$

$$R_{h_1} = (0.0333\text{m} / (138.82212 \text{ W/m}^2\text{-K} * 0.01576 \text{ m}^2)) = \mathbf{0.0190463 \text{ K/W}}$$

$$R_{K_a} = (0.001214 \text{ m} / (51.9 \text{ W/m-K} * 0.01576 \text{ m}^2)) = \mathbf{0.001484 \text{ K/W}}$$

$$R_{h_\infty} = (1\text{m} / (20 \text{ W/m}^2\text{-K} * 0.01576 \text{ m}^2)) = \mathbf{3.1725 \text{ K/W}}$$

$$R_{Tx} = (0.013900 + 0.00148 + 3.1725) \text{ K/W}$$

$$\mathbf{R_{Tx} = 3.18929 \text{ K/W}}$$

$$\hat{Q}_{x \text{ conv. cond.}} = 10 \text{ K} / 3.18929 \text{ K/W}$$

$$\mathbf{\hat{Q}_{x \text{ conv. cond.}} = 3.1354 \text{ W}}$$

Se obtiene la cantidad de pérdida de calor por radiación.

$$\dot{Q}_{x \text{ rad.}} = \varepsilon A_s \sigma (T_{s_2}^4 - T_{\infty}^4) \dots \dots \dots (5.12)$$

* ε acero = 0.17 a 300 K

* Constante de Stefan-Boltzmann $5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$$\dot{Q}_{x \text{ rad.}} = (0.17) (0.01576 \text{ m}^2) (5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) (303 \text{ K}^4 - 293 \text{ K}^4)$$

$$\dot{Q}_{x \text{ rad.}} = 0.1608 \text{ W}$$

Por lo tanto las pérdidas por conducción, convección y radiación son:

$$\dot{Q}_{x \text{ por perdidas}} = \dot{Q}_{x \text{ conv. cond.}} + \dot{Q}_{x \text{ rad.}}$$

$$\dot{Q}_{x \text{ por perdidas}} = 3.1354 \text{ W} + 0.1608 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{x \text{ por perdidas}} = 3.2962 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{x \text{ total}} = \dot{Q} - (\dot{Q}_{x \text{ conv. cond.}} + \dot{Q}_{x \text{ rad.}})$$

$$\dot{Q}_{x \text{ total}} = 21.87836 \text{ W} - 3.2962 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{x \text{ total (eje "x")}} = 18.5820 \text{ W}$$

- Análisis unidimensional de flujo externo de transferencia de calor por convección. (Eje "Y").
A 30 °C

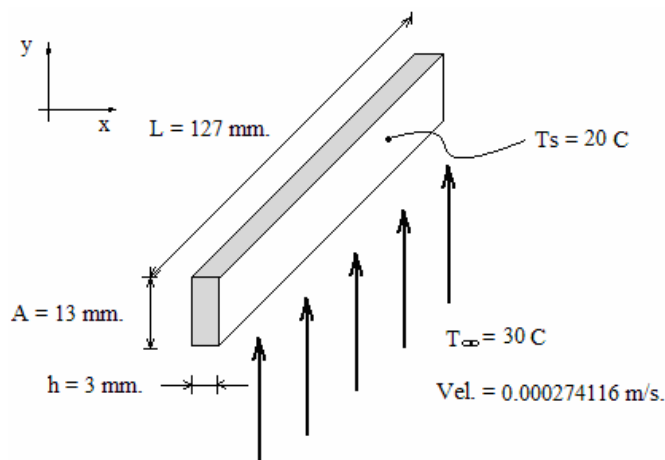
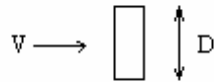


Figura 5.4. Análisis en la probeta.

Se realiza el análisis del flujo externo alrededor de un tubo sección *NO* circular.

$$\boxed{Re_D = \frac{VD}{\nu}} \dots\dots (5.13)$$

Se utiliza esta analogía para obtener el diámetro equivalente de una sección no circular.



$$D = 0.127 \text{ m.}$$

$$Re_D = ((0.00027834 \text{ m/s}) (0.127\text{m}) / (6.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}))$$

$$Re_D = 5.195928$$

$$Re_D * Pr. > 0.2$$

Se obtiene el Número de Nusselt para flujo cruzado en tubos.

$$\boxed{\bar{Nu}_D = 0.3 + \left(\frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \right) \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}} \dots\dots (5.14)$$

$$\bar{Nu}_D = 0.3 + \left(\frac{0.62(5.1959)^{1/2} (94.9944)^{1/3}}{[1 + (0.4/94.9944)^{2/3}]^{1/4}} \right) \left[1 + \left(\frac{5.1959}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$$

$$\tilde{Nu}_D = 6.712724$$

$$\boxed{\bar{h}_D = \frac{\bar{Nu}_D k}{D}}$$

$$\hat{h}_D = ((6.712724) (0.133 \text{ W/m-K}) / (0.127 \text{ m.}))$$

$$\hat{h}_D = 7.02986 \text{ W/m}^2\text{-K}$$

Se realiza el análisis unidimensional de transferencia de calor por convección.

$$q_D = \bar{h} A_T (T_s - T_\infty)$$

$$q_D = (148.6875 \text{ W/m}^2\text{-K}) (0.004142 \text{ m}^2) (10\text{K})$$

$$q_D = 6.158637 \text{ W}$$

Se obtienen las pérdidas por transferencia de calor convectivo.

