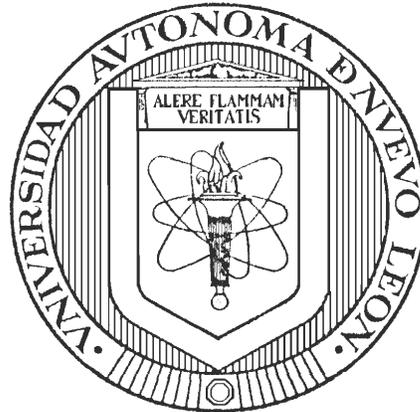


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ENSAYOS DE  
FATIGA TÉRMICA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE  
LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES

PRESENTA

MIGUEL ANGEL QUIÑONES SALINAS

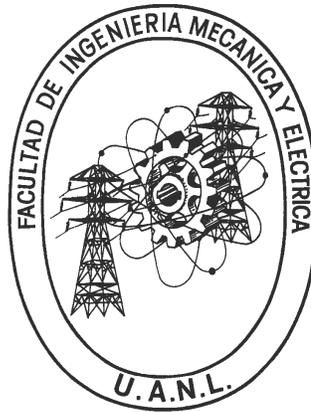
CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO DEL 2007

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ENSAYOS DE  
FATIGA TÉRMICA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE  
LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES

PRESENTA

MIGUEL ANGEL QUIÑONES SALINAS

CIUDAD UNIVERSITARIA

MARZO DEL 2007

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

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Desarrollo de una metodología para ensayos de fatiga térmica”, realizada por el alumno Miguel Angel Quiñones Salinas, matrícula 932876 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

---

Dr. Rafael David Mercado Solís  
Asesor

---

Dr. Rafael Colás Ortiz  
Revisor

---

Dr. Octavio Covarrubias Alvarado  
Revisor

Vo. Bo.

---

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
Subdirector de Estudios de Postgrado

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N. L., Marzo del 2007

## **DEDICATORIA**

### **A Dios**

#### **A mis Padres**

*Miguel Quiñones Fuentes*

*Sandra Neida Salinas González*

#### **A mis Hermanos**

*Jullie Guadalupe Quiñones Salinas*

*Douglas Iván Quiñones Salinas*

#### **A mi Novia**

*Rocío Gemma Contreras Duarte*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar a esta etapa de mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante mis estudios de postgrado y por el apoyo económico brindado para realizar la presente tesis a través del proyecto de investigación científica básica clave No. J43424-Y.

Al Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales (PDIM) de la FIME-UANL por permitirme ingresar y realizar mis estudios de postgrado.

A mi asesor el Dr. Rafael David Mercado Solís le agradezco infinitamente su apoyo, sus enseñanzas, sus consejos, los estirones de oreja y sermones, que me han impulsado a salir adelante en este proyecto y en mi vida profesional. Le agradezco su amistad, su confianza y sobre todo por permitirme trabajar con él y por creer en mí para llevar a cabo este proyecto.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz por su valiosa participación, por ser accesible a pesar de sus múltiples ocupaciones y tomarse tiempo para escucharme y aconsejarme. Le agradezco sus atenciones y su sencillez como persona.

Al Dr. Octavio Covarrubias Alvarado por apoyarme en la revisión de esta tesis, le agradezco de antemano los consejos tan útiles que me otorgó.

A todos los profesores del PDIM por sus enseñanzas.

A COMIMSA-Saltillo, por las facilidades otorgadas para la realización de las pruebas de factibilidad. Agradezco al Ing. Cornelio Quirino, al Dr. Marco Antonio Hernández y al personal por el apoyo y disponibilidad durante estas pruebas.

Al Ing. Julio Muñoz Baca, al Lic. Javier Arizpe y al Sr. Raúl Peña por sus finas atenciones y por su colaboración con material elemental para este trabajo de investigación.

Al M. C. Alejandro González por permitirme, facilitarme y colaborar en la realización del análisis de las probetas.

Al Dr. Aguilar Garib y Dr. Zarel Nava por facilitarme su equipo de enfriamiento durante las pruebas de experimentación.

A Martín y Meme de mantenimiento por su disposición y ayuda durante el desarrollo del banco de pruebas.

A mis compañeros y amigos de trabajo por su amistad y apoyo durante el tiempo del postgrado. A mis hermanos de generación: Orlando “the miera”, Oscar “Shoots”, Jorge “Pelón”, Juanito “Cachanilla”, Yuri “La peque”, Lili, Luís “Cahuayote” y Armando “Ajedrez”. A Ismael “Ranger” por su apoyo con el sistema de inducción. A la raza de la generación del desmán, Hugo “Changa”, Héctor, Iván “Furia”, Adrián “Cejón”, Pablo “Pinki”. Y a toda la raza con la que he convivido estos últimos años, Roro, Mayra, Angelina, Teresita, Diana, al Ponken, Álvaro, Chava, Molla, Jaime, Luís, Angélica, Rubén, a Julián “Piquito de oro”, Rodrigo González, Julián Rodríguez y por su puesto a nuestras amigas Maricela madre he hija. Agradezco a Israel y Nasser por los tips y por su ayuda durante la escritura de mi tesis.

Les agradezco eternamente a mis padres por darme la vida, por ser mis guías y mi ejemplo a seguir, por brindarme su amor, su apoyo incondicional en todos los aspectos, por sus consejos y por ser como son... “Gracias mis viejos”.

A mis hermanos por su cariño y apoyo. A “Maria Félix” (mi hermana Jullie) por prepararme los cafecitos durante la escritura de mi tesis y a mi hermano el buen Douglas por levantarme el ánimo con su buen humor en los tiempos difíciles.

A mi compañera del alma, Gemma gracias por caminar a mi lado, acompañarme en las buenas y en las malas, por ayudarme a levantarme en mis tropiezos y poder continuar, gracias por quererme y por compartir tu vida con migo. Gracias mi niña hermosa.

Les agradezco de todo corazón a aquellas personas que contribuyeron y se preocuparon para que este trabajo pudiera realizarse.

# INDICE

	Página
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
SÍNTESIS.....	1
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	
1.1 Introducción.....	2
Referencias bibliográficas.....	7
CAPÍTULO 2	
FATIGA TÉRMICA	
2.1 Introducción.....	8
2.2 Esfuerzos y deformaciones térmicas transitorias.....	11
2.2.1 Por deformación.....	11
2.2.2 Por desplazamiento.....	13
2.3 Factores que influyen la fatiga térmica.....	18
Referencias bibliográficas.....	23
CAPÍTULO 3	
METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE FATIGA TÉRMICA	
3.1 Introducción.....	25
3.2 Metodologías para la evaluación del comportamiento a la fatiga térmica.....	28
3.3 Características de pruebas en fatiga térmica.....	37
Referencias bibliográficas.....	40
CAPÍTULO 4	
FUNDAMENTOS DE DISEÑO	
4.1 Introducción.....	42
4.2 Características del diseño.....	44
4.3 Tipos de diseño.....	45
4.4 Definición de máquina.....	46
4.5 Sistemas técnicos.....	46
4.6 Metodología para el diseño de máquinas.....	48
4.7 Categorías de pruebas.....	51
4.8 Consideraciones y características del diseño.....	52
Referencias bibliográficas.....	54

CAPÍTULO 5	
METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	
5.1	Introducción..... 55
5.2	Condiciones de prueba..... 56
5.3	Prototipo de máquina de ensayos de fatiga térmica (ProMEFT)..... 57
5.3.1	Subsistema de calentamiento..... 58
5.3.2	Depósito de enfriamiento..... 59
5.3.3	Subsistema de desplazamiento..... 59
5.3.4	Extensión del vástago del pistón..... 59
5.3.5	Muestra..... 60
5.3.6	Pruebas de factibilidad..... 61
5.4	Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica (MEFT)..... 62
5.4.1	Diseño y construcción..... 62
5.4.2	Subsistema estructural..... 63
5.4.2.1	Soporte inferior..... 64
5.4.2.2	Soporte superior..... 65
5.4.2.3	Plataforma..... 66
5.4.3	Subsistema de calentamiento..... 67
5.4.4	Subsistema de medición de temperaturas..... 70
5.4.5	Subsistema de enfriamiento..... 71
5.4.5.1	Cálculo de tiempo con respecto al gasto..... 71
5.4.5.2	Pruebas preliminares para la selección de boquillas..... 73
5.4.5.3	Selección de boquillas..... 75
5.4.5.4	Cámara de enfriamiento..... 79
5.4.5.5	Bomba de flujo de agua..... 81
5.4.6	Subsistema de sujeción..... 82
5.4.7	Extensión del vástago del actuador..... 85
5.4.8	Subsistema de desplazamiento..... 86
5.5	Descripción y operación de MEFT..... 86
5.6	Procedimiento experimental..... 90
5.6.1	Caracterización del material acero D2..... 91
5.6.1.1	Acero D2 (sin tratamiento)..... 91
	Pruebas de dureza..... 92
	Pruebas de microdureza..... 92
	Caracterización metalográfica..... 93
	Micrografías..... 93
5.6.1.2	Acero D2 (endurecido)..... 95
	Tratamiento térmico..... 95

Pruebas de dureza.....	95
Caracterización metalográfica.....	95
Micrografías.....	96
5.6.2 Ensayos de validación.....	98
5.6.3 Procedimiento para análisis de resultados.....	101
5.6.3.1 Análisis macroestructural.....	101
5.6.3.2 Análisis microestructural.....	102
Referencias bibliográficas.....	103

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Introducción.....	105
6.2 Diseño y construcción ProMEFT.....	106
6.2.1 Subsistema de calentamiento.....	106
6.2.2 Subsistema de enfriamiento.....	107
6.2.3 Subsistema de desplazamiento.....	108
6.2.4 Extensión del vástago del actuador.....	109
6.2.5 Resultados de las pruebas de factibilidad.....	110
6.2.6 Problemas de operación encontrados en el ProMEFT.....	111
6.3 Diseño y construcción de la MEFT.....	112
6.3.1 Subsistema estructural.....	113
6.3.2 Subsistema de calentamiento.....	113
6.3.3 Subsistema de enfriamiento.....	113
6.3.4 Subsistema de desplazamiento.....	115
6.3.5 Extensión del vástago del pistón.....	115
6.3.6 Subsistema de medición de temperaturas.....	116
6.3.7 Problemas de operación encontrados.....	117
6.4 Rediseño y modificaciones de la MEFT.....	119
6.4.1 Resultados del funcionamiento del la MEFT.....	120
6.5 Resultado de experimentos de validación.....	123
6.5.1 Análisis macroestructural.....	123
6.5.1.1 Prueba 1.....	123
6.5.1.2 Pruebas 2 a 5.....	124
6.5.1.3 Prueba 6.....	125
6.5.1.4 Prueba 7.....	126
6.5.1.5 Análisis macroestructural en muestra 5.....	126
Pruebas de dureza.....	127
6.5.2 Análisis microestructural.....	130

Caracterización metalográfica.....	130
Pruebas de microdureza.....	130
Análisis con microscopía óptica.....	131
Análisis con microscopía electrónica de barrido (SEM).....	133
CAPÍTULO 7	
CONCLUSIONES	
7.1 Banco de pruebas.....	137
7.2 Pruebas experimentales.....	139
CAPÍTULO 8	
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	140
LISTA DE FIGURAS.....	143
LISTA DE TABLAS.....	147
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....	148

## SÍNTESIS

La fatiga térmica representa una de las principales formas de falla en componentes industriales. La vida útil de dichos componentes puede ser inferida bajo condiciones reales de operación, es decir en la línea de producción. Sin embargo, estas prácticas resultan altamente costosas, complejas y prolongadas, además de no garantizar la obtención de resultados satisfactorios tras su ejecución. Por lo tanto, es muy deseable poder simular el comportamiento a la fatiga térmica de estos materiales a nivel laboratorio, bajo condiciones altamente controladas y monitoreadas y cuyos resultados provean una idea clara de su comportamiento y sean escalables al comportamiento observado en la línea de producción. Debido a la creciente necesidad de realizar estudios científicos y desarrollar métodos de investigación enfocados a evaluar el mecanismo de falla por fatiga térmica, en el presente proyecto de investigación se desarrolló una metodología a nivel laboratorio capaz de reproducir la fatiga térmica bajo condiciones experimentales controladas y sistemáticamente monitoreadas en aceros grado herramienta. Se inició con el planteamiento de las variables involucradas en los procesos que presentan el mecanismo de falla por fatiga térmica. De esta forma se realizaron pruebas de factibilidad mediante el diseño y construcción de un banco de pruebas prototipo, el cual arrojó información útil y una perspectiva del comportamiento que tendrían los componentes para una adecuada selección en el diseño conceptual del banco de pruebas. Posteriormente en base a esto se propuso un diseño preliminar y se realizó una evaluación detallada, se ajustaron las variables así como las condiciones de interés para llevar a cabo la construcción de la máquina de ensayos en su versión final. Finalmente se realizaron una serie de pruebas con el objetivo de validar el banco de pruebas bajo diversas condiciones experimentales, sometiendo diferentes especímenes a ciclos térmicos continuos, calentando por medio de inducción y enfriando mediante aspersión de agua. Posterior a los experimentos de validación se procedió a realizar el análisis macro y microestructural de las probetas ensayadas en el banco de pruebas. Finalmente, se concluyó que la metodología experimental desarrollada es adecuada y útil para el estudio de la fatiga térmica en metales y representa un importante paso hacia un mejor entendimiento de este tipo de falla.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción.

En la actualidad las industrias manufactureras a nivel mundial sufren de pérdidas monetarias importantes debido al desecho y reemplazo de componentes dañados por diferentes mecanismos de falla como la fatiga térmica. Este fenómeno se presenta comúnmente cuando los componentes metálicos son expuestos a ambientes hostiles que experimentan cambios drásticos de temperatura. Estos cambios de temperatura conllevan a los componentes a sufrir daños por agrietamiento térmico. En la industria, las fallas por fatiga térmica se presentan después de un tiempo significativamente menor al de la vida útil estimada de los componentes o estructuras [1].

Un componente pierde su funcionalidad cuando su distorsión permanente, por la acumulación de temperaturas, supera los límites de tolerancia o bien, cuando la propagación de las grietas térmicas es crítica o se ha llegado a la fractura [2]. Tal es el caso del agrietamiento por fatiga térmica que está presente, por ejemplo en componentes como los rodillos de laminación, dados y moldes de vaciado los cuales experimentan ciclos térmicos superficiales causados por los periodos sometidos a rápidos calentamientos y a repentinos enfriamientos para evitar deformaciones en la superficie [2, 3]. La fatiga térmica tiene un efecto adverso en la calidad superficial tanto de los componentes como del producto [5]. Por lo tanto este mecanismo de falla afecta desde la estética de los materiales hasta su resistencia y durabilidad.

Por tal motivo, existe la creciente necesidad de realizar estudios científicos y desarrollar métodos de investigación enfocados a determinar los mecanismos de falla de los diferentes componentes.

El análisis de falla de los componentes expuestos a ciclos térmicos se ha llevado a cabo tradicionalmente en la línea de producción, con serias limitaciones principalmente en cuanto a la dificultad de determinar los mecanismos progresivos de la falla, la interrupción del plan de fabricación, el tiempo tomado para adquirir resultados, los elevados costos de la investigación y los costos asociados a la producción resultante del paro de componentes. En este trabajo se propone el desarrollo de una metodología experimental propia, mediante la construcción de una máquina de pruebas a nivel laboratorio, puesto que las pruebas se realizan fuera de la línea de producción, se evalúa la sensibilidad de las características o propiedades requeridas por el material en base a las variables del proceso, las condiciones de prueba son controlables y sistemáticamente monitoreadas, los resultados son rápidos de obtener y las pruebas de laboratorio se pueden realizar a un costo mucho más bajo que ensayos en condiciones reales.

Por lo tanto el objetivo principal del presente proyecto de investigación es diseñar, construir y validar una máquina de ensayos a nivel laboratorio que sea capaz de reproducir el mecanismo de falla por fatiga térmica, con el propósito de estudiar y evaluar la resistencia al fenómeno bajo diferentes condiciones experimentales bien controladas en aceros grado herramienta.

La hipótesis que fundamenta este trabajo es la siguiente: mediante la aplicación del conocimiento científico existente en cuanto a los factores gobernantes sobre el comportamiento a la fatiga térmica de los metales, en combinación con la teoría de diseño mecánico, es posible construir un banco de pruebas para evaluar la resistencia a la fatiga térmica de materiales metálicos sometidos a diversas condiciones de ensayo.

La metodología realizada en este proyecto de investigación fue la siguiente:

- Se planteó el problema existente sobre la fatiga térmica.
- Se realizó una revisión de literatura con la finalidad de conocer el estado del arte en relación a los métodos experimentales existentes para el estudio de la fatiga térmica en metales.
- Se construyó un banco de pruebas prototipo para realizar pruebas exploratorias.
- Se realizaron pruebas de factibilidad que proporcionaron lineamientos básicos para las posteriores etapas de diseño y construcción del banco de pruebas en su versión final.
- Se propuso un diseño preliminar para la máquina de ensayos.
- Se realizó una evaluación detallada de cada uno de los componentes del diseño preliminar, realizando una evaluación global del diseño de la máquina.

- Se propusieron áreas de oportunidad para la mejora del diseño de la máquina.
- Se realizaron mejoras en el diseño de la máquina de ensayos en base a los resultados de la evaluación del diseño preliminar.
- Se llevó a cabo la construcción de la máquina de ensayos incorporando todos los componentes contemplados en el diseño.
- Se realizaron ensayos de validación del banco de pruebas bajo diversas condiciones de experimentación. Se ejecutaron ciclos térmicos calentando especímenes por medio de inducción hasta temperaturas de 750°C y enfriándolos mediante agua común sin tratar hasta temperaturas de aproximadamente 40°C. Se realizaron un total de 7 pruebas para analizar el comportamiento del mecanismo de falla bajo distintas condiciones experimentales.

El trabajo presente en cada capítulo es el siguiente:

En el capítulo 1 se justifica la necesidad del desarrollo de una metodología para ensayos a nivel laboratorio del mecanismo de falla por fatiga térmica presente, con las ventajas sobre los análisis de falla en líneas de producción.

En el capítulo 2 se define el fenómeno de fatiga térmica y se presenta una descripción de los principales factores que contribuyen al desarrollo de la misma.

En el capítulo 3 se presenta una búsqueda bibliográfica con la finalidad de conocer el estado del arte en relación a las técnicas experimentales con aplicación y especificaciones que existen para el estudio del fenómeno de fatiga térmica.

En el capítulo 4 se dan a conocer los fundamentos del diseño, los cuales son las condiciones y pasos necesarios a seguir en el desarrollo de una metodología experimental de este tipo.

En el capítulo 5 se analizan las variables y condiciones que intervinieron para la selección de los diferentes componentes y subsistemas que constituyen al banco de pruebas, así como la disposición y características con los que cuentan los mismos. Se describen los diferentes ensayos realizados desde las pruebas de factibilidad hasta los ejecutados para la validación del banco de pruebas.

En el capítulo 6 se discuten los resultados originados en el diseño, construcción y perfeccionamiento del banco de pruebas y se analizan los resultados arrojados por los diferentes ensayos realizados tanto en la máquina prototipo como en la máquina de pruebas en su versión final.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones de la presente metodología desarrollada, así como de la validación realizada para la misma.

En el capítulo 8 se presentan algunas recomendaciones para trabajo futuro en relación a experimentos, así como ajustes y modificaciones posteriores a desarrollar en la máquina de ensayos de fatiga térmica.

## Referencias

1. Weronki A. and Hejwowski T., "Thermal Fatigue of Metals", Technical University of New York, N.Y., Mercel Dekker, Inc., 1991, pp 108-128.
2. Blazevic D.T., "Hot Strip Mill Operations", Hot Rolling Consultants, Homewood, Illinois, LTD, 1994, Vol. 3, No IX, 1-8.
3. Jiang Q. C., Sui H. L. and Guan Q. F., "Thermal fatigue behavior of new type high-Cr cast hot work die steel", ISIJ International, 44, 12, 2004, No. 6, pp 1103-1107
4. Goodchild J., "The design of a laboratory test machine to simulate surface damage to work rolls for hot strip mills", PhD. Thesis, The University of Sheffield, UK, 2001.
5. Mercado-Solís R. D., Propuesta de investigación, PROMEP/103.5/04/2590, Dic. 2005.

## CAPÍTULO 2

# FATIGA TÉRMICA

### 2.1 Introducción.

El término de fatiga térmica se refiere a la falla de un material tras la repetición de ciclos de calentamiento y enfriamiento. De acuerdo a Weroniski y Hejwowski [1] la fatiga térmica se define como un conjunto de fenómenos que se presentan en aquellos materiales expuestos a una variación de temperaturas cíclicas en presencia o ausencia de cargas mecánicas externas. Este mecanismo de falla, según Glennly [2], Revel y coautores [3], es producido por la repetición de esfuerzos de origen térmico debido a que la expansión o contracción que normalmente resultaría del calentamiento o enfriamiento de un componente o estructura es parcial o totalmente restringido.

La fatiga térmica es un proceso de inicio y desarrollo gradual de daño en un elemento, el cual puede ser entendido como un estado de disfunción parcial o completa. La distorsión, agrietamiento superficial y ruptura en componentes de maquinas son algunas fallas atribuidas a la fatiga térmica. Esta falla puede ser acentuada por (1) esfuerzos introducidos debido al maquinado o durante el servicio, (2) ambientes agresivos (tales como corrosión o erosión) y (3) cargas externas estables o variables [1].

La fatiga térmica se origina bajo una gran variedad de situaciones que pueden ser discutidas a detalle. Sin embargo el amplio dominio en el cual la fatiga térmica puede hacer una significativa o total contribución para la falla tiene tres limitantes, es decir cuando las siguientes consideraciones se manifiestan, la falla no se desarrolla bajo el fenómeno de fatiga térmica [1]:

1. El área en la cual el ciclo de esfuerzos mecánicos es severo y los esfuerzos térmicos son moderados.
2. La región de choque térmico, en la cual el cambio de temperaturas y la razón de cambio son lo suficiente grandes para que ocurra la falla en uno o pocos ciclos.
3. La región de falla por termofluencia (*creep*), caracterizada por cargas mecánicas constantes y temperaturas altas durante ciclos térmicos muy prolongados.

De acuerdo a Spera [4], los casos de fatiga térmica pueden ser diferenciados en aquellos que presentan restricciones internas, restricciones externas o ambas. La *restricción interna* puede ser ocasionada por: (1) un gradiente de temperaturas existente a través de la sección del elemento o, (2) por anisotropía en la estructura de un elemento que presenta distintas fases. En cambio la *restricción externa* ocurre cuando la expansión térmica de un elemento es restringida a través de un marco mecánico o carga externa.

Un ejemplo representativo de fatiga térmica con presencia de *restricción interna*, es aquel en donde un cuerpo sólido es expuesto a un medio de diferencia de temperaturas. La temperatura a través de su sección transversal cambiará de manera no uniforme y por lo tanto resultarán diferencias de temperatura. Varias partes del cuerpo tenderán a expandirse (durante el calentamiento) o contraerse (durante el enfriamiento) en diferente medida, pero cada parte será restringida en cierto grado por las regiones circunvecinas [5, 6, 7]. De esta manera se producirá un sistema de deformaciones transitorias y esfuerzos asociados debido a la diferencia de temperaturas dentro del cuerpo [2]. La magnitud de los esfuerzos y deformaciones térmicos dependerán de la magnitud de la diferencia de temperaturas dentro del cuerpo [8].

Derivado del primer caso (*restricción interna*) es posible mencionar además el ejemplo del calentamiento uniforme de una lámina bimetálica la cual puede producir esfuerzos térmicos debido a las diferentes razones de expansión de los componentes metálicos. Por otra parte algunos metales no cúbicos por ejemplo el estaño, el zinc y el uranio exhiben una marcada anisotropía en los coeficientes de expansión térmica (cuyo valor depende de la dirección cristalográfica), donde el calentamiento uniforme resulta en esfuerzos alternados que puede causar flujo plástico [1, 2].

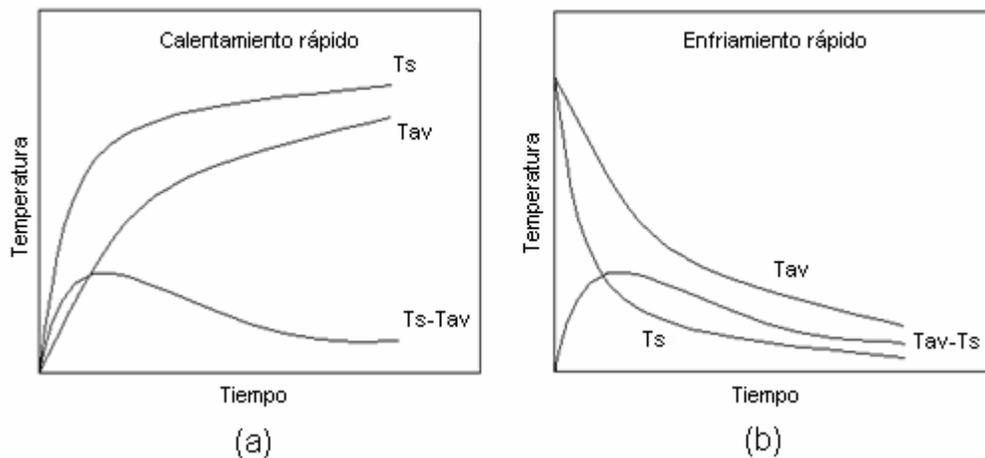
Los esfuerzos térmicos además pueden desarrollarse en ausencia de gradientes térmicos. Por ejemplo, la expansión libre de un cilindro hueco calentado uniformemente puede ser impedida por *restricciones externas* (segundo caso) tales como un marco externo, originándose así esfuerzos compresivos [2].

## 2.2 Esfuerzos y deformaciones térmicas transitorias.

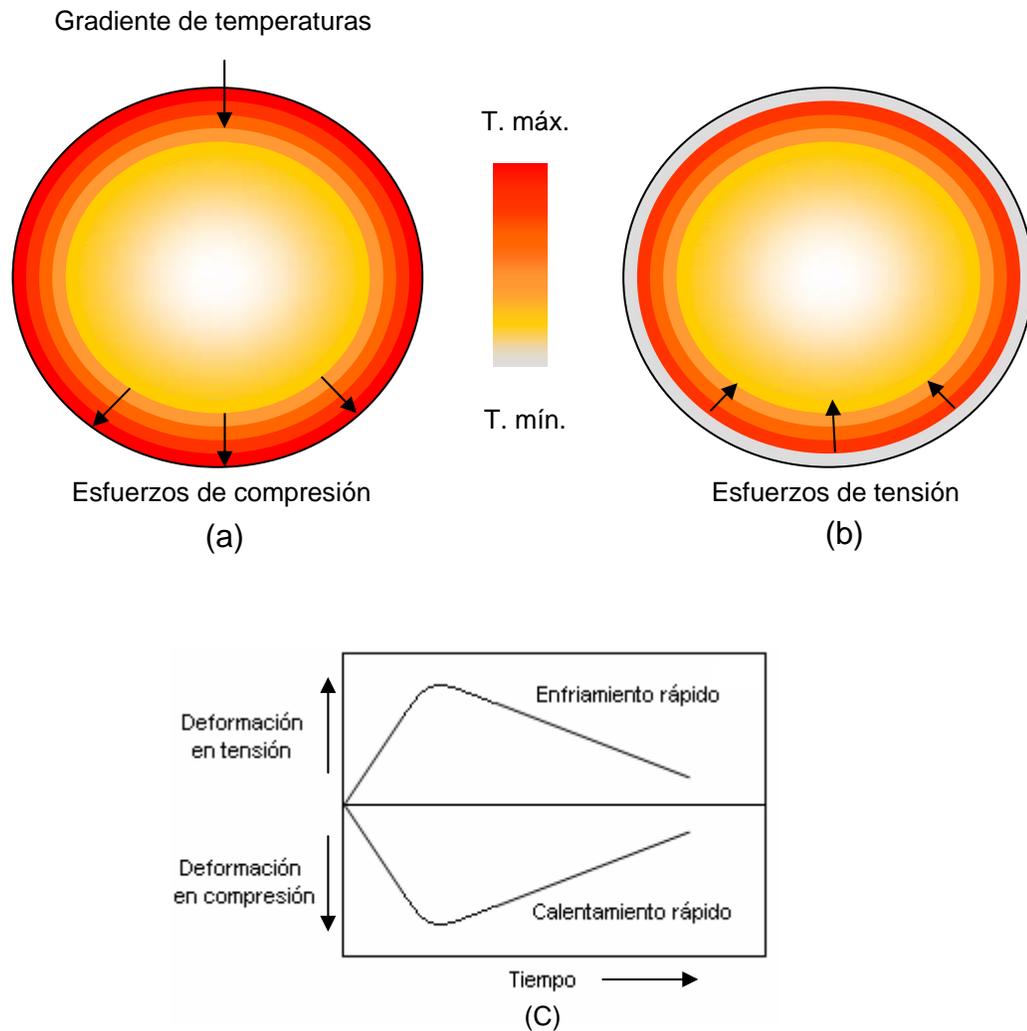
### 2.2.1 Por deformación.

#### **Restricción interna (modelo de cuerpo sólido).**

En cualquier instante, la deformación y el esfuerzo en un cuerpo sólido sujeto a diferencias térmicas son determinados por la distribución de temperatura. Durante un calentamiento rápido, la temperatura de las capas de la superficie ( $T_s$ ) se alcanza rápidamente, mientras la temperatura promedio ( $T_{av}$ ) del cuerpo se eleva más lentamente (Figura 2.1 (a)). De manera inversa durante un enfriamiento rápido, la temperatura de la superficie ( $T_s$ ) cae rápidamente y mientras la temperatura promedio ( $T_{av}$ ) disminuye más lentamente (Figura 2.1 (b)). A cualquier tiempo dado la diferencia entre la temperatura superficial y la temperatura promedio es una medida del gradiente térmico experimentado en la superficie. El valor de la diferencia de temperaturas superficial ( $T_s$ ) y promedio ( $T_{av}$ ), representado por la curva " $T_s-T_{av}$ " para la etapa de calentamiento (Figura 2.1 (a)) y " $T_{av}-T_s$ " para la etapa de enfriamiento (Figura 2.1 (b)), aumenta rápidamente a un máximo y luego decae con el tiempo [2, 8].



**Figura 2.1** Temperaturas transitorias producidas durante el rápido calentamiento y el rápido enfriamiento sobre una aleación metálica [2].



**Figura 2.2** (a) Cuerpo cilíndrico expuesto a calentamiento. Se indica la dirección de los esfuerzos de compresión originados por las subcapas, al restringir la expansión térmica de la superficie. (b) Se indica la dirección de los esfuerzos de tensión originados por las subcapas, al limitar la contracción de la superficie al ser enfriada. (c) Deformaciones producidas durante el calentamiento rápido y el enfriamiento rápido [2].

Durante el calentamiento rápido las deformaciones en la superficie son compresivas, las capas superficiales tienden a expandirse más rápidamente que las capas que están inmediatamente hacia el interior, pero la expansión es restringida por el volumen interno (subcapas) resultando en esfuerzos y deformaciones compresivos (Figura 2.2 (a)). De manera inversa, en un enfriamiento rápido, las capas superficiales tratan de contraerse pero son restringidas por el interior produciendo esfuerzos y deformaciones tensiles

(Figura 2.2 (b)). En la Figura 2.2 (c) se muestran las deformaciones originadas en compresión por los calentamientos rápidos, así como en tensión por enfriamientos repentinos [8].