$$Q_D = \bar{h}_D A_T (T_s - T_\infty)$$

$$Q_{D \text{ conv.}} = (7.02986 \text{ W/m}^2\text{-K}) (0.004142 \text{ m}^2) (10\text{K})$$

$$Q_{D \text{ conv.}} = 0.291176 \text{ W}$$

Se obtienen las pérdidas por radiación.

$$\dot{Q}_{\text{rad.}} = \varepsilon A_s \sigma (T_{s_2}^4 - T_\infty^4)$$

$$\varepsilon_{\text{plástico}} = 0.91$$

$$\dot{Q}_{D \text{ rad.}} = (0.91) (0.004142 \text{ m}^2) (5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) (313 \text{ K}^4 - 303 \text{ K}^4)$$

$$\dot{Q}_{D \text{ rad.}} = 0.25985 \text{ W}$$

Se concluye que las pérdidas por conducción, convección y radiación son:

$$\dot{Q}_{\text{por pérdidas}} = \dot{Q}_{\text{conv.}} + \dot{Q}_{\text{rad.}}$$

$$\dot{Q}_{D \text{ por pérdidas}} = 0.291176 \text{ W} + 0.25985 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{D \text{ por pérdidas}} = 0.551026 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{D \text{ total probeta}} = \dot{Q} - (\dot{Q}_{\text{conv.}} + \dot{Q}_{\text{rad.}})$$

$$\dot{Q}_{D \text{ total probeta}} = 6.158637 \text{ W} - 0.565441 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{D \text{ total probeta}} = 5.617603 \text{ W}$$

Las pérdidas hasta este punto se podrían tomar como despreciables ya que después vuelve a recuperar su estado normal.

Al mezclar el fluido que ha cedido energía a la probeta por medio de la transferencia de calor y el calor del fluido caliente en el medio de transferencia hay un equilibrio térmico y el fluido recupera su misma temperatura, es decir, el mismo calor generado por el sistema se vuelve a establecer, ya que la probeta esta en el medio de transferencia de calor. (Q_{probeta}) y después se realiza el análisis hacia el exterior en dirección del flujo.

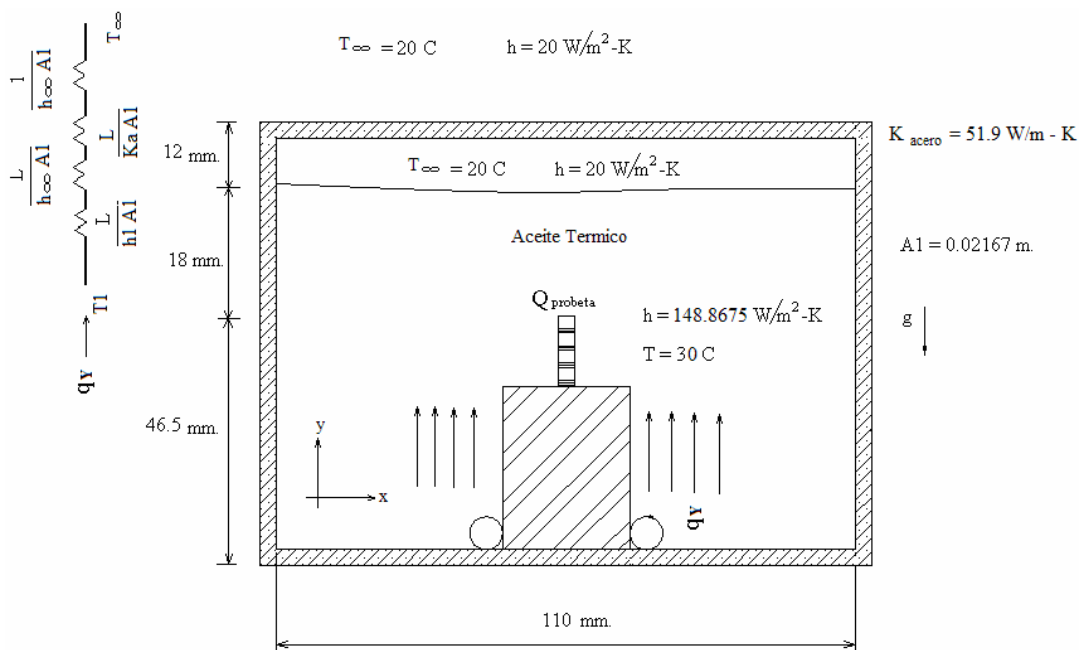


Figura 5.5. Diagrama resistivo del equipo eje "Y"

$$q_Y = \bar{h} A_1 (T_s - T_{\infty})$$

$$q_Y = (148.6875 \text{ W/m}^2\text{-K}) (0.02167 \text{ m}^2) (10\text{K})$$

$$q_Y = 32.9384 \text{ W}$$

Se obtiene que la cantidad de pérdida de calor por convección, conducción y a su vez convección con el medio externo es:

$$\dot{Q}_{Y \text{ conv. cond.}} = \frac{\Delta T}{R_T}$$

$$R_{TY} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_1 = (0.018 \text{ m} / (148.6875 \text{ W/m}^2\text{-K} * 0.02167 \text{ m}^2)) = \mathbf{0.005586 \text{ K/W}}$$