La deformación térmica  $\varepsilon_{th}$  es el producto de la diferencia entre  $T_{av}$  y  $T_s$  y el coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ) del material sobre el intervalo de temperaturas desde  $T_s$  hasta  $T_{av}$  [9].

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T_{av} - T_s) \quad (2.1)$$

Donde el valor del coeficiente de expansión térmica sobre el rango de temperaturas es expresado como [9]:

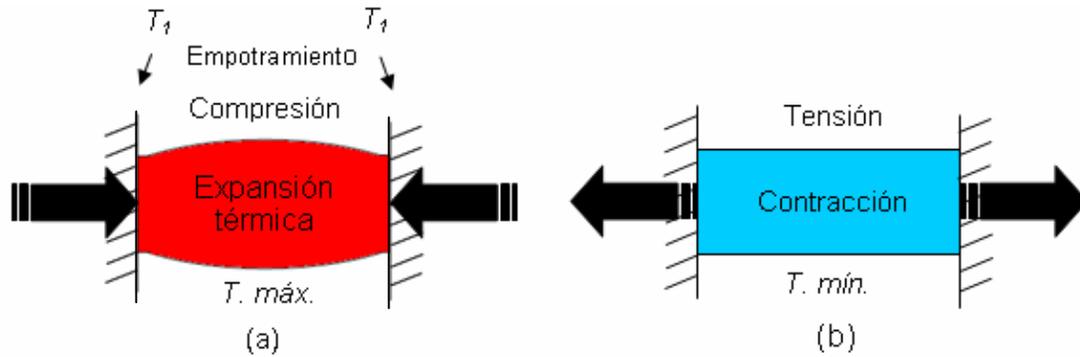
$$\alpha = \frac{1}{T_{av} - T_s} \int_{T_s}^{T_{av}} \alpha(T) dT \quad (2.2)$$

La fatiga en metales puede ser dividida en altos ciclos ( $10^5$  -  $10^8$  ciclos) y en bajos ciclos ( $1/4$  -  $10^5$  ciclos). El daño por fatiga térmica comúnmente sucede a bajos ciclos, por lo tanto, esto proporciona una indicación de que ocurre deformación plástica en cada ciclo térmico. Es difícil obtener la falla de un material dúctil inducido por un solo ciclo de esfuerzos térmicos. La deformación debido a fatiga térmica es causada cuando se presenta cedencia cíclica o flujo plástico repetitivo [10, 11].

## 2.2.2 Por desplazamiento.

### **Restricción externa (modelo de barra empotrada).**

El proceso de flujo plástico ha sido ilustrado por Coffin y Manson usando un modelo simple [2]. Una barra calentada a una temperatura máxima uniforme  $T_2$  (T. máx.), se encuentra empotrada rígidamente entre 2 placas fijas las cuales conservan una temperatura constante de  $T_1$ , Figura 2.3 (a). Posteriormente dicha barra es enfriada repentinamente a una temperatura mínima (T. mín.) como se muestra en la Figura 2.3 (b), resultando en una deformación térmica de magnitud  $\alpha\Delta T$ , donde  $\Delta T = T_2 - T_1$  [2].



**Figura 2.3** (a) Esquema de una barra calentada a una temperatura máxima ( $T_2$ ) empotrada entre dos placas a una temperatura constante ( $T_1$ ), (b) enfriamiento de barra a una temperatura mínima [2].

Las placas evitan la contracción de la barra, por lo tanto generan esfuerzos de tensión en la misma (Figura 2.3 (b)). De esta manera se produce una deformación mecánica de igual magnitud que la deformación térmica pero opuesta en signo. Suponiendo que los efectos térmicos son suficientes para producir la deformación plástica de la barra, la deformación total ( $\varepsilon_T$ ) contiene las componentes de deformación elástica ( $\varepsilon_e$ ) y plástica ( $\varepsilon_p$ ), representadas por las siguientes ecuaciones [2, 12]:

$$\varepsilon_p = \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad (2.4)$$

$$\alpha \Delta T = \varepsilon_T = \varepsilon_p + \varepsilon_e \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_T = \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}} + \frac{\sigma}{E} \quad (2.6)$$

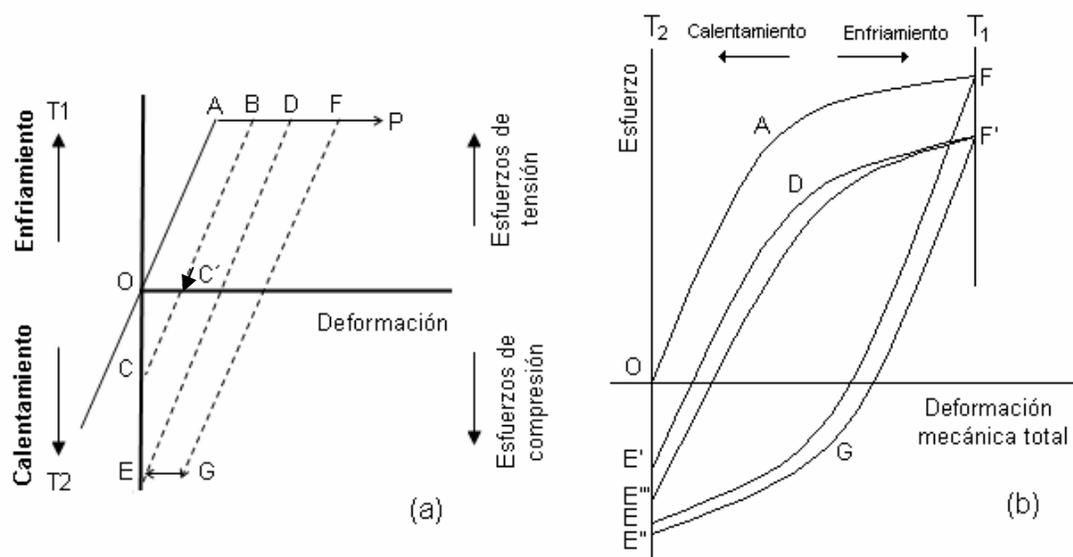
Donde:

K: coeficiente de endurecimiento por deformación.

n: exponente de endurecimiento por deformación.

$\sigma$ : esfuerzo total producido.

La cantidad de la deformación plástica y la magnitud de los esfuerzos térmicos dependen de la restricción volumétrica, de la magnitud de  $\alpha\Delta T$  y de las propiedades mecánicas del material.



**Figura 2.4** Ciclo de histéresis para una barra empotrada calentada y enfriada [2].

En la Figura 2.4 se muestra un ciclo de histéresis de las deformaciones que se producen cuando una barra empotrada es calentada y enfriada. Si  $\alpha\Delta T$  es menor o igual que la deformación de OA no ocurrirá flujo plástico, y cuando la temperatura subsecuentemente se incrementa a  $T_2$ , los esfuerzos se reducirán a cero. Si la deformación térmica es igual a la de B (Figura 2.4 (a)), los esfuerzos desarrollados serán igual al esfuerzo de cedencia y se obtiene flujo plástico AB (suponiendo plasticidad ideal es decir, cedencia a esfuerzo constante) durante el enfriamiento rápido. Cuando la temperatura nuevamente se incrementa a  $T_2$ , la condición de la barra se representa por el punto C, es decir, cero deformación y esfuerzo de compresión OC, debido a que la longitud de la barra se ha incrementado por el flujo plástico en tensión AB, durante el ciclo previo de enfriamiento. Para ciclos subsecuentes entre C y B no hay un flujo plástico adicional involucrado, lo cual resulta en una condición elástica reversible [9].

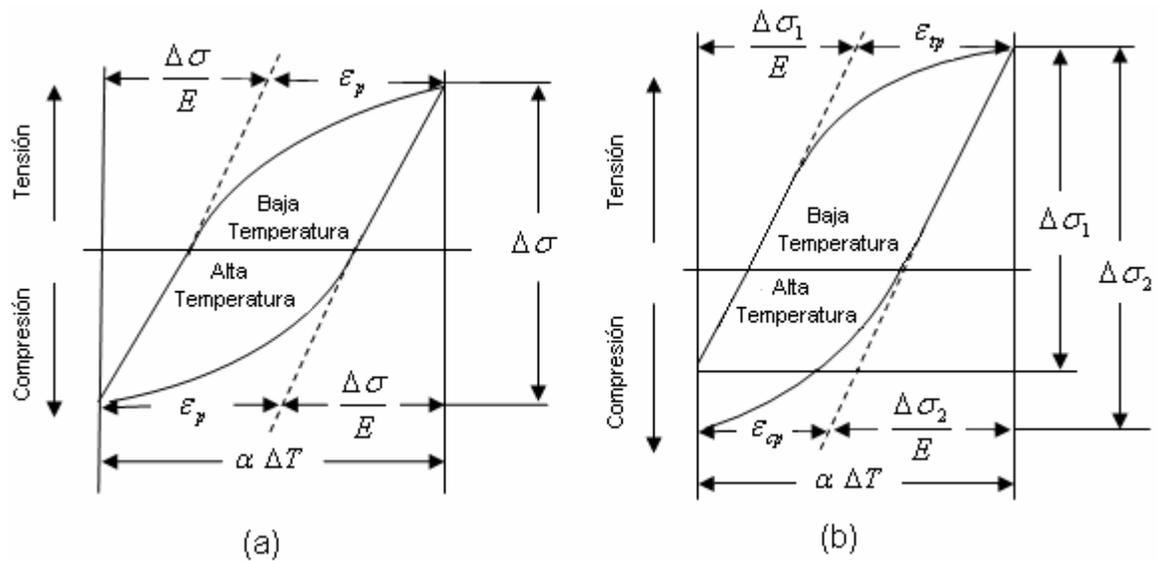
Si  $\alpha\Delta T$  produce una deformación térmica AD, es decir, dos veces la deformación elástica (Figura 2.4 (a)), entonces el ciclo ocurre entre el punto de cedencia en compresión y el punto de cedencia en tensión sin más flujo plástico. Cuando la deformación térmica es mayor al doble de la deformación elástica, se desarrolla flujo plástico AF durante el rápido enfriamiento inicial. Durante calentamientos subsecuentes, la barra se descarga elásticamente hasta G y fluye plásticamente en compresión al trayecto GE en  $T_2$ . Durante el segundo y los siguientes ciclos, se alterna el flujo plástico en tensión DF y en compresión GE, lo cual produce finalmente la falla sobre la barra [9].

Una condición más realista para el mismo modelo de la barra sujeta a  $T_2$ , está expresada por el ciclo esfuerzo/deformación ilustrado en la Figura 2.4 (b), el cual incluye endurecimiento por deformación (es decir, incremento de los esfuerzos por deformación después de la cedencia), el efecto Bauschinger (el flujo plástico en una dirección reduce el esfuerzo al cual ocurrirá la cedencia en la dirección opuesta) y la relajación de esfuerzos en  $T_2$  (los esfuerzos en E son relajados a E' si el tiempo de sostenimiento es suficientemente prolongado). Después de unos ciclos el lazo de histéresis tiende a estabilizarse como se muestra en la Figura 2.4 (b) [2].

Manson [2] hace referencia a la naturaleza híbrida de la deformación plástica por ciclo (ecuación 2.7), una parte de esto ocurre a altas temperaturas, otra parte a bajas temperaturas, otra depende del tiempo y una parte más es independiente del tiempo, resultando en ambos desplazamientos y flujos de fronteras de grano:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_T - \varepsilon_e = \alpha(\Delta T) - \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (2.7)$$

Esta relación es válida sólo en casos simples (Figura 2.5 (a)) donde E está a temperatura constante y donde el tiempo de sostenimiento en  $T_2$  es insuficiente para que ocurra una relajación de esfuerzos por termofluencia (*creep*). Manson [2] muestra que si ocurre termofluencia, la deformación plástica en las partes con tensión y compresión del ciclo debe ser calculado de manera individual (Figura 2.5 (b)).



**Figura 2.5** Ciclo de histéresis para el modelo de barra: (a) sin relajación en  $T_2$ , (b) relajación presente en  $T_2$  [2].

Estos dos modelos, ((1) modelo de cuerpo sólido en el cual esfuerzos térmicos superficiales se han desarrollado como resultado de la restricción del volumen interno, y (2) modelo de la barra donde los esfuerzos térmicos son resultado de restricciones externas), son típicos no sólo para los componentes y estructuras que experimentan fallas debido a fatiga térmica, sino también para el desarrollo de técnicas experimentales con la finalidad de estudiar el comportamiento de este mecanismo de falla.

### 2.3 Factores que influncian la fatiga térmica.

Revel y coautores [3] mencionan algunos de los factores que determinan la intensidad del daño por fatiga térmica tales como: a) los parámetros de proceso (el nivel máximo de temperatura, la amplitud de los ciclos térmicos y la frecuencia de los ciclos térmicos), b) los parámetros del material tales como, parámetros físicos (dilatación, conductividad y difusividad) y además la posible evolución microestructural del material dentro de un intervalo de temperatura (esta evolución puede ser: envejecimiento, oxidación, precipitación de carburos y transformaciones de fase) y finalmente, c) diferentes propiedades térmicas y mecánicas de cada material en una estructura multimaterial.

La resistencia a la fatiga térmica en aleaciones metálicas es considerablemente influenciada por las propiedades físicas y mecánicas del material. Las más importantes de estas son el coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ), la conductividad térmica ( $k$ ) y la resistencia de el material a una deformación alternada ( $\pm \varepsilon = \alpha \Delta T$ ). Cuando la deformación térmica es resultado de un material con restricción volumétrica, la conductividad térmica ( $k$ ) no presenta dominio en esta deformación; por otro lado, cuando la deformación térmica es una consecuencia de gradientes térmicos resultados de calentamientos o enfriamientos rápidos, una alta conductividad puede reducir los gradientes y por lo tanto la deformación térmica. Esta condición existe cuando la razón de calentamiento no es tan alta que las capas superficiales del espécimen alcanzan su máxima temperatura antes de que algún cambio significativo de temperatura pueda ocurrir en el cuerpo del material. Así, dependiendo de las condiciones, cualquiera de los parámetros  $\varepsilon/\alpha$  o  $k\varepsilon/\alpha$  pueden ser usados como un indicador de resistencia a la fatiga térmica [8].

Por ejemplo, el parámetro de  $k\varepsilon/\alpha$  es aplicado en las condiciones de vaciado en moldes de fundición [8], el cual se define aquí como K:

$$K = k\varepsilon/\alpha \quad (2.8)$$

$\varepsilon$  es dada por el modulo de elasticidad  $E$  y la resistencia a la fatiga a temperaturas promedio  $\sigma_f$ :

$$\varepsilon = \sigma_f / E \quad (2.9)$$

Por lo tanto en este proceso es posible obtener la resistencia a la fatiga térmica mediante:

$$K = \frac{\sigma_f k}{\alpha E} \quad (2.10)$$

Para valores altos de  $K$  se indica buena resistencia a la fatiga térmica. Stephens [12], Hayashi y coautores [13] señalan que la resistencia de una aleación metálica a temperaturas elevadas se reduce debido a que el esfuerzo de cedencia y la resistencia a la tensión tiende a decrecer con el incremento de temperatura, esta razón de reducción se incrementa después de exceder una cierta temperatura de acuerdo al material. Como resultado, bajos niveles de esfuerzo son suficientes para que ocurra deformación plástica. Alta conductividad térmica produce bajos gradientes térmicos y por lo tanto un decremento en los esfuerzos entre la superficie y las subcapas, reduciéndose de esta manera el fenómeno de fatiga térmica. Así mismo a bajos valores del modulo de elasticidad y del coeficiente de expansión térmica se producen bajos esfuerzos. Un bajo módulo de elasticidad resulta en bajos esfuerzos con un nivel de deformación dado por la Ecuación 2.9. Cuando las capas superficiales están a temperaturas variables, resultan diferencias en la expansión entre las capas y las subcapas, y por lo tanto se incrementa la tendencia al agrietamiento. Valores bajos del coeficiente de expansión térmica reducen la cantidad de expansión entre la superficie y las subcapas. Además, una alta conductividad térmica reduce el gradiente de temperaturas y la diferencia en expansión entre las capas [8].