$$R_2 = (0.012 \text{ m} / (20 \text{ W/m}^2\text{-K} * 0.02167 \text{ m}^2)) = \mathbf{0.0276888 \text{ K/W}}$$

$$R_3 = (0.00635 \text{ m} / (51.9 \text{ W/m}^2\text{-K} * 0.02167 \text{ m}^2)) = \mathbf{0.0056460 \text{ K/W}}$$

$$R_4 = (1 \text{ m} / (20 \text{ W/m}^2\text{-K} * 0.02167 \text{ m}^2)) = \mathbf{2.307337 \text{ K/W}}$$

$$\mathbf{R_{TY} = 2.346257 \text{ K/W}}$$

Se obtiene que la cantidad de pérdida de calor por convección, conducción y a su vez convección es:

$$Q_{Y \text{ cond. conv.}} = 10 \text{ K} / 2.346257 \text{ K/W}$$

$$\mathbf{Q_{Y \text{ cond. conv.}} = 4.2621059 \text{ W}}$$

La cantidad de pérdida de calor por radiación es:

$$\mathbf{\dot{Q}_{Y \text{ rad.}} = \varepsilon A s \sigma (T_{s_2}^4 - T_{\infty}^4)}$$

* ε acero = 0.17 a 300 K

$$Q_{Y \text{ rad.}} = (0.17) (0.02167 \text{ m}^2) (5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) (313 \text{ K}^4 - 303 \text{ K}^4)$$

$$\mathbf{Q_{Y \text{ rad.}} = 0.244201 \text{ W}}$$

$$\hat{Q}_{Y \text{ por perdidas}} = \hat{Q}_{\text{conv.}} + \hat{Q}_{\text{rad.}}$$

$$\hat{Q}_{Y \text{ por perdidas}} = 4.2621059 \text{ W} + 0.244201 \text{ W}$$

$$\hat{Q}_{Y \text{ por perdidas}} = 4.506306 \text{ W}$$

$$\hat{Q}_{Y \text{ total (eje "Y")}} = \hat{Q} - (\hat{Q}_{\text{conv.}} + \hat{Q}_{\text{rad.}})$$

$$\hat{Q}_{Y \text{ total}} = 32.9384 \text{ W} - 4.506306 \text{ W}$$

$$\mathbf{\hat{Q}_{Y \text{ total (eje "Y")}} = 27.71428 \text{ W}}$$

- Análisis unidimensional de flujo externo de transferencia de calor por convección. (Eje "Z").
A 30 °C

$$q_z = \bar{h} A_2 (T_s - T_\infty)$$

$$q_z = (148.68753 \text{ W/m}^2\text{-K}) (0.0088 \text{ m}^2) (10\text{K})$$

$$q_z = 13.0845 \text{ W}$$

Por lo tanto la cantidad de pérdida de calor por convección, conducción y a su vez convección por medio del diagrama mostrado en la figura 5.6 es:

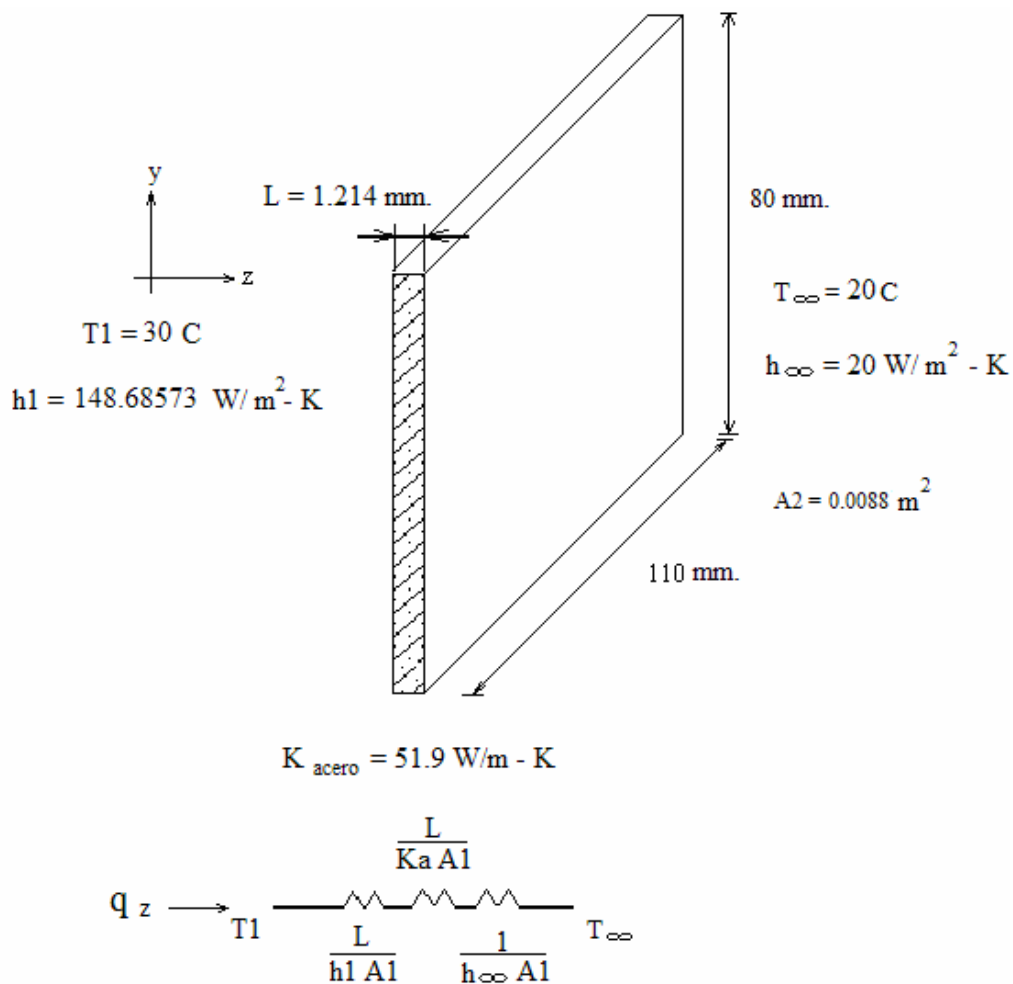


Figura 5.6. Análisis de transferencia de calor.

$$\dot{Q}_Z \text{ conv. cond.} = \frac{\Delta T}{R_T}$$

$$R_{TZ} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = 0.035 \text{ m} / (148.68753 \text{ W/m-K} * 0.0088 \text{ m}^2) = \mathbf{0.0267492 \text{ K/W}}$$

$$R_2 = 0.001214 \text{ m} / 51.9 \text{ W/m-K} * 0.0088 \text{ m}^2) = \mathbf{0.0026580 \text{ K/W}}$$

$$R_3 = 1 \text{ m} / (20 \text{ W/m-K} * 0.0088 \text{ m}^2) = \mathbf{5.68181818 \text{ K/W}}$$

$$\mathbf{R_{TZ} = 5.711225 \text{ K/W}}$$

Por lo tanto la cantidad de pérdida de calor por convección, conducción y a su vez convección es:

$$Q_{Z \text{ cond. conv.}} = 10 \text{ K} / 5.711225 \text{ K/W}$$

$$\mathbf{Q_{Z \text{ cond. conv.}} = 1.750937 \text{ W}}$$

La cantidad de pérdida de calor por radiación es:

$$\dot{Q}_Z \text{ rad.} = \varepsilon A_2 \sigma (T_{s_2}^4 - T_{\infty}^4)$$

* ε acero = 0.17 a 300 K

$$Q_{\text{rad.}} = (0.17) (0.0088 \text{ m}^2) (5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) (313 \text{ K}^4 - 303 \text{ K}^4)$$

$$\mathbf{Q_{\text{rad.}} = 0.099168 \text{ W}}$$

$$\dot{Q}_{\text{por perdidas}} = \dot{Q}_{\text{conv.}} + \dot{Q}_{\text{rad.}}$$

$$\dot{Q}_{\text{por perdidas}} = 1.750937 \text{ W} + 0.099168 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{por perdidas}} = 1.8501 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{total (eje "Y")}} = \dot{Q} - (\dot{Q}_{\text{conv.}} + \dot{Q}_{\text{rad.}})$$

$$\dot{Q}_{\text{total}} = 13.08450 \text{ W} - 1.8501 \text{ W}$$

$$\mathbf{\dot{Q}_{\text{total (eje "Z")}} = 11.23439 \text{ W}}$$

5.4. Resultado del análisis térmico

Lo que se puede observar a través del análisis de Transferencia de Calor son las pérdidas tridimensionales del sistema, y estas se resumen a continuación.

Las pérdidas totales del sistema son:

Con respecto al eje "X" = $2 * 3.3140847700 \text{ W} = \mathbf{6.62816954 \text{ W}}$

Con respecto al eje "Y" = $2 * 4.50630733 \text{ W} = \mathbf{9.012614466 \text{ W}}$

Con respecto al eje "Z" = $2 * 1.85010578 \text{ W} = \mathbf{\underline{3.70021156 \text{ W}}}$

Perdidas totales $\dot{Q}_{\text{por pérdidas (x,y,z)}} = \mathbf{19.34099576 \text{ W}}$

Por lo tanto se concluye que la pérdida de Calor Total en el sistema es de:

$\approx 19.34 \text{ W}$ por cada 5 minutos de operación.

CONCLUSIONES.

Después del trabajo realizado se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1.- No es necesario cumplir con todos los requerimientos de la Norma *ASTM D 648 98 c* ya que se pueden establecer los parámetros necesarios para que se cumplieran las condiciones sin establecer todos los elementos contenidos en la misma, es decir, fue eliminado el implementar un agitador para obtener una temperatura uniforme en el sistema. Uno de los problemas que existe con el agitador es un incremento de energía y alteración del flujo en el sistema, al eliminarlo se obtiene una reducción de costos, mantenimiento y una mejor distribución de los elementos dentro del equipo de prueba.

2.- Se eliminó el uso de un gas inerte como el CO₂, el cual su función principal es:

Eliminar la posibilidad de ignición del aceite con la temperatura de operación del sistema ya que sus rangos de operación se establecen desde -40 °C hasta 250°C dependiendo del plástico que se quiera analizar. (Para temperaturas mayores a 250 °C y menores a 300 °C se recomienda el uso de otro aceite que cumpla con los requerimientos de la norma).