La temperatura es un factor importante en la resistencia a la fatiga térmica en los metales ya que propiedades mecánicas como esfuerzo de cedencia, módulo de Young, razón de Poisson y el coeficiente de expansión térmica están en función de sus valores [14]. Así mismo, la dureza es una propiedad que está en función de la temperatura. A altas temperaturas es también deseable poseer alta dureza debido a que ésta previene que se suavice la superficie del material. A altas temperaturas la superficie pierde resistencia y dureza las cuales disminuyen la resistencia a la fatiga térmica. Sin embargo una muy alta dureza reduce la tenacidad del material y esto puede propiciar agrietamiento [8]. Con respecto a la temperatura se han encontrado, a distintos valores, cambios en la profundidad y densidad de grietas. En la experimentación realizada por Pellizzari y coautores [15], en la cual se realizaron dos pruebas con diferente temperatura máxima (700 y 900 °C), se encontró que los más altos valores de longitud promedio de grietas fueron observados a la temperatura más alta (900 °C), mientras que valores más altos de densidad de grieta son observados a la temperatura más baja (700 °C).

El tratamiento térmico es también un factor capaz de modificar la resistencia a la fatiga térmica. Dobrazánski y coautores [16] reportan durante sus pruebas elaboradas en aceros para trabajo en caliente, que los parámetros de tratamiento térmico tienen un importante efecto en la fatiga térmica. En estas pruebas se reportó que la temperatura de austenización en el rango investigado tiene un efecto más pequeño sobre el desarrollo del agrietamiento térmico, teniendo una mayor importancia la temperatura de revenido. Se demostró además, para este estudio en particular, que el aumento en la temperatura de austenización disminuye ligeramente el crecimiento en la profundidad y ancho de grietas, mientras que el incremento en la temperatura de revenido puede llegar a aumentar la profundidad y ancho de las grietas durante los ciclos térmicos.

Si bien la resistencia térmica es una función de la composición, microestructura y propiedades mecánicas de cualquier material, muchos investigadores han reportado solo el efecto de la variación en composición química unidos con el método de manufactura y tratamiento térmico. El uso general de los resultados es limitado porque el mérito relativo de materiales de diferente composición, varía con las condiciones de la prueba,

es decir la relación de los esfuerzos/deformación/temperatura/tiempo asociado con la prueba, particularmente a valores altos del ciclo de temperatura y a la magnitud de una carga superimpuesta [2]. Jiang y coautores [6] realizaron pruebas variando la composición química de un acero grado herramienta, observando mejora en la resistencia a la fatiga térmica ya que se obtuvo una reducción en la oxidación, se perdió menor dureza y se encontró un decremento en la profundidad y ancho de grieta.

El comportamiento de la fatiga térmica en los materiales es dependiente además de la resistencia a la iniciación y propagación de grietas. De acuerdo a Jiang y coautores [6], a nivel microestructural, durante los ciclos térmicos, el movimiento de dislocaciones puede generar un gran número de vacancias, las cuales se congregan en las fronteras de grano por la interacción de la temperatura y los esfuerzos térmicos formando micro grietas. Por otra parte, cuando el coeficiente de expansión térmica y el módulo de elasticidad de inclusiones son diferentes a los de la matriz, resulta en concentraciones de esfuerzos en la interfase entre la inclusión y la matriz durante los ciclos térmicos [6,12]. Al mismo tiempo, se pueden presentar dislocaciones alrededor de las inclusiones las cuales inducen una concentración de esfuerzos. Con la acción mutua de estos dos tipos de concentradores de esfuerzos, las partículas son separadas de la matriz por las micro grietas originadas en la interfase entre inclusión y matriz [6].

La microestructura es importante no sólo porque determina el nivel de resistencia y ductilidad de un material antes y durante la exposición a condiciones de servicio, sino porque también influye a la resistencia de factores secundarios como corrosión que pueda nuclear o incrementar el rango de propagación de las grietas por fatiga térmica. El efecto microestructural en la resistencia térmica al igual que la composición química está estrechamente relacionado con las condiciones de prueba. La pérdida de resistencia y ductilidad en el límite del grano es frecuentemente responsable de una falla por fatiga térmica. Termofluencia (*Creep*), esfuerzo a la ruptura y las propiedades de fatiga mecánica son influenciadas por el tamaño del grano. Clark y Freeman [2] estudiaron la influencia del tamaño del grano a altas temperaturas y concluyeron que las estructuras de grano fino muestran alto esfuerzo de cedencia y ductilidad en pruebas de tensión. Por

otra parte Muscatell [2] encontró que fundiciones de grano grueso y los aceros inoxidable forjados son apreciablemente inferiores en resistencia a la fatiga térmica a los de forja de grano fino con material de la misma composición. Los resultados dados por Betteridge [2] de las pruebas de fatiga térmica en aleaciones metálicas preparadas por nueve diferentes tratamientos térmicos indicaron que el material de grano fino dio resistencias más altas que el grano grueso.

La selección del material adecuado, en aplicaciones que involucran el fenómeno de fatiga térmica, depende del rango de propiedades y de su necesaria optimización.

## Referencias

1. Weroncki A. and Hejwowski T., "Thermal Fatigue of Metals", Technical University of New York, N.Y., Mercel Dekker, Inc., 1991 pp *iii, iv*.
2. Glenny E., B. Sc., F.I.M., "Thermal Fatigue", Metallurgical Reviews, Institute of Metals, London, 1961, Vol. 6, No. 24, pp 387-399.
3. Revel P., Kircher D. and Bogard V., "Experimental and numerical simulation of a stainless steel coating subjected to thermal fatigue", Materials Science and Engineering, A290, 2000, pp 25-32.
4. Spera D. A., "What is Thermal Fatigue: Thermal Fatigue of Materials and Components", STP 612, ASTM, Philadelphia, 1976, pp 3.
5. Blazevic D. T., "Hot Strip Mill Operations", Hot Rolling Consultants, Homewood, Illinois, LTD, 1994, Vol. 3, No IX, 1-8.
6. Jiang Q.C., Sui H. L. and Guan Q. F., "Thermal fatigue behavior of new type high-Cr cast hot work die steel," ISIJ International, 44, 12, 2004, pp1103-1107.
7. Kerezsi B. B., Price J. W. H. and Ibrahim R. N., "Using S-N curves to analyze cracking due to repeated thermal shock", Journal of Materials Processing Technology, 145, 2003, pp 118-125.
8. Wallace J. F., Wang Y. and Schwan D., "Effect of composition and processing on the thermal fatigue and toughness of high performance die steels", Final Report, Case Western Reserve University, USA, 1997, pp 38-41.
9. Malm S. and Norstrom L. A., "Material-related model for thermal fatigue applied to tool steels in hot-work applications", Metal Science, Vol. 13, No. 9, 1979, pp 544, 545.
10. Mercado-Solis R. D., "Simulation of thermal fatigue in hot mill works rolls", PhD Thesis, The University of Sheffield, UK, 2002, pp 43-44.
11. Yates J. R., "Fatigue of Engineering Materials", Lecture notes, Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield, UK, 1999.
12. Stephens R. I., Fatemi A., Stephens R. R. and Fuchs H. O., "Metal Fatigue in Engineering", Wiley-Interscience, 2<sup>nd</sup> Ed., New York, N.Y., 2001, pp 96-97.

13. Hayashi M., Enomoto K., Saito Y. and Miyagawa T., “Development of thermal fatigue testing apparatus with BWR water environment and thermal fatigue strength of austenitic stainless steels”, Nuclear Engineering and Design, 184, 1998, pp113-122.
14. Kudo Y., Kikuchi K. and Saito M., “Thermal fatigue crack propagation behavior of F82H ferritic steel”, Journal of Nuclear Materials, 307-311, 2002, pp 471-474.
15. Pellizzari M., Molinari A. and Straffelini G., “Thermal fatigue resistance of plasma duplex-treated tool steel”, Surface and Coating Technology, 142-144, 2001, pp 1109-1115.
16. Dobrazánski L.A., Mazurkiewicz J., Hajduczek E. and Madejski J., “Comparison of thermal fatigue resistance and structure of the 47CrMoWTiZr16-26-8 hot-work tool steel with X40CrMoV5-1 type one”, Journal of Materials Processing Technology, 113, 2001, pp 530-531.

## **CAPÍTULO 3**

# **METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE FATIGA TÉRMICA**

### **3.1 Introducción.**

Algunos investigadores, notablemente Manson, Northcott, Baron y Holmberg, entre otros [1], han publicado revisiones especializadas que indican la diversidad de aplicaciones en las cuales la fatiga térmica es el principal factor responsable del término de vida de los componentes. Este mecanismo de falla puede manifestarse en herramientas, componentes y procesos. Existen distintas situaciones entendidas como fatiga térmica, algunas de las cuales son mencionadas a continuación.

1.- Aquellos productos terminados que se encuentran sujetos a fatiga térmica en su operación, donde los beneficios del diseño y manufactura deben aparecer con un incremento en la fiabilidad y eficiencia contra este mecanismo de falla [2]:

- Cabezas, pistones y válvulas de motores de combustión interna, donde cargas de fatiga térmica son inducidas con picos de temperatura, al calentarse y enfriarse durante el ciclo de combustión [3].
- Discos y tambores de frenos de transporte pesado y vehículos de carreras, al calentarse por contacto en la aplicación de la zapata (balata) y posteriormente enfriarse por el aire del medio.
- En las soldaduras de tubería de refinería de aceite y plantas nucleares, debido al flujo periódico de aceite y agua caliente, así como tuberías frías y de calderas por la circulación de fluido a alta temperatura [4].
- Componentes de hornos y accesorios para tratamiento térmico al sufrir ciclos térmicos variables.
- Componentes como alabes y rotores en turbinas de gas y reactores nucleares son dañados por rápidos calentamientos y enfriamientos ocurridos respectivamente durante los periodos de arranques y paros en el proceso [1, 4, 5].
- Problemas extremos de fatiga térmica en misiles, satélites y aeronaves al entrar a la atmósfera, la energía cinética, debido a la velocidad es transformada en calor, parte del cual es absorbido por la estructura provocando gradientes térmicos. En vuelos de alta velocidad el fuselaje está sujeto a calentamientos aerodinámicos, que al igual provocan gradientes térmicos a nivel superficial. Así mismo, se involucran componentes de sus turbinas debido a la exposición a altas temperaturas de operación [1, 6].

2.- Herramientas manufacturadas que se encuentran sujetas a fatiga térmica, donde los costos de producción para éstas deben ser minimizados. Las herramientas consideradas en general incluyen:

- Rodillos de laminación en caliente, herramientas de forja, de extrusión y dados, sufren daños debido a los ciclos térmicos desarrollados durante el contacto con planchones o lingotes a altas temperaturas y posteriores enfriamientos en la superficie para evitar distorsiones por las altas temperaturas [1, 7, 8].
- Moldes de fundición, en los cuales se generan fluctuaciones cíclicas de temperatura en el proceso [9].

El agrietamiento por fatiga térmica ocurre en estos componentes como resultado de calentamientos rápidos y enfriamientos repentinos sobre las capas superficiales, todos resultando comúnmente con deformación plástica y esfuerzos asociados de origen térmico. Es por lo tanto de vital importancia considerar la fatiga térmica en el diseño de procesos y componentes.

En los distintos trabajos realizados sobre el estudio de la fatiga térmica los resultados obtenidos han sido aproximados ya que comúnmente este fenómeno se desarrolla en presencia de otros mecanismos de falla, manifestándose usualmente de una manera no aislada. La fatiga térmica es un mecanismo complejo de falla que involucran esfuerzos y deformaciones en paralelo con la temperatura y el tiempo. Estos pueden ser reproducidos y medidos por el desarrollo de un método de pruebas para su estudio [10].

Los siguientes pasos son utilizados para minimizar los efectos del mecanismo de falla por fatiga térmica [2]:

- 1.- Definir el problema.
- 2.- Especificar las condiciones de trabajo.
- 3.- Diseñar un procedimiento experimental para simular los factores críticos.

4.- Realizar las pruebas para determinar los efectos de los ciclos térmicos en el material y de esta manera clasificar los materiales candidatos.

5.- Finalmente perfeccionar o mejorar el proceso, componente o condiciones de trabajo.

El desarrollo de metodologías para pruebas de fatiga térmica es de gran utilidad ya que hace posible [2]:

- Obtener un mayor entendimiento de la naturaleza del proceso de la fatiga térmica.
- Estudiar aspectos particulares del diseño de componentes utilizados en aplicaciones futuras que involucran fatiga térmica.
- Comparar el desempeño de materiales en condiciones operativas simuladas para predecir consecuencias del reemplazo de un material por otro.

### 3.2 Metodologías para la evaluación del comportamiento a la fatiga térmica.

La utilidad de los componentes comúnmente puede ser estimada calculándose solo bajo determinadas condiciones de operación o servicio. Sin embargo en ciertos casos, el costo para el diseño de diferentes componentes y materiales impide utilizarlos en pruebas preliminares. Por lo tanto, es conveniente realizar pruebas de simulación para evaluar el desarrollo y comportamiento de éstos, como guía del funcionamiento en servicio [11].

La ventaja de contar con equipo a nivel laboratorio para pruebas de fatiga térmica es evidente ya que podría proveer información elemental, desafortunadamente, situaciones como la selección del método de calentamiento o enfriamiento es comúnmente arbitrario, siendo influenciado más por la necesidad de una prueba rápida que por las minuciosas consideraciones requeridas para una prueba que simule o se aproxime al proceso. Algunos investigadores están limitados debido a la restricción en el alcance de las condiciones de prueba, o la falta de información acerca de las variables gobernantes, como las involucradas en la medición del número de ciclos a falla. La razón de

transferencia de calor o la razón de cambio en las temperaturas no son comúnmente determinadas, sólo el tiempo total en alcanzar las temperaturas conocidas ( $T_2$  o  $T_1$ ). Los esfuerzos transitorios y las deformaciones son raramente medidas, principalmente debido a la considerable dificultad que involucra el rápido cambio de temperaturas a través de la sección del cuerpo [1].

Una de las dificultades encontradas considerando la fatiga térmica en práctica, es que con poca frecuencia se conoce la forma precisa de la carga del ciclo térmico de algún componente en particular, de hecho lo comúnmente conocido es el intervalo aproximado de variaciones térmicas en la superficie. Esto debería, en cambio, ser traducido a través de variaciones térmicas, esfuerzos y deformaciones que se generen en el cuerpo del componente, por debajo de la superficie. Usualmente se necesitan de considerables estudios experimentales para obtener el verdadero perfil de temperaturas que se desarrolla a través del cuerpo de un componente. El cálculo de los esfuerzos térmicos y las deformaciones requieren un conocimiento detallado de las propiedades del material, las cuales tienden a cambiar a través del incremento en el número de ciclos térmicos, es por esto que la información obtenida es más o menos aproximada [2]. Sólo pocos investigadores han considerado necesario calcular aproximadamente los ciclos con relaciones de esfuerzo-deformación. Consecuentemente, pocos intentos se han realizado para entender éste mecanismo de falla [1].

A pesar de estas limitaciones, muchas investigaciones han contribuido a incrementar el entendimiento del problema, sin llegar en la mayoría de los casos, a la aplicación específica que simule el trabajo. Los detalles esenciales de algunas de las pruebas técnicas reportadas en la literatura para la evaluación del comportamiento a la fatiga térmica de diversos materiales y componentes, se presentan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Condiciones y características de técnicas utilizadas en el estudio de fatiga térmica [1].

Aplicación	Especimen o componente	Material	Método de calentamiento	T <sub>2</sub> (°C)	t <sub>2</sub> (seg)	Método de enfriamiento	T <sub>1</sub> (°C)	t <sub>1</sub> (seg)	Restricción externa (%)	Carga externa (lb./in <sup>2</sup> )	Criterio de falla	Autor(es)
Turbina de gas	Alabe del rotor, turbina J47	S816; M252	Pruebas en motor. Gases calientes. (ciclos típicos, inicio normal)	816	8-10	Aire frío (paro normal)	~20	N.E.	0	0-6720 6720-0 (inicio/paro normal)	1er grieta observada	Johnston, Weeton, Isignorelli
	Alabe del rotor, turbina J33	Udimet500; Inconel713c; B&B; Sel 1	Pruebas en motor. Gases calientes (inicio normal/ razón de vel.)	816/ 260/ 927	8-10/ 300/ 900	Aire frío (paro normal)	~20	N.E.	0	0/ 2000/ 13000	1er grieta observada	Johnston, Weeton, Isignorelli
	Tobera hueca	GMR235	Pruebas en motor. (inicio/razón de velocidad)	900	N.C.	Cerrado	N.C.	N.C.	0	20,000 a razón de vel.	1er grieta observada	Gyorgak, Johnston, Weeton,
	Tobera sólida	Fundición de aleaciones base cobalto	Gas caliente (propano/aire)	1150	55	Inyección de aire frío	250	26	0	0	1er grieta observada	Detmas
	Alabe de turbina	Fundición de acero austenítico	Gases calientes (gas/baja presión de aire)	927	290	Inyección de aire frío	20	10	0	0	1er grieta observada	Johnston
					850/ 900	90	Aire alta presión	200	30	0	0	1er grieta observada y grado de distorsión

N. C.: No Citado N. E.: No Especificado

**Tabla 3.1** Condiciones y características de técnicas utilizadas en el estudio de fatiga térmica [1]. (Continuación)

Aplicación	Espécimen o componente	Material	Método de calentamiento	T <sub>2</sub> (° C)	t <sub>2</sub> (seg.)	Método de enfriamiento	T <sub>1</sub> (° C)	t <sub>1</sub> (seg.)	Restricción externa (%)	Carga externa (lb./in <sup>2</sup> )	Criterio de falla	Autor(es)
Turbina de gas	Alabes de rotor o estator	Hierro, aleaciones base Ni y resist. al calor	Gases calientes mediante soplete gas/aire	900	60	Inyección de aire	N.C.	60	0	0	1er grieta observada	Gadd, Betteridge, Llewellyn
	Lámina	Nimonic 90	Gases calientes (Keroseno/aire)	920	120	Aire alta presión	120	120	0	0	1er grieta observada	Gienny, Taylor
	Cuña 0.030" en borde	Fundición de aleaciones base Co-Fe)	Horno	945	3600	Agua, sobre borde del espécimen	7	N.C.	0	0	1er grieta observada y grado de distorsión	Whitman, Hall, Yaker
	Cuña	Aleaciones de acero	Gases calientes mediante gas/aire alta presión	650/700; 850/900	60	Aire a temperatura ambiente	N.C.	180	0	0	Medición del grado de agrietamiento y distorsión	Bollenrath, Cornelius, Bungardt
	Cuña 0.025" en borde	Aleaciones base Ni-Co con resist. a termofluencia	Gases calientes gas/aire comprimido, calentamiento localizado etc.	Variable con material 860-927	145	Aire comprimido	~94	120	0	0	1er grieta observada y cierta profundidad de grieta	Luni
	Cilindro reducido en cuña con 0.030" en borde	Aceros y aleaciones resistentes al calor y termofluencia	Resistencias eléctricas	870;925; 982;1037; 1093	60	Inyección de aire en borde de cuña	N.C.	5	0	0	1er grieta a través de toda la sección	Hunter

N. C.: No Citado N. E.: No Especificado

**Tabla 3.1** Condiciones y características de técnicas utilizadas en el estudio de fatiga térmica [1]. (Continuación)

Aplicación	Espécimen o componente	Material	Método de calentamiento	T <sub>2</sub> (°C)	t <sub>2</sub> (seg.)	Método de enfriamiento	T <sub>1</sub> (°C)	t <sub>1</sub> (seg.)	Restricción externa (%)	Carga externa (lb/in <sup>2</sup> )	Criterio de falla	Autor(es)	
Turbina de gas	Cuña 0.030" en borde	Aleaciones base Ni-Co, acero inoxidable	Gases calientes (propano/aire), calentamiento localizado	870; 982; 1093	17	Aire comprimido en borde	25	3	0	0	1er grieta a través de toda la sección	Muscattell	
	Disco afilado, 0.020" espesor en borde	Aleación G64	Inmersión en fluido caliente	770;820; 870;920; 970;1020	75	Inmersión en fluido frío	20	75	0	0	1er grieta observada	Glenny, Taylor	
	Cilindro sólido, 0.019" diámetro	S816, Inconel 550,	Resistencias eléctricas	Variable 620-870	45	Flujo de agua continuo	94	45	100%	0	Fractura	Clauss, Freeman	
	Cilindro hueco, 0.030" espesor de pared	Fundición DMC, Udimet500	Resistencias eléctricas	500-927	N.C.	Inyección de aire en orificio	65 a 260	N.C.	100%	0	Fractura	Mohringer, Felgar	
	Lámina, 0.062" de espesor	Aleaciones base Co y Fe	Gases calientes (gas/aire comprimido)	650;732 816;870; 982	20	Aire	45	20	0	Esfuerzo tensión inicial 50%	Fractura	Lampson	
	Lámina 4"x4", con orificio central	Acero inoxidable, Inconel	Gases calientes (en el borde del orificio)	900	60	Inyección de aire en borde del orificio	50	60	0	0	0	1er grieta observada en el orificio	Lardge
	Tubo rotativo, 2" diámetro 5" longitud	Acero y aleaciones resistentes al calor	Chorro radial de gas	900/ 1080	300	Aire estático	N.C.	60	0	0	0	1er grieta observada o grado de distorsión	Haythorne

N. C.: No Citado N. E.: No Especificado

**Tabla 3.1** Condiciones y características de técnicas utilizadas en el estudio de fatiga térmica [1]. (Continuación)

Aplicación	Espécimen o componente	Material	Método de calentamiento	T <sub>2</sub> (°C)	t <sub>2</sub> (seg.)	Método de enfriamiento	T <sub>1</sub> (°C)	t <sub>1</sub> (seg.)	Restricción externa (%)	Carga externa (lb/in <sup>2</sup> )	Criterio de falla	Autor(es)
Planta de energía	Cilindro hueco, 0.020" espesor de pared	Acero inox. 347, Inconel	Resistencias eléctricas	T <sub>m</sub> =350, T <sub>2</sub> =variab.	N.C.	Inyección de aire en orificio	Variable	N.C.	100%	0	Fractura	Coffin, Swindeman, Douglas
	Cilindro hueco, 0.020" espesor de pared	Ti, Ni	Resistencias eléctricas	T <sub>m</sub> =302(Ti), T <sub>m</sub> =247(Ni), T <sub>2</sub> =variab.	N.C.	Inyección de aire en orificio	Variable	N.C.	84%(Ti) 74%(Ni)	0	Fractura	Majors
	Cilindro con costura, 10.75" diámetro 1.1" espesor	Acero austenítico y ferrítico	Vapor sobre calentado, a través del orificio	593	109 Hrs.	N.C.	20	N.C.	0	1500 Vapor a presión	Agrietamiento	Blazer, Eberle, Tucker
	Cilindro con soldadura de costura	Acero, Cr =18%, Ni =12%, Ti =0.05%	Vapor sobre calentado, a través del orificio	480/500	114	Agua en parte externa	N.C.	114	0	1500 Vapor a presión	1er grieta observada	Ratner
Armas	Sección central 0.050" borde	Acero al carbón, fundición de hierro	Inducción alta frecuencia En borde	Mas de 1150	1.3	Agua continua a través de sección	40	Variable	0	0	Grietas con tamaño definido 0.020" long. de grieta	Northcott, Baron
Ruedas de locomotora	Bloque rectangular	Acero bajo y alto carbón	Flama de gas en una cara	N.C.	13.5	Agua continua en cara opuesta	N.C.	50	0	0	1er grieta observada	Baron, Bloomfield Wetenkamp

N. C.: No Citado N. E.: No Especificado

**Tabla 3.1** Condiciones y características de técnicas utilizadas en el estudio de fatiga térmica [1]. (Continuación)

Aplicación	Especimen o componente	Material	Método de calentamiento	T <sub>2</sub> (°C)	t <sub>2</sub> (seg.)	Método de enfriamiento	T <sub>1</sub> (°C)	t <sub>1</sub> (seg.)	Restricción externa (%)	Carga externa (lb/in <sup>2</sup> )	Criterio de falla	Autor(es)
Herramientas para trabajo en caliente	Tubos con perforaciones para agua fría	Acero inoxidable aleado	Inducción alta frecuencia	Más de 1000	15	Flujo de agua continua por perforaciones	150	variable	0	0	Grietas con longitud definida	Radeker
	Cilindros hueco 0.32" de pared	Acero inoxidable, Aleaciones Nimonic	Inducción a media frecuencia	500, 690, 920	20 a 30	Flujo de agua continua por perforaciones	50 a 120	25-35	0	0	1er grieta observada	Eichhorn
	Cilindro 0.5" diámetro	Hierro, acero, aleaciones p/ turbinas	Flama de oxiacetileno en una cara	650, 950	8.5	Templado en agua	N.C.	N.C.	0	0	1er grieta a través de toda la cara	Ruddihough
Placas eléctricas calientes	Cilindro con y sin orificios longitudinales	Fundición de hierro	Horno	800	N.C.	Templado en agua	20	N.C.	0	0	1er grieta observada	Evans
Componentes de hornos	Disco plano 0.5" espesor, con orificios longitudinales	Aleaciones base Fe, Ni	Flama de gas por debajo del disco	870	600	Chorro de agua en área caliente	20	600	0	0	1er grieta, grado de deformación	Avery, Wilks
Moldes para fundición	Forma "L"	Hierro	Horno	1000	N.C.	Templado en agua	20	N.C.	0	0	1er grieta observada	Sumper
Moldes para vidrio	Cilindro 2" diámetro	Hierro	Horno	593	N.C.	Templado en agua	20	N.C.	0	0	1er grieta en la cara final	Bruckner, Czyzewski

N. C.: No Citado N. E.: No Especificado

**Tabla 3.1** Condiciones y características de técnicas utilizadas en el estudio de fatiga térmica. (Continuación)

Aplicación	Especímen o componente	Material	Método de calentamiento	T <sub>2</sub> (°C)	t <sub>2</sub> (seg.)	Método de enfriamiento	T <sub>1</sub> (°C)	t <sub>1</sub> (seg.)	Restricción externa (%)	Carga externa	Criterio de falla	Autor(es)
Moldes para fundición	Molde 2 x 2 x 7", hueco central (1.5 diámetro y 6.5" profundidad)	Acero H13	Por inmersión en aluminio fundido	635	12	Aspersión de agua-lubricante externo, flujo de agua interno	93	24	0	0	Promedio de long. máxima de grieta y área total de agrietamiento	Wallace, Wang, Schwam [9].
Conductos de recirculación	Probeta cilíndrica hueca y sólida de 10mm diám.	Aceros inoxidables 304 y 316	Sistema de recirculación de agua caliente	290	N.E.	Sistema de recirculación de agua fría	20 a 50	N.E.	Sujeto en extremos	0	Crecimiento de grieta, 1er grieta observada (10 <sup>6</sup> ciclos)	Hayashi, Enomoto, Saito, Miyagawa [4].
Prueba en muestras recubiertas	Cilindro hueco 200mm long. 80mm diám.	Acero ferrítico 25Cr4 con recubrimiento de X12Cr13	Inducción alta frecuencia	700	N.E.	Flujo de agua en el centro y aire comprimido exterior	40	N.E.	0	0	Medición de esfuerzo y deformación (250 ciclos)	Revel, Kircher, Bogard [12].
Herramientas para trabajo en caliente	Disco 70mm diám. x 6mm de espesor	Aceros 47CrMnVVTiCeZr16-26-8 y X40CrMoV5-1	Inducción alta frecuencia en mitad de circunferencia	600	1.2	Immersión de agua recirculando en mitad opuesta	100	1.3	0	0	El promedio y la máxima profundidad de grieta (5000 ciclos)	Dobrzanski, Mazurkiewicz, Hajduczek, Madejski [13].
Herramientas para trabajo en caliente (moldes y dados)	Disco N.E.	H11 (38Cr Mo V 51)	Inducción alta frecuencia	700 y 900	N.E.	Aspersión e inmersión de agua	40 y 70	N.E.	0	0	Densidad, profundidad promedio y máxima de grieta (120 ciclos)	Pelizzari, Molinari, Straffellini [14].
Pared de reactores de fusión	Lámina 5mm espesor, con muesca 0.5mm	Acero 9Cr-1W, 9Cr-1Mo y SS316	Haz de electrones	700	5	Flujo de agua	N.E.	25	100 % long.	0	Crecimiento de grieta en muesca (5000 y 10000 ciclos)	Kudo, Kikuchi, Saito [15].

N. C.: No Citado N. E.: No Especificado

**Tabla 3.1** Condiciones y características de técnicas utilizadas en el estudio de fatiga térmica. (Continuación)

Aplicación	Especímen o componente	Material	Método de calentamiento	T <sub>2</sub> (° C)	t <sub>2</sub> (seg)	Método de enfriamiento	T <sub>1</sub> (° C)	t <sub>1</sub> (seg)	Restricción externa (%)	Carga externa	Criterio de falla	Autor(es)
Equipos de estaciones térmicas	Rectángulo 300 x 65 x 10mm con muescas en V de 3.5mm	Acero al carbón grado AS 1548-7-430R	Horno de resistencia eléctrica	370	N.E.	Flujo de agua	25	7	100 % longitudinal	90Mpa	1er grieta observada en la muesca (Cada 500 ciclos)	Kerezi, Price, Ibrahim [16].
Pistones y cabezas de cilindros	Cilíndrico 10mm long. x 7mm diám.	AISI12CuMgNi, AISI10Mg0.3 y AISI10Mg0.6	Inducción alta frecuencia	N.E.	200/400	Aire a través de boquillas	50	N.E.	Restricción en forma triangular	0	Fractura del espécimen o al llegar a Nu = 10 <sup>4</sup>	Beck, Lang, Lohe [3].
Herramientas para trabajo en caliente (molde de vaciado)	Dado 12"x 6", cavidad 3"x 2"	Acero grado herramienta para trabajo en caliente	En aluminio fundido Horno	1200/1400	N.E.	Deposito de agua y con aire	25 aprox.	N.E.	100 % longitudinal	0	Dirección de agrietamiento y No. de ciclos a falla (1600/6400ciclos)	Srivastava, Joshi, Shrivpuri [17].
Herramientas para trabajo en caliente (molde para vaciado)	Cilíndro hueco 80mm long. x 10mm diám. x 3mm hueco	Acero grado herramienta para trabajo en caliente	Inducción alta frecuencia	600, 700, 850	0.2, 0.3, 2.2	Agua-acéte por hueco, aire-argón en superficie externa	170	11, 14, 24	0	0	Crecimiento de grieta y deformación generada hasta 20000 ciclos	Persson, Hogmark, Bergstrom [18].
Herramientas para trabajo en caliente	Disco N.E.	Acero grado herramienta DINX38 Cr Mo V 5-1.	Rayo láser, Potencia 1.8 Kw	1300	N.E.	N.E.	200	N.E.	0	0	Crecimiento de grieta y deformación generada.	Siller, Waldbauer, Ebner [19].
Dados de formado en caliente	Lámina 40x20x 2mm, muesca de 0.2mmx 6mm	Acero grado herramienta	Inducción a media frecuencia	650	75	Agua en recirculación	25	4	0	0	Medición de longitud y ancho de grieta 2000 ciclos	Jiang, Sui, Guan [20].