3.- Otro punto importante que no hace mención o ninguna referencia la Norma *ASTM D 648 98 c* es acerca de la superficie interior (el medio en el cual interactúa el aceite) del equipo de prueba, es decir, la rugosidad de la superficie la cual juega un papel importante en la transferencia de calor por convección. Ya que al no existir rugosidad o minimizarla es importante para el desarrollo del movimiento libre del flujo y que no altere al flujo laminar obtenido por la mezcla del análisis del flujo termosifónico con el aceite Paratherm LR, haciendo que la convección libre proporcione la mayor resistencia a la transferencia de calor y por lo tanto es un elemento importante en el diseño o funcionamiento del sistema.

4.- Se hizo una investigación a fondo de los tipos de fluidos y aceites existentes en el mercado que cumplieran con el propósito de ser un aceite o fluido para la transferencia de calor y que cumplieran con lo previsto por la Norma *ASTM D 648 98 c*. Y Se propone el aceite Paratherm LR para la transferencia de calor, excelente en cuanto a las propiedades termo físicas del aceite proporcionando un excelente y prolongado desempeño, siendo un producto seguro y fácil de manejar aún bajo las más exigentes condiciones.

Una de las ventajas que brinda este aceite Paratherm LR es que por medio del análisis que se hizo, siempre nos brindó el tipo de flujo que queríamos, es decir, un *flujo laminar* en toda la operación de la prueba para no tener perturbaciones en la operación del equipo y por medio de los cálculos realizados que se muestran en las *tablas termo físicas del aceite Paratherm LR* se comprobó su eficacia, asegurándonos la presencia del flujo laminar en todo el tiempo de operación de la prueba.

Los resultados arrojados por el análisis térmico también ayudan a ver las mejoras que se pueden hacer en el equipo de pruebas, es decir, las pérdidas térmicas que se derivan del funcionamiento del equipo.

Se recomiendan algunas mejoras en cuanto al diseño del equipo enfocado en el desempeño térmico como son:

- Una pre-cámara para evitar pérdidas por calor, una desventaja es que el equipo incrementará su costo, dimensiones, operabilidad y manejo considerablemente.

- Se recomienda un forro de un material aislante ya sea poroso o fibroso el cual sea un excelente aislante térmico, económico y que soporte las temperaturas de prueba del equipo como *la lana de roca* el cual sería a mi modo de ver la mejor opción, ya que es de fácil instalación, económico y que no tendría consecuencias ni modificaciones considerables en el equipo. Y lo más importante, un ahorro de energía considerable.

- También cabe mencionar el correcto funcionamiento del flujo termosifónico el cual nos ayudó en gran manera a llegar al objetivo que el equipo de prueba demandaba y trabajando juntamente con el aceite para la transferencia de calor, brindándonos en todo momento un flujo sin perturbaciones, es decir, sin la existencia de algún tipo de flujo transitorio y mucho menos un flujo turbulento.

5.- En lo personal este trabajo me deja una gran enseñanza al saber que todo lo que he aprendido en la carrera tiene una aplicación de gran importancia, el desarrollo y profundización de este tema me ha dejado grandes conocimientos así como un desarrollo académico, personal y profesional. Incluyendo la proyección de mi desarrollo hacia el sector industrial, el cual ha sido mi meta como estudiante.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Fundamentos de transferencia de calor.

Frank P. Incropera.

Prentice Hall, Estado de México, 1999.

2. Apuntes de tecnología de materiales II.

Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

FES-C, Estado de México, 2007.

3. Norma ASTM D-648-98 c y normas adjuntas, USA, 1998.

4. Mecánica de fluidos.

Robert L. Mott.

Pearson Educación. 6ª edición, México, 2006.

5. Termodinámica.

Virgil Moring Faires.

Unión Tipográfica Editorial. Hispanoamérica S.A. de C.V., México, 1978.

6. Ingeniería termodinámica fundamentos y aplicaciones.

Francis F. Huang.

Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., 2ª edición, México, 1994.

7. Apuntes de turbomaquinaria.

José Antonio Sánchez Gutiérrez.

FES-C, Estado de México, 2008.

8. Ciencia e ingeniería de los materiales.

Donald R. Askeland.

Thomson Editores, México, 2004.

GLOSARIO

Advección Movimiento global del fluido a través de la superficie de control. || Transporte debido al movimiento volumétrico del fluido.

Difusión Movimiento aleatorio de las moléculas del fluido.

Elastómero Son aquellos polímeros que muestran un comportamiento elástico.

Emisividad Es la transferencia de calor debida a la emisión de ondas electromagnéticas entre dos superficies y no necesita de un medio para llevarse a cabo. || Es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto, debido a un diferencial de temperatura determinada.

Escisión Separación, ruptura, división.

Polímero Los polímeros son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

Termoestable Los plásticos termoestables son polímeros infusibles e insolubles. La razón de tal comportamiento estriba en que las cadenas de estos materiales forman una red tridimensional espacial, entrelazándose con fuertes enlaces covalentes.

Termofluencia es la deformación de tipo plástico que puede sufrir un material cuando se lo somete a temperatura elevada, y durante largos periodos de tiempo, aun cuando la tensión aplicada sea menor que su coeficiente de resistencia a la fluencia.

APENDICE.