N. E.: No Especificado

### 3.3 Características de pruebas en fatiga térmica.

En las pruebas para fatiga térmica se emplean usualmente componentes o especímenes de tipo cilíndrico (sólido o hueco), con una sección que puede ser de longitud prolongada o corta dependiendo del tipo de prueba. Hayashi y coautores [4], en sus experimentos utilizan dos tipos de especímenes cilíndricos (sólido y hueco) con el fin de examinar la amplitud nominal de esfuerzos y el periodo de prueba con respecto a la geometría del espécimen. También han sido utilizados especímenes de tipo disco (sencillo o afilado, con uno o más orificios). Dobrazánski y coautores [13] desarrollaron un banco de pruebas que utiliza un espécimen en forma de disco de 70 mm x 6 mm de espesor, el cual rota a 25 rpm y es calentado mediante un inductor en la mitad de su circunferencia mientras la otra mitad es sumergida en agua para su enfriamiento. Así mismo se utilizan especímenes en forma de lámina (cinta, o un cuadro con o sin un orificio central) los cuales comúnmente emplean concentradores de esfuerzos, tales como perforaciones, orificios o cambios de sección en la geometría. Jiang y coautores [20] utilizaron un espécimen laminar de dimensiones 40 x 20 x 2 mm con una muesca de 0.2 mm de ancho y 6 mm de longitud para facilitar la iniciación y propagación de la grieta. Del mismo modo Kerezsi y coautores [16] utilizan en sus experimentos un espécimen laminar con dimensiones de 300 mm de longitud x 65 mm de ancho y 10 mm de espesor con tres muescas laterales en forma de “V” a intervalos de separación de 100 mm.

Generalmente los esfuerzos y deformaciones térmicas se originan de los gradientes de temperatura desarrollados a través de la sección por el calentamiento y enfriamiento externo. A menudo el calentamiento y enfriamiento son localizados en la orilla de una cuña o de un cilindro, o cuando no son uniformes debido a una geometría compleja. De manera excepcional el espécimen es intermitentemente calentado y continuamente enfriado [1]. Como ejemplo se tiene la experimentación realizada por Revel y coautores [12], quienes utilizaron un espécimen con dimensiones reducidas a 1/5 de un cilindro industrial, (longitud de 200 mm y diámetro de 80 mm) a una velocidad de rotación de 1.1 rpm. El cilindro es calentado mediante inducción a alta frecuencia y es enfriado en

la superficie con aire comprimido y en la parte interna a lo largo del eje mediante un flujo de agua. Los parámetros que permiten ajustar los ciclos de temperatura experimental a ciclos industriales son: velocidad de rotación, flujo de corriente inducida en la superficie del cilindro y los flujos de enfriamientos de aire y agua. El intervalo de temperaturas fue establecido para ser similar a casos típicos industriales: en la superficie  $180 \leq T \leq 500$  °C; a una profundidad de 2 mm:  $120 \leq T \leq 330$  °C y a una profundidad de 20 mm:  $90 \leq T \leq 130$  °C. La medición de temperatura máxima fue cercana a los 500 °C similar a la temperatura más alta de un cilindro real localizado en el centro de un tren de laminación de colada continua. La medición más baja de temperatura fue de 40 °C cercana al eje central.

Considerando elementos delgados sometidos a calentamiento o enfriamiento, se puede concluir que el gradiente de temperaturas es despreciable, mientras que éste es tomado en consideración en elementos de mayor espesor. Durante el estudio de la fatiga térmica, dos variables deben de ser especificadas en elementos de mayor espesor: el gradiente de temperaturas (a través del cuerpo y su superficie) y el estado de esfuerzos. El gradiente de temperatura puede ser calculado si las temperaturas superficiales y las propiedades del material son conocidas y aún mejor si son medidas con exactitud [2].

Generalmente han sido aplicadas cargas externas sólo en los componentes de pruebas de fatiga térmica. En estas pruebas se originan los esfuerzos térmicos por la expansión o contracción restringida en especímenes que son calentados a altas temperaturas y enfriados por corrientes de aire o por la conducción de agua fría. Kudo y coautores [15] realizaron estudios del comportamiento de propagación de grieta por fatiga térmica sobre especímenes en forma de placa de 5 mm de espesor y 200 mm de longitud. El espécimen fue colocado dentro de una cámara de enfriamiento y empotrado entre dos pistones para restringir la deformación. Una vez posicionado el espécimen en el aparato, se sujetó a ciclos de 30 segundos, que consisten de calentamiento por haz de electrones de 5 segundos y enfriamiento durante 25 segundos mediante agua en circulación.

El criterio de falla es basado generalmente en la aparición de la primera grieta (observada macroscópicamente) o después de un cierto número de ciclos térmicos [3]. En algunos casos, el grado de distorsión que antecede o acompaña el agrietamiento es determinado cuantitativamente y puede no ser aceptable aún antes de que las grietas sean observadas. El criterio para determinar la resistencia a la fatiga térmica en investigaciones realizadas es caracterizado además por parámetros tales como densidad de grietas (número de grietas por unidad de longitud), profundidad promedio de grieta y profundidad máxima de grieta [9, 13, 14, 15].

Aunque el desarrollo de la mayoría de las pruebas ha sido motivada por el deseo de indicar el comportamiento del componente o material en operación, pocos autores demandan que el orden del mérito de las pruebas en aleaciones con respecto al desarrollo de la fatiga térmica sean reproducidas para el futuro servicio. Esta precaución esta más que justificada, ya que existen considerables diferencias en numerosos casos entre las pruebas y las condiciones en servicio. El deseo de metodologías o técnicas de pruebas estándar es entendible. Sin embargo, en vista de la diversidad de aplicaciones, es improbable que sean realizadas la diversidad de metodologías para cada caso, particularmente para las características que dominan al fenómeno de la fatiga térmica. Según algunos autores no tiene sentido involucrar sólo propiedades básicas, ya que este fenómeno es dependiente de las propiedades físicas, mecánicas, características del material, tamaño, forma del espécimen y técnica de la prueba [1].

Muchas de las pruebas de fatiga térmica imponen condiciones más severas que las presentes en los procesos. Las pruebas son aceleradas para reducir los tiempos de pruebas a intervalos experimentales razonables. En todos los casos, la fatiga térmica es evaluada al examinar y comparar el desarrollo de grietas en los puntos severos de concentración de esfuerzos térmicos en los especímenes después de un cierto número de ciclos térmicos [9].

## Referencias

1. Glenny E. , B. Sc., F.I.M., Thermal Fatigue, “Metallurgical Reviews”, Institute of Metals, London, 1961, Vol. 6, No. 24, pp 387-399.
2. Weronki A. and Hejwowski T., “Thermal Fatigue of Metals”, Technical University of New York, N.Y., Mercel Dekker, Inc., 1991 pp *iii, iv*.
3. Beck T., Lang K. H. and Lohe D., “Thermal-mechanical fatigue behavior of cast aluminium alloys for cylinder heads reinforced with 15 vol. % discontinuous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Saffil) fibers”, Int. J. of Materials and Product Technology, Vol. 18, Nos 1/2/3, 2003, pp 160-177.
4. Hayashi M., Enomoto K., Saito Y. and Miyagawa T., “Development of thermal fatigue testing apparatus with BWR water environment and thermal fatigue strength of austenitic stainless steels”, Nuclear Engineering and Design, 184, 1998, pp113-122.
5. Carnero Parra J. A., García Illescas R. y Kubiak Szyszka J., “Evaluación de vida útil de rotores de turbinas de vapor”, Instituto de Investigaciones Eléctricas. <http://www.iie.org.mx/meca99/aplica.html>.
6. Armengol S., “Caracterización microestructural y mecánica de barreras térmicas por APS y EB-PVD degradadas por fatiga térmica y mecánica”, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d' Enginyeria Industrial de Barcelona, 2006, <http://www.mcu.es/roai/va/consulta/registro.cmd>.
7. Blazevic D.T., “Hot Strip Mill Operations”, Homewood, Illinois: Hot Rolling Consultans, LTD, 1994, Vol. 3, No IX, pp1-8.
8. Bohler Uddeholm Ibérica, S.A.  
<http://www.interempresas.net/Subcontratacion/FeriaVirtual/ResenyaProducto.asp>
9. Wallace J. F., Wang Y. and Schwan D., “Effect of composition and processing on the thermal fatigue and toughness of high performance die steels”, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA, 1997, pp 38-41.
10. Mercado Solís R. D., comunicación personal, FIME-UANL, 2005.
11. Mercado-Solís R. D., “Simulation of thermal fatigue in hot mill works rolls“, PhD Thesis, The University of Sheffield, UK, 2002, pp 76-80.
12. Revel P., Kircher D. and Bogard V., “Experimental and numerical simulation of a stainless steel coating subjected to thermal fatigue”, Final Report, Materials Science and Engineering, A290, 2000, pp 25-32.

13. Dobrzanski L.A., Mazurkiewicz J., Hajduczek E. and Madejski J., "Comparison of the thermal fatigue resistance and structure of the 47CrMoWVTiCeZr16-26-8 hot-work tool steel with X40CrMo V5-1 type one", *Journal of Materials Processing Technology* 113, 2001, pp 527-538.
14. Pellizzari M., Molinari A. and Straffelini G., "Thermal fatigue resistance of plasma duplex-treated tool steel", *Surface and Coating Technology*, 142-144, 2001, pp 1109-1115.
15. Kudo Y., Kikuchi K. and Saito M., "Thermal fatigue crack propagation behavior of F82H ferritic steel", *Journal of Nuclear Materials*, 307-311, 2002, pp 471-474.
16. Kerezi B. B., Price J. W. H. and Ibrahim R. N., "Using S-N curves to analyze cracking due to repeated thermal shock", *Journal of Materials Processing Technology*, 145, 2003, pp 118-125.
17. Srivastava A., Joshi V. and Shivpuri R., "Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling", *Wear*, 256, 2004, pp 38-43.
18. Persson A., Hogmark S. and Bergstrom J., "Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels", *International Journal of Fatigue*, XX, 2004, pp 1-13.
19. Siller I., Waldhauser W. and Ebner R., "Numerical simulation and practical investigation of the thermal fatigue behavior of hot work tool steels in die casting processes", *Material Center Leoben*.
20. Jiang Q. C., Sui H. L. and Guan Q. F., "Thermal fatigue behavior of new type high-Cr cast hot work die steel" *ISIJ International*, Vol. 44, 2004, No. 6, pp 1103-1107.

## **CAPÍTULO 4**

# **FUNDAMENTOS DE DISEÑO**

### 4.1 Introducción.

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, la presente tesis consiste en diseñar, construir y validar una máquina experimental para ensayos de fatiga térmica. Por tal motivo, en este capítulo se presentan los fundamentos generales de diseño en ingeniería, los cuales serán posteriormente aplicados al desarrollo del presente trabajo.

El objeto de la ingeniería es proporcionarle a la sociedad lo que la civilización moderna requiere. Por tanto, la ingeniería se transforma en el eslabón que une y convierte los regalos naturales necesarios para el hombre. Es de todos conocidos la evaluación obtenida desde que el primer hombre en la tierra produjo fuego con el frotamiento de piedras o con la primera punta de flecha construida. La ingeniería no se limita solamente a la observación de realidades naturales. Esto en primer lugar le

corresponde al científico. Y en lugar de esto, a la ingeniería le corresponde entender los principios científicos y aplicarlos para llegar a una meta designada. En este sentido, la ingeniería debe de ser considerada como una ciencia aplicada [1].

Como ciencia aplicada, la ingeniería utiliza el conocimiento científico para lograr un objetivo específico. El mecanismo mediante el cual una necesidad es convertida en un plan funcional y significativo es llamado *diseño*. En otras palabras, diseño es la formulación de un plan, esquema o método para trasladar una necesidad a un dispositivo que funcionando satisfactoriamente cubra la necesidad o resuelva el problema predestinado. El diseño es la tarea esencial de la ingeniería [1, 2].

El diseño es una actividad de intensa comunicación en la cual se usan palabras y fotografías y se emplean las formas escritas y orales. El diseño significa un proceso innovador e iterativo. También es un proceso de toma de decisiones. Algunas veces las decisiones se tienen que hacer con poca información y parcialmente contradictoria. Algunas veces las decisiones se toman de manera tentativa y se reserva el derecho de hacer ajustes a medida que se tengan más datos. Los diseños están sujetos a restricciones en la resolución de problemas. Así el tiempo, el dinero y el conocimiento colectivo son restricciones en la resolución de problemas impuestas en un diseño [2].

A menudo la tarea inicial del diseñador consiste en definir con claridad la necesidad o problema, que incluyen oportunidades y que pueden ser múltiples. Para aliviar la ausencia de soluciones, alguna o varias restricciones se tendrán que negociar con objeto de admitir otras [1, 2]. Es importante que el diseñador comience por identificar exactamente cómo reconoce una alternativa satisfactoria y cómo distingue entre dos alternativas satisfactorias, con objeto de identificar la mejor. Partiendo de este punto, se forma o seleccionan estrategias de optimización [2].

Posteriormente se desarrollan las tareas siguientes:

- a) Inventar soluciones alternas.
- b) Por medio del análisis y de las pruebas, simular y predecir el desempeño de cada alternativa, conservar las alternativas satisfactorias y desechar las que no lo son.
- c) Elegir la mejor alternativa satisfactoria descubierta, como una aproximación a la optimización.
- d) Implantar el diseño.

Los resultados del proceso del diseño son decisiones con respecto a los componentes y su conectividad, geometría, procesos, tratamientos y dimensiones asociadas [2].

## 4.2 Características del diseño.

El diseño de un producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo y útil. Estas palabras tiene el fin de transmitir lo siguiente [2]:

- Funcional: el producto debe cumplir con su necesidad y con las expectativas propuestas.
- Seguridad: el producto no debe de ser peligroso para el usuario, los transeúntes o propiedad circundante. Los peligros que no se pueden “eliminar con el diseño” se resuelven con protección; si eso no es posible, se proporcionan instrucciones apropiadas o advertencias.
- Confiable: la confiabilidad es la probabilidad condicional de que, a un nivel de confianza dado, el producto realizará su función propuesta en forma satisfactoria, o sin falla, durante un lapso de vida dado.
- Competitivo: el producto es un contendiente en su mercado.

- Útil: el producto es “amigable para el usuario” y se acomoda al tamaño, resistencia, postura, alcance, fuerza, potencia y control humano.
- Se puede fabricar: el producto se reduce a un número “mínimo” de partes y sus dimensiones, distorsión y resistencia están bajo control.

### 4.3 Tipos de diseño.

Las tareas del diseño se pueden clasificar en tres tipos. En el desarrollo de metodologías, se utiliza el tipo de diseño según sea el caso [3].

1. Diseño original.
2. Diseño adaptado.
3. Variante de diseño.

El “diseño original” también llamado invento, solicita un diseño único con un nuevo principio de trabajo. En ocasiones un material nuevo sugiere un diseño nuevo y por lo tanto, un producto nuevo, sin embargo es común que un producto nuevo demande el desarrollo de un material nuevo.

El “diseño adaptado” exige la mejora de un producto, modificando el principio de trabajo ya existente. Toma el diseño original y lo ajusta a un producto nuevo. Este tipo de diseño es el comúnmente utilizado.

La “variante del diseño” involucra modificaciones en la escala, dimensiones u otros detalles en el producto sin cambiar su funcionamiento.

#### 4.4 Definición de máquina.

Aún cuando prácticamente todas las personas usan cotidianamente gran número de máquinas, pocos son los que pueden definir con claridad lo que se puede entender por máquina. Según la Real Academia Española de la Lengua [4], máquina “es cualquier artefacto que sirve para aprovechar, dirigir o regular la acción de una fuerza”. Según Rouleaux [4], máquina “es una combinación de sólidos resistentes, dispuestos de manera que obligan a las fuerzas de la naturaleza a efectuar un trabajo, produciéndose ciertos movimientos-respuesta en función de movimientos de entrada ejecutados y previstos”.

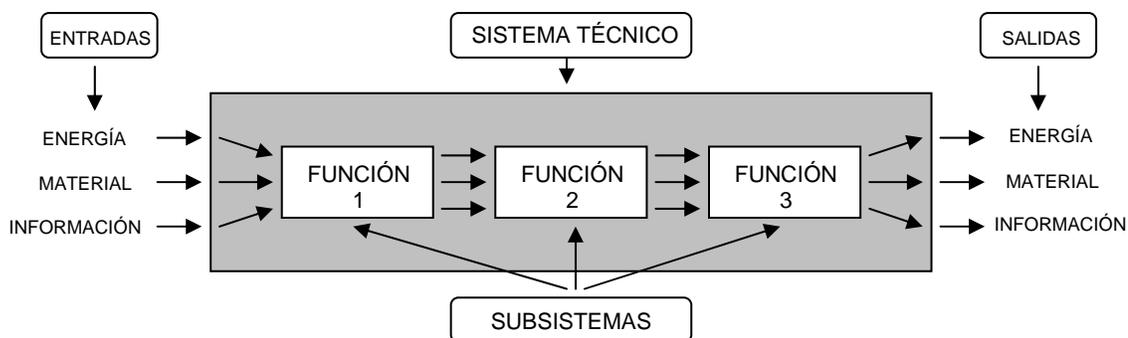
Las máquinas se consideran como el resultado de un diseño y construcción en el que intervienen dos grupos de factores: unos de naturaleza puramente mecánica (piezas y mecanismos) y otros de naturaleza no mecánica (aplicación, estética, mercado, impacto social, etc.). Ambos grupos de factores hacen que las máquinas adquieran diversas configuraciones y características según el entorno en el que se diseñan, construyen y utilizan [4].

El conjunto de elementos y mecanismos que constituyen a todas las máquinas pueden a su vez agruparse en un conjunto de subsistemas que de una u otra forma, con mayor o menor virtualidad están presentes en todas éstas [4].

#### 4.5 Sistemas técnicos.

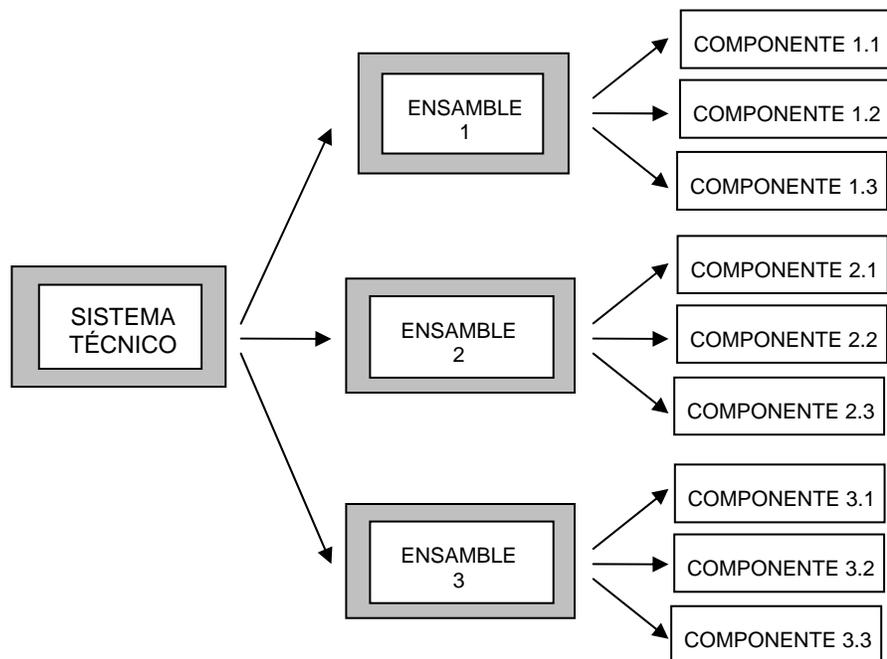
Un sistema técnico consiste de ensambles y componentes, que en conjunto y dispuestos de una forma desarrollarán una función dada. Éstos pueden ser descritos y analizados en más de una forma. A continuación se contemplan dos de éstas [3].

En la primera representación, el sistema se divide en subsistemas conectados, los cuales desempeñan una función unitaria. El arreglo resultante es llamado estructura-función lo cual se esquematiza en la Figura 4.1 [3].



**Figura 4.1** Se muestra el análisis de un sistema técnico como una conversión de energía, material e información (señales). Cuando es elaborada esta consideración ayuda a encontrar alternativas de diseño [3].

La segunda forma de analizar un sistema es dividirlo en ensamblajes y componentes. Cada componente está hecho de un material, por lo tanto diferentes componentes de diferentes materiales. En este caso la selección de materiales está contenida en el nivel de los componentes, como se presenta en la Figura 4.2 [3].



**Figura 4.2** Sistema técnico dividido en ensamblajes y componentes [3].

#### 4.6 Metodología para el diseño de máquinas.

El grado de complejidad del problema va a dictar el nivel de diseño que es requerido en la solución. Sin embargo, el proceso de diseño es esencialmente el mismo para un problema simple o una situación compleja.

Es necesario mantener presente cada uno de los pasos y secuencia referida al proceso de diseño para facilitar un orden en la solución.

Los pasos para el diseño de maquinaria propuesta por Parr [5], son los siguientes:

1. Tener el conocimiento del problema. La importancia de esta actividad es por lo regular sobreestimada y se refiere a considerar toda la información que pueda tener efecto en el diseño.
2. Prepararse para tratar con el problema. Se debe estar familiarizado con el problema y preparado para tratar con éste. Aquí deberá de prepararse actividades de enriquecerse de conocimientos, buscando información y literatura, además de hacer una búsqueda de soluciones a conceptos parecidos al problema que se tiene.
3. Identificar los elementos. Identificar los elementos o variables que serán considerados para el diseño. Básicamente se trata de identificar todos los factores, para dividirlos por su importancia.
4. Análisis de los elementos variables. Analizar las variables que han sido identificadas, principalmente las de mayor relevancia. Es necesario hacer un análisis de cada variable y no menospreciar algunas de ellas, de igual forma no enfocarse a una sola.

5. Creación del diseño. Producir un nuevo diseño, es un ejercicio de creatividad que requiere eliminar y quitarse las ideas viejas. Una de las formas de hacer esto, es haciendo una lluvia de ideas de las posibles soluciones que inclusive pueden ser fantasiosas. Es apropiado realizar diferentes diseños para ser evaluados y comparados.
6. Evaluación de los diseños. Ahora es necesario evaluar los diseños tomando los puntos críticos, en primera instancia y después los menos críticos. Parr, presenta en su texto una lista de criterios que pueden servir de guía para la evaluación.
7. Trabajar el diseño seleccionado. Propone tratar de modificar lo que fue el mejor diseño buscando mejorarlo, por que generalmente sucede una vez que se implemente el diseño de solución, se le encuentra alguna forma de haberlo realizado con alguna mejora, pero quizá para ese tiempo ya sea tarde. Es por esto, que el objetivo de este paso, es encontrar esa posible mejora antes de la implementación.
8. Desarrollo del diseño seleccionado. Mantener el menor número de partes o mecanismos para hacer más eficiente el diseño. Construir un prototipo de prueba para verificar que efectivamente es un buen diseño.
9. Preparar el diseño al detalle. Existen dos razones para realizar el diseño al detalle, la primera es para la creación de los dibujos de manufactura y la construcción y la segunda para su aprobación. En preparación para ser aprobado debe seguirse los siguientes pasos:
  - Comprender a fondo la configuración física.
  - Comprender los principios en los cuales fue basado el diseño.
  - Demostrar que todos los requerimientos se cumplen.
  - Asegurarse de las limitaciones.

- Tener evidencia de que se cumplen todas las restricciones.
- La validación de los conceptos teóricos.

10. Ganar la aceptación del diseño. Se debe adoptar la función de vendedor de su producto al cual le ha dedicado gran parte del tiempo y que lógicamente debe estar convencido de que ha hecho un buen diseño. Esta labor de venta, se refiere a vender la idea a los usuarios de la máquina o dispositivo realizado.

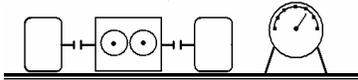
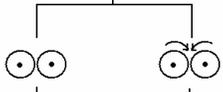
Siendo estos pasos un procedimiento típico para diseño, pueden obtenerse otros tipos, sin embargo, independientemente de la referencia analizada, casi todos los procedimientos contienen alguno o todos los aspectos antes mencionados, dependiendo del producto a diseñarse y del procedimiento particular según sea el objetivo [1, 5].

En la fase final de la creación de una máquina, se encuentran etapas laboriosas y de mucha responsabilidad, tales como el montaje, prueba y acabado. Sólo aquí se pueden descubrir y subsanar todos los defectos del proceso de las transformaciones precedentes y los errores e imperfecciones. De la perfección de los métodos de ensayo y de la valoración objetiva de sus resultados, depende en gran parte la seguridad y duración del plazo de funcionamiento de las máquinas o aparatos, cualesquiera que sean las condiciones de explotación para que hayan sido calculadas. Es por tanto que cualidades como solidez, seguridad y duración deben estar presentes en una máquina [6].

Hay funciones que deben realizarse por códigos y normas, por la siempre presente economía, por seguridad y por consideraciones de responsabilidad legal del producto o proceso [2]. Respecto a esto, en el tópico de fatiga térmica no se conocen o manejan normas o códigos que proporcionen una metodología útil para realizar experimentos a nivel laboratorio estandarizados.

## 4.7 Categorías de pruebas.

Dependiendo de la estructura y función de la máquina, sistema, componente, o espécimen a ser estudiado, las pruebas pueden ser agrupadas dentro de 6 categorías [7], las cuales se presentan en la Figura 4.3. Cada una de ellas tiene diferente alcance y los resultados obtenidos en una categoría no pueden ser simple y directamente extrapolados a otra.

Categoría	Tipo de Prueba	Símbolo
I	Pruebas de campo para maquinaria	
II	Pruebas de banco para maquinaria	
III	Pruebas de banco para sistemas	
IV	Pruebas de banco para componentes	
V	Pruebas de modelos	
VI	Pruebas de laboratorio	

**Figura 4.3** Categorías de pruebas [7].

Las pruebas de la categoría I se desarrollan bajo condiciones prácticas reales a las cuales va a trabajar el objeto. Las pruebas a esta escala usualmente son muy costosas. El amplio espectro de condiciones prácticas no puede ser caracterizado adecuadamente, por lo que es necesario confirmar los resultados de una manera estadística con pruebas repetitivas.

Las pruebas de las categorías II a IV involucran maquinarias, sistemas o componentes, los cuales son estudiados en bancos de pruebas. En estas pruebas es muy importante la correcta selección de las condiciones de operación para de esta forma simplificar, simular o acelerar el experimento. Conforme asciende la categoría de prueba, las condiciones de operación se presentan para conducirse de una manera más precisa.

En la categoría V las pruebas de especímenes modelo se llevan a cabo bajo condiciones prácticas, mientras que en la categoría VI las pruebas son usadas preliminarmente en el estudio de los principios fundamentales del mecanismo de falla. Las condiciones de prueba para esta categoría generalmente son en base a un fenómeno específico en lugar de simular un comportamiento real [7].

#### 4.8 Consideraciones y características del diseño.

En el capítulo 2 y 3 se conocieron las principales causas bajo las que se desarrolla el mecanismo de falla de fatiga térmica, así mismo las condiciones y características comúnmente utilizadas en el desarrollo de las metodologías para el estudio de este fenómeno. De acuerdo a esto se determinan las consideraciones mediante las que se llevaría a cabo el proceso de diseño y selección de los métodos involucrados en el desarrollo de la metodología de estudio del presente trabajo.

En el capítulo 5 se expondrá de manera detallada el proceso de diseño del banco de pruebas de fatiga térmica, sin embargo, se puede anticipar que el diseño utilizado para el desarrollo de este proyecto fue de tipo “original” de acuerdo a lo descrito en el punto

4.3 del presente capítulo. Además la máquina se desarrolló examinando los dos tipos de sistemas técnicos, estructura-función y ensamble-componentes, descrito en el punto 4.5, ya que el diseño se contempló como un sistema, integrado a su vez de una serie de subsistemas ensamblados por componentes. Dichos componentes en conjunto fueron dispuestos para desempeñar básicamente funciones de sostenimiento, desplazamiento, medición, calentamiento y enfriamiento. Esta serie de funciones se conformaron para llevar a cabo el proceso de experimentación como función unitaria, de acuerdo a lo que se describirá en el capítulo 5 de la presente tesis.

De acuerdo a la aplicación de la máquina, a las modalidades para estudio del espécimen y las condiciones de ensayo del mecanismo de falla, las pruebas a realizarse en este trabajo se catalogarían dentro del nivel VI de acuerdo a la Figura 4.3. Las pruebas se realizarán para el estudio de los principios fundamentales del mecanismo de falla, además de ejecutarse bajo las condiciones en base al fenómeno aislado sin tratar de simular el comportamiento de algún proceso en particular.

## Referencias

1. Deutschman D., Michels W. J. y Wilson C. E., “Diseño de Máquinas, Teoría y Práctica”, Newark Collage of Engineering. New Jersey Institute of Technology, Compañía Editorial Continental S. A. de C. V., México, 1998, pp 13-28.
2. Shigley J. E. y Mischke C. R., “Diseño en Ingeniería Mecánica”, 6<sup>ta</sup> edición McGraw-Hill, Mexico, 2002, pp 4-17.
3. Ashby M. F., “Materials Selection in Mechanical Design”, 1992, pp 5-8
4. Calero Pérez R. y Carta Gonzáles J. A., “Fundamentos de Mecanismos y Máquinas para Ingenieros”, McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U., 1999, pp 1-3, 19.
5. Treviño Acevedo A. M., “Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión”, Tesis de maestría, U.A.N.L., México, 2004, pp 75-77.
6. Pogodin-Alexeev G. I., “Procesos Tecnológicos Progresivos en la Construcción de Maquinaria”, Editorial Mir, Moscú, pp 14-16,131.
7. ASM Handbook, Volumen 18, “Design of Friction and Wear Experiments”, ASM International Materials Park Ohio, 10<sup>th</sup> Edition, 1990, pp 480.

## **CAPÍTULO 5**

# **METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### 5.1 Introducción.

La naturaleza de la fatiga térmica comienza a investigarse a principios de la década de 1950, debido al continuo incremento de las temperaturas de trabajo empleadas en la industria de procesamiento de materiales y a una creciente necesidad de aumentar la eficiencia y fiabilidad de los componentes de maquinaria sometidos a altas temperaturas. El entendimiento profundo de los mecanismos de falla por fatiga térmica es esencial para proporcionar soluciones parciales o completas en aplicaciones, procesos y diseños de componentes actuales y futuros [1].

A nivel mundial existe una cantidad limitada de equipos para pruebas de fatiga térmica. En esta área no se han desarrollado estándares para la ejecución de pruebas, por lo que técnicas y equipos son diseñados y construidos de acuerdo a las condiciones y necesidades específicas requeridas por las investigaciones a nivel industrial o científico.

Una característica fundamental de los ensayos de fatiga térmica son las condiciones del sistema, por lo tanto el diseño y construcción de un equipo de pruebas a nivel laboratorio es esencial en el desarrollo de la metodología del estudio de fatiga térmica [2]. De esta manera es posible evaluar la resistencia a la fatiga térmica con el fin de llevar a cabo una adecuada selección de materiales, predecir y aumentar la vida útil, minimizar paros en procesos y optimizar los parámetros de los mismos. Así mismo se estudia particularmente el mecanismo de falla, las condiciones de prueba son controlables, los resultados son rápidos de obtener y la prueba de laboratorio se puede conducir en costos más bajos que ensayos de campo [3, 4].

En este capítulo se presenta la secuencia de desarrollo del diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de fatiga térmica. Se muestran las diferentes etapas mediante las que se consiguió obtener el diseño final y las modificaciones realizadas durante la construcción del equipo. Además se dan a conocer los experimentos de factibilidad realizados a través de una máquina prototipo así como los ensayos realizados para la validación de la máquina de ensayos de fatiga térmica en su versión final.