<i>Tabla I</i> Propiedades termo físicas del aceite Paratherm LR para la transferencia de calor.	65
<i>Tabla II</i> Unidades derivadas para el cálculo de transferencia de calor.	66
<i>Tabla III</i> Números adimensionales, coeficientes Convectivos y perdidas de calor.	67

Tabla I Propiedades Termo físicas del Aceite Paratherm LR para la Transferencia de Calor.

Temperatura.	Temperatura.	Densidad.	Calor Especifico.	Conductividad Térmica.	Difusividad Térmica.	Viscosidad Dinámica.	Viscosidad Cinemática.	Número de Prandtl.	Coefficiente de Expansión Volumétrica.
K	°C	ρ	Cp	k	α	μ	ν	Pr.	β
		(kg/m ³)	(J/kg-K)	(W/m-K)	(m ² /s)	(Kg./m-s) [Pa-s]	(m ² /s)		(1/K)
273	0	821	2320	0.134	7.03515E-08	0.01642	2.00E-05	284.2865672	0.001339829
283	10	810	2340	0.134	7.06975E-08	0.01053	1.30E-05	183.8820896	0.001358025
293	20	799	2370	0.133	7.02355E-08	0.0074307	9.30E-06	132.4117218	0.001376721
303	30	789	2390	0.133	7.05305E-08	0.0052863	6.70E-06	94.99441353	0.001267427
313	40	780	2410	0.133	7.07522E-08	0.004056	5.20E-06	73.49593985	0.001153846
323	50	771	2430	0.133	7.0989E-08	0.0031611	4.10E-06	57.75543609	0.001167315
333	60	762	2450	0.132	7.07054E-08	0.0025908	3.40E-06	48.08681818	0.001181102
343	70	753	2470	0.132	7.09712E-08	0.0021084	2.80E-06	39.45263636	0.001195219
353	80	745	2490	0.131	7.0618E-08	0.0017135	2.30E-06	32.56958015	0.001073826
363	90	738	2510	0.131	7.07198E-08	0.0013284	1.80E-06	25.45254962	0.000948509
373	100	731	2530	0.13	7.02919E-08	0.0011696	1.60E-06	22.76221538	0.000957592
383	110	724	2550	0.129	6.98733E-08	0.0010136	1.40E-06	20.03627907	0.000966851
393	120	717	2570	0.128	6.94637E-08	0.0009321	1.30E-06	18.71482031	0.00097629
403	130	711	2600	0.127	6.87006E-08	0.0007821	1.10E-06	16.01149606	0.000843882
413	140	706	2620	0.126	6.81184E-08	0.0007766	1.10E-06	16.14834921	0.000708215
423	150	701	2640	0.125	6.75442E-08	0.00068698	9.80E-07	14.5090176	0.000713267
433	160	696	2660	0.124	6.69778E-08	0.0006264	9.00E-07	13.43729032	0.000718391
443	170	691	2680	0.123	6.6419E-08	0.00058044	8.40E-07	12.64698537	0.000723589
453	180	687	2700	0.122	6.57717E-08	0.00052212	7.60E-07	11.55511475	0.000582242
463	190	684	2720	0.121	6.5037E-08	0.00048564	7.10E-07	10.91686612	0.000438596
473	200	681	2740	0.119	6.37748E-08	0.00045627	6.70E-07	10.50571261	0.000440529

Tabla II Unidades Derivadas para el Cálculo de Transferencia de Calor.

Área	Perímetro	Radio	Volumen	masa	Velocidad de	Flujo	Velocidad	Área	Área
	Mojado	Hidráulico			Transferencia	Másico			Total
					de Calor				
A	P.M.	R.h.	Vol.	m	Q	m	V	As	At
(m ²)	(m)	(m)	(m ³)	(Kg.)	(W) (J/s)	(Kg./s)	(m/s)	(m ²)	(m ²)
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.371255546	106.0437622	0.004570852	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.35288306	105.5248787	0.00450961	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.334510574	105.4263353	0.004448369	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.317808314	104.9853957	0.004392694	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.30277628	104.6563612	0.004342588	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.287744246	104.3072839	0.004292481	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.272712212	103.938164	0.004242374	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.257680178	103.5490013	0.004192267	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.24431837	103.2784247	0.004147728	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.232626788	103.1297746	0.004108756	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.220935206	102.9655357	0.004069784	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.209243624	102.785708	0.004030812	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.197552042	102.5902916	0.00399184	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.187530686	102.9193261	0.003958436	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.179179556	102.9816812	0.003930599	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.170828426	103.0329015	0.003902761	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.162477296	103.0729869	0.003874924	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.154126166	103.1019375	0.003847087	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.147445262	103.2700736	0.003824818	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.142434584	103.5807356	0.003808115	0.000274116	0.01576	0.004142
0.02031046	0.985415927	0.020611053	0.001670226	1.137423906	103.8847167	0.003791413	0.000274116	0.01576	0.004142

Tabla III Números Adimensionales, Coeficientes Convectivos y Pérdidas de Calor.

Número Reynolds	Número Grashof	Número Rayleigh	Nusselt F. laminar local promedio	Coeficiente Convectivo Local Promedio	transferencia de Calor por Convección.	Resistencia Total (eje "X")	Pérdidas transferencia de Calor Cond. Conv.	Pérdidas transferencia de Calor Radiación	transferencia de Calor Total. (eje "X")
Sección no Circular		critico	placa vertical	Promedio		(eje "X")	Cond. Conv.	Radiación	Total.
Nrex	Grl	Ral	Ñux	ĥ (W/m ² -K)	qx (W)	R _{Tx} (K/W)	Q̇ _{x conv. Cond.} (W)	Q̇ _{x rad.} (W)	Q̇ _{x Total} (W)
1.12996347	168239.6479	47828271.95	66.23107077	110.9370435	17.48367806	3.193119377	3.131733837	0.130603156	14.22134107
1.738405339	403608.1525	74216310.45	75.27908276	126.0924636	19.87217227	3.190830143	3.133980674	0.14520687	16.59298472
2.430028968	799500.937	105863295.7	83.50203243	138.8221289	21.87836752	3.189293556	3.135490611	0.160860665	18.58201624
3.373025284	1418117.968	134713284.7	89.43610874	148.6875308	23.43315485	3.188283676	3.136483769	0.177601001	20.11907008
4.346013347	2143286.299	157522840.9	93.41403018	155.3008252	24.47541005	3.187678534	3.137079192	0.195464339	21.14286651
5.512016928	3487862.746	201443033.9	100.2545921	166.6732593	26.26770567	3.186750205	3.137993051	0.214487141	22.91522548
6.646843943	5131787.592	246771336.9	106.2817893	175.3649524	27.6375165	3.186121881	3.138611884	0.234705869	24.26419875
8.071167645	7657207.903	302097039	112.5823063	185.7608053	29.27590292	3.185447584	3.139276267	0.256156982	25.88046967
9.825769307	10195699.12	332069639.6	115.3450877	188.8775811	29.76710678	3.185259886	3.139461255	0.278876942	26.34876858
12.55514967	14704004.82	374254412.2	118.8379733	194.5971812	30.66851576	3.184931083	3.139785364	0.302902211	27.22582819
14.12454338	18787961.7	427655630.8	123.3980854	200.5218888	31.60224968	3.184610266	3.140101665	0.328269249	28.13387877
16.14233529	24776637.73	496431627.9	128.6701963	207.4806916	32.69895699	3.184256853	3.140450178	0.355014518	29.2034923
17.38405339	29015572.78	543021230.8	131.9759344	211.1614951	33.27905162	3.184079336	3.140625262	0.383174478	29.75525188
20.54479037	35029605.61	560876392.3	132.5405854	210.4081793	33.16032906	3.184115162	3.140589926	0.412785591	29.60695354
20.54479037	29398075.53	474730389.6	125.9221099	198.3273231	31.25638612	3.184726865	3.139986701	0.443884319	27.6725151
23.06047898	37302574.24	541223706.1	130.581155	204.0330546	32.15560941	3.184428933	3.140280474	0.476507121	28.53882182
25.11029934	44546615.58	598585806.5	134.2935618	208.1550208	32.80523128	3.184223862	3.140482715	0.510690459	29.15405811
26.90389215	51507723.21	651417421.6	137.5050382	211.4139963	33.31884581	3.184067385	3.14063705	0.546470795	29.63173797
29.7358808	50630828.97	585045038.8	132.4784956	202.0297058	31.83988163	3.184531623	3.140179211	0.583884589	28.11581783
31.82995691	43700602.43	477073625.9	124.0631796	187.6455592	29.57294013	3.185333336	3.139388863	0.622968302	25.81058296
33.73025284	49290532.02	517832163.6	127.0174564	188.9384664	29.7767023	3.185256281	3.139464808	0.663758397	25.9734791

Continuación. . .

Número de Reynolds	Número de Nusselt	Coefficiente Convectivo Local	transferencia de Calor por Convección.	Pérdidas de Calor de Convección	Pérdidas de Calor de Radiación	transferencia de Calor Total. (Q probeta)	transferencia de Calor por Convección.	Resistencia Total (eje "Y")	Pérdidas de Calor de Convección
Equivalente.	Equivalente.	Promedio		Convección	Radiación	(Q probeta)		(eje "Y")	Cond. Conv.
Re _D	Ñu _D	ĥ _D	q _D	Q̇ _{D conv.}	Q̇ _{D rad.}	Q̇ _{D Total}	q _Y	R _{TY}	Q̇ _{Y conv. Cond.}
		(W/m ² -k)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(K/W)	(W)
1.740635942	5.66416693	5.97636511	4.595012343	0.24754104	0.18373844	4.16373286	24.04005733	2.34815897	4.258655454
2.67790145	6.04883655	6.38223699	5.222749843	0.26435226	0.20428361	4.75411398	27.32423687	2.34725902	4.260288232
3.743303102	6.38686045	6.68860189	5.750012579	0.27704189	0.22630607	5.24666461	30.08275533	2.34665496	4.261384894
5.195928186	6.71272455	7.02986114	6.158637525	0.29117685	0.24985714	5.61760354	32.22058792	2.34625796	4.262105951
6.694753624	6.97552318	7.30507545	6.432560178	0.30257623	0.27498809	5.85499586	33.65368881	2.34602006	4.262538142
8.490907036	7.22962805	7.57118528	6.903606402	0.31359849	0.30175023	6.28825767	36.1180953	2.34565512	4.263201322
10.23903495	7.45172861	7.74510375	7.263616329	0.3208022	0.33019485	6.61261928	38.00158519	2.34540811	4.263650302
12.43311387	7.66875961	7.97067928	7.694212557	0.33014554	0.36037325	7.00369377	40.25436652	2.34514303	4.264132238
15.13596472	7.91693832	8.16629071	7.823309408	0.33824776	0.39233672	7.09272492	40.92977182	2.34506924	4.264266409
19.34039936	8.21519336	8.47393961	8.060215247	0.35099058	0.42613656	7.28308811	42.16920918	2.34493998	4.264501467
21.75794928	8.38048057	8.57844467	8.305616636	0.35531918	0.46182406	7.4884734	43.45309331	2.34481386	4.26473084
24.86622775	8.56875279	8.70369378	8.593850245	0.360507	0.49945052	7.73389273	44.96106586	2.34467493	4.264983547
26.7790145	8.68218854	8.75055223	8.746309125	0.36244787	0.53906722	7.84479403	45.75869598	2.34460514	4.265110491
31.64792622	8.9360908	8.9360908	8.715106788	0.37013288	0.58072548	7.76424843	45.59545246	2.34461923	4.265084871
31.64792622	8.96159048	8.89102678	8.214717722	0.36826633	0.62447658	7.22197481	42.97753091	2.3448597	4.264647473
35.5231825	9.14392655	8.99992771	8.451049123	0.37277701	0.67037182	7.4079003	44.21396294	2.34474258	4.264860498
38.68079872	9.28714435	9.06776299	8.621780963	0.37558674	0.71846249	7.52773173	45.10719301	2.34466196	4.265007139
41.44371291	9.40952085	9.11315799	8.756767726	0.377467	0.76879988	7.61050084	45.81341299	2.34460045	4.265119037
45.80620901	9.58189358	9.20465368	8.368070413	0.38125676	0.82143531	7.16537835	43.77983724	2.34478295	4.264787071
49.03199837	9.71567419	9.25666597	7.772279062	0.3834111	0.87642005	6.51244791	40.66279268	2.34509812	4.264213905
51.95928186	9.86452603	9.24313857	7.825831277	0.3828508	0.9338054	6.50917508	40.94296566	2.34506783	4.264268986

Continuación. . .

Pérdidas transferencia de Calor Radiación Q̇_Y rad. (W)	transferencia de Calor Total. (eje "Y") Q̇_Y Total (W)	transferencia de Calor por Convección. q_z (W)	Resistencia Total (eje "Z") R_{Tz} (K/W)	Pérdidas transferencia de Calor Cond. Conv. Q̇_z conv. Cond. (W)	Pérdidas transferencia de Calor Radiación Q̇_z rad. (W)	transferencia de Calor Total. (eje "Z") Q̇_z Total (W)	Pérdidas de Calor Total en el Sistema. c/5 min. De Operación Q̇ Total_(x,y,z) (W)
0.17957934	19.60182254	9.762459831	5.7203279	1.74815154	0.07292562	7.941382671	19.04329789
0.199659447	22.86428919	11.0961368	5.7160188	1.749469411	0.081079978	9.265587409	19.13936922
0.221183414	25.60018703	12.21634734	5.7131264	1.750355112	0.089820676	10.37617156	19.23819074
0.244201376	27.71428059	13.08450271	5.7112255	1.750937703	0.099168071	11.23439693	19.34099574
0.268763466	29.12238721	13.66647261	5.7100864	1.75128699	0.109142524	11.8060431	19.44854931
0.294919819	31.55997416	14.66724682	5.708339	1.751823091	0.119764394	12.79565934	19.56437764
0.322720569	33.41521432	15.43211581	5.7071562	1.752186129	0.131054038	13.54887564	19.68585758
0.35221585	35.63801843	16.34695087	5.705887	1.752575896	0.143031817	14.45134316	19.8147781
0.383455796	36.28204962	16.62122714	5.7055337	1.752684423	0.15571809	14.71282462	19.94892583
0.41649054	37.48821717	17.12455195	5.7049148	1.75287457	0.169133214	15.20254417	20.09137473
0.451370218	38.73699226	17.64592622	5.7043109	1.753060137	0.18329755	15.70956853	20.24165932
0.488144962	40.20793736	18.25830086	5.7036456	1.753264605	0.198231457	16.3068048	20.40017853
0.526864908	40.96672058	18.58221156	5.7033115	1.753367325	0.213955292	16.61488895	20.56619551
0.567580188	40.7627874	18.51591978	5.7033789	1.753346594	0.230489417	16.53208377	20.73975318
0.610340938	38.1025425	17.45280443	5.7045303	1.75299269	0.247854188	15.45195755	20.91941262
0.655197291	39.29390515	17.95490881	5.7039695	1.753165042	0.266069966	15.9356738	21.11216078
0.702199381	40.13998649	18.31764183	5.7035835	1.753283694	0.285157109	16.27920103	21.313641
0.751397343	40.79689661	18.60443167	5.703289	1.753374241	0.305135977	16.54592145	21.52426889
0.80284131	38.71220886	17.77861411	5.7041628	1.753105632	0.326026928	15.69948155	21.74164948
0.856581416	35.54199736	16.51280921	5.7056719	1.752641953	0.347850321	14.41231694	21.96728952
0.912667796	35.76602888	16.62658504	5.7055269	1.752686508	0.370626516	14.50327202	22.20694602