## 5.2 Condiciones de prueba.

Las principales condiciones mostradas en la generalidad de los procesos analizados, donde se manifiesta la falla por fatiga térmica fueron establecidas inicialmente para selección de los componentes y desarrollo del prototipo de la máquina de ensayos de fatiga térmica (ProMEFT). Las siguientes condiciones sentaron las bases para la ejecución de las pruebas de factibilidad:

- Rango de temperatura máxima (calentamiento): 500 – 750 °C.
- Rango de temperatura mínima (enfriamiento): 30-100 °C.
- Enfriamiento por convección forzada.
- Repetición cíclica de las temperaturas de calentamiento y enfriamiento.
- Altas velocidades de enfriamiento y calentamiento.
- Restricción al cambio volumétrico del espécimen.

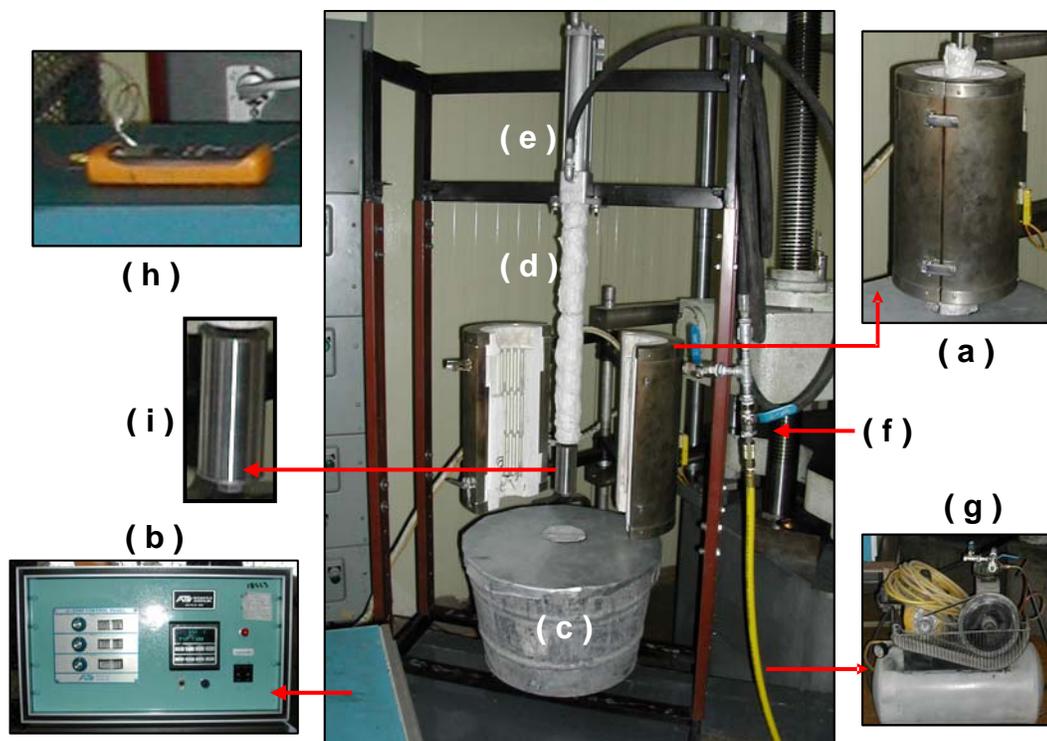
Debido a que existe una gran cantidad de variables dentro de los procesos que exhiben fatiga térmica, uno de los alcances de este trabajo fue establecer las condiciones de operación para el desarrollo del equipo de pruebas.

### 5.3 Prototipo de máquina de ensayos de fatiga térmica (ProMEFT).

Para cumplir con estos requerimientos y condiciones se desarrolló un equipo de pruebas prototipo que fuera capaz de reproducir de forma aproximada las condiciones bajo las que se presenta el fenómeno de falla por fatiga térmica.

Con este banco de pruebas prototipo y la ejecución de las pruebas de factibilidad se obtuvo información útil y una perspectiva del comportamiento que tendrían los componentes para una adecuada selección en el diseño final de la máquina, así como para ajustar las variables y condiciones de interés en ésta.

A continuación se da una descripción de los componentes y subsistemas que conforman al prototipo del banco de pruebas (ProMEFT), mostrado en la Figura 5.1 con sus respectivos componentes.



**Figura 5.1** Prototipo de Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica (ProMEFT). (a) Horno de resistencia tipo “libro”, (b) procesador y controlador de horno, (c) depósito de agua, (d) extensión del vástago, (e) actuador neumático, (f) válvula de control neumática, (g) compresor de aire, (h) termómetro con termopar, (i) espécimen.

### 5.3.1 Subsistema de calentamiento.

Debido a que la probeta tenía que estar en movimiento continuo para efectuar los ciclos térmicos, de la etapa de calentamiento a la de enfriamiento y viceversa, se dispuso de un horno por resistencia tipo “libro”, el cual consta de un cilindro hueco revestido con material refractario, cuyos extremos están abiertos al exterior. Estas áreas abiertas permiten que el espécimen se desplace libremente, transportándose en forma vertical del horno al depósito de enfriamiento y viceversa. Dicho horno cuenta con un procesador y controlador (Figura 5.1 (b)) con capacidad para alcanzar temperaturas de hasta 1350 °C, en un tiempo aproximado 45 minutos para cada inicio de prueba. En la figura 5.1 se muestra este equipo abierto y cerrado, característica que le da su nombre tipo “libro”.

### 5.3.2 Depósito de enfriamiento.

Para llevar a cabo el enfriamiento de la probeta se utilizó un baño con agua a temperatura ambiente como medio de enfriamiento, como se muestra en la Figura 5.1 (c). El volumen de agua utilizado al inicio de la pruebas fue de 30 litros. En la parte superior del recipiente fue colocada una tapa de lámina con un orificio de 101.6 mm (4") a través del cual se introducía el espécimen al baño de agua. La función de esta tapa era la de contener el salpique excesivo debido a la ebullición del agua, al sumergir la pieza caliente durante su enfriamiento.

### 5.3.3 Subsistema de desplazamiento.

Para llevar a cabo el desplazamiento de la probeta de la etapa de calentamiento a la de enfriamiento y viceversa de manera rápida y efectiva, se utilizó un sistema neumático compuesto por un actuador de doble efecto, un compresor de aire de 2 HP, una llave de paso y sus respectivas mangueras de alta presión para conectar los componentes que se muestran en la Figura 5.1 (e), (f), (g). El actuador cuenta con una capacidad de 30 kg y una carrera de 250 mm suficientes para transportar la muestra de una posición a otra. Para el movimiento vertical de la muestra se utilizó sólo una de las dos conexiones del pistón, necesaria para elevar el espécimen. Para el descenso de ésta, solo se liberaba el aire a través de la válvula de paso.

### 5.3.4 Extensión del vástago del pistón.

La extensión del vástago del pistón se fabricó con dimensiones de 18 mm de diámetro por 500 mm de longitud. Se realizaron roscas internas en los extremos de la extensión para sujetar tanto el espécimen por un extremo como el vástago del pistón por el opuesto. El uso de la extensión permitió separar el espécimen del vástago del pistón para evitar un calentamiento excesivo del mismo. De igual forma el uso de la extensión durante la etapa de enfriamiento del espécimen evitaría que el vástago del pistón se encontrara dentro del horno de resistencia. Para fabricar la extensión se utilizó una barra

cilíndrica de acero H13 la cual fue aislada mediante una colcha cerámica para disminuir su calentamiento dentro del horno, tal y como se muestra en la Figura 5.2.

### 5.3.5 Muestra.

Para los ensayos exploratorios se utilizó un espécimen de acero AISI D2. El propósito de utilizar este tipo de acero es debido a su baja tenacidad, siendo más propenso al agrietamiento térmico [5, 6]. Dicho acero, además, fue sometido a un tratamiento térmico de endurecimiento (60 HRC) haciéndolo más frágil y aumentando su susceptibilidad al agrietamiento térmico. Los especímenes utilizados en la ejecución de las pruebas preliminares se maquinaron con dimensiones de 50 mm de diámetro por 100 mm de longitud. Dichas dimensiones fueron consideradas con la finalidad de cumplir con uno de los principios de la fatiga térmica: la existencia de gradientes térmicos a través del cuerpo del material, para generar esfuerzos de origen térmico [7].



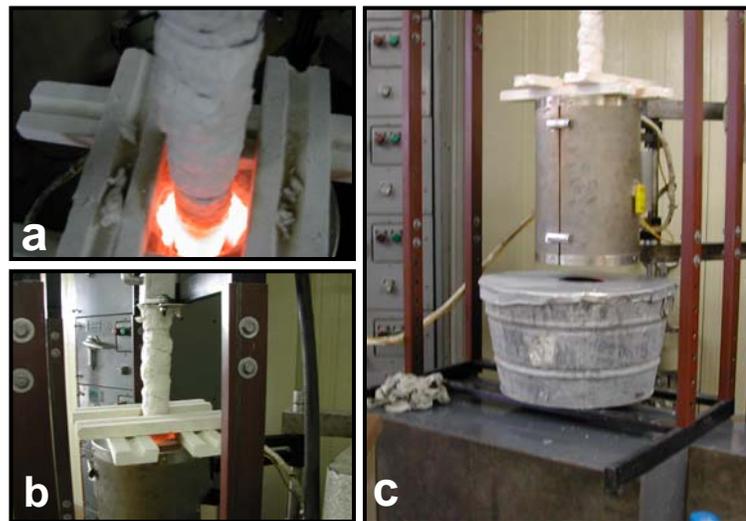
**Figura 5.2** En estas imágenes se muestra el desplazamiento del espécimen de la zona dentro del horno en la etapa de calentamiento hacia la zona del depósito de agua en la etapa de enfriamiento. En la imagen derecha se observa como la extensión, recubierta por un aislante cerámico, queda expuesta dentro del horno durante la etapa de enfriamiento del espécimen. Ambas fotografías fueron tomadas con el horno abierto para fines ilustrativos.

### 5.3.6 Pruebas de factibilidad.

Se realizaron las pruebas de factibilidad bajo las siguientes condiciones de prueba:

- Acero a ensayar: D2 endurecido a 60 HRC
- Temperatura máxima: 600 °C
- Temperatura mínima: 100 °C
- Número de ciclos: 500
- Ausencia de marco de esfuerzos externo.
- Calentamiento por medio de horno cilíndrico de resistencias.
- Enfriamiento por convección forzada mediante inmersión en agua estacionaria.

Se efectuaron las pruebas bajo estas condiciones, posteriormente se analizaron y discutieron a detalle los resultados obtenidos (capítulo 6, sección 6.2), asimismo se evaluó el comportamiento de los diferentes componentes que conformaron la ProMEFT. En la Figura 5.3 y Figura 5.4 se muestran las etapas de calentamiento y enfriamiento respectivamente, que ilustran estos ensayos.



**Figura 5.3** En estas tres imágenes se observa el detalle de la etapa de calentamiento. (a) Desde una vista superior, se aprecia el espécimen en la parte interior del horno cilíndrico, el cual es cubierto por la parte superior del túnel, evitando que escape calor y ayudando a minimizar el tiempo de calentamiento, (b) y (c) vista general de la etapa de calentamiento.



**Figura 5.4** En estas tres imágenes se observa el detalle de la etapa de enfriamiento. (a) Vista entre la parte inferior del horno y la parte superior del depósito de agua, se aprecia como el espécimen sale de la parte interior del horno y se dirige hacia el depósito, (b) el espécimen se encuentra sumergido dentro del depósito de agua, (c) vista general de la etapa de enfriamiento con el actuador neumático activado.

## 5.4 Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica (MEFT).

### 5.4.1 Diseño y construcción.

A través de ensayos de factibilidad se obtuvieron lineamientos básicos para un adecuado diseño de la versión final de la máquina de ensayos de fatiga térmica (MEFT), los cuales se enlistan a continuación:

- Calentamiento rápido, controlado y superficial.
- Enfriamiento rápido, controlado y uniforme.
- Generación de gradientes de temperatura a través del cuerpo del espécimen de ensayo, principalmente en dirección radial.
- Aplicación de un marco de esfuerzos externo de tensión-compresión.

- Desplazamiento efectivo de la probeta.
- Dimensiones adecuadas para la probeta.
- Monitoreo de las variables experimentales.

Mediante estos lineamientos se pretende producir las dos formas principales de generación de esfuerzos térmicos: por desplazamiento, donde la expansión o contracción del material es restringida por un marco de esfuerzos externo; y por deformación, la expansión o contracción del material es prevenida por el propio material circundante [7].

De acuerdo a los objetivos planteados en el presente trabajo, se definieron los subsistemas que conformaron la máquina de ensayos de fatiga térmica (MEFT), los cuales se enlistan a continuación.

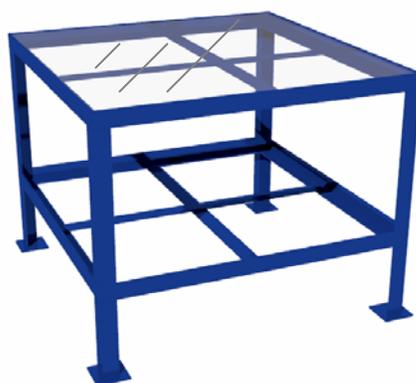
- Subsistema estructural.
- Subsistema de calentamiento.
- Subsistema de enfriamiento.
- Subsistema de sujeción.
- Subsistema de desplazamiento neumático.
- Subsistema de medición de temperaturas.
- Subsistema de control y automatización.
- Subsistema de adquisición de datos.

#### 5.4.2 Subsistema estructural.

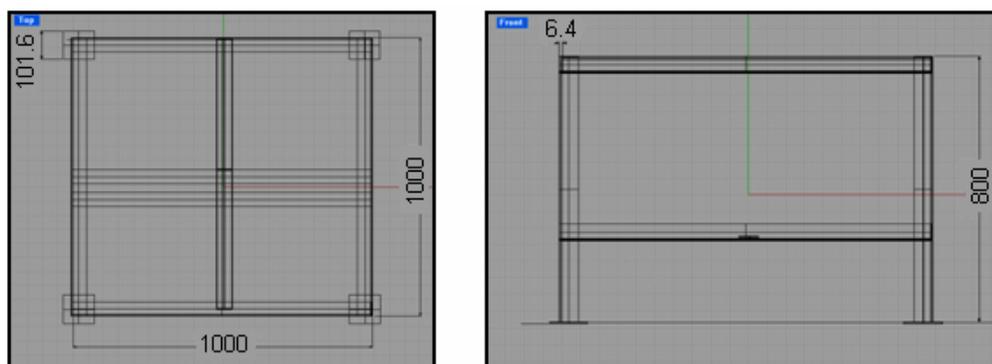
Esta estructura es la encargada de dar sostenimiento y alojamiento a todos los componentes que forman los subsistemas de la máquina. Así también la estructura está diseñada con el propósito de ofrecer un área de trabajo ergonómica para llevar a cabo los ensayos experimentales. Este subsistema se compone de tres soportes los cuales se presentan a continuación.

### 5.4.2.1 Soporte inferior.

El soporte inferior de la máquina consiste en una estructura conformada por un área de 1000 mm por 1000 mm y 800 mm de altura. Éste se fabricó en perfil de acero tipo ángulo 90° de 50.8 mm (2") de ancho con un espesor de 6.4 mm ( $\frac{1}{4}$ " ) unidos mediante soldadura. En la parte superior cuenta con una placa de acrílico con un espesor de 19.05 mm ( $\frac{3}{4}$ " ), seleccionada para soportar el peso del equipo y las posibles vibraciones del sistema. Dicho soporte es mostrado en la Figura 5.5 con sus dimensiones correspondientes en los esquemas de la Figura 5.6.



**Figura 5.5** Dibujo de la vista general del soporte inferior [8].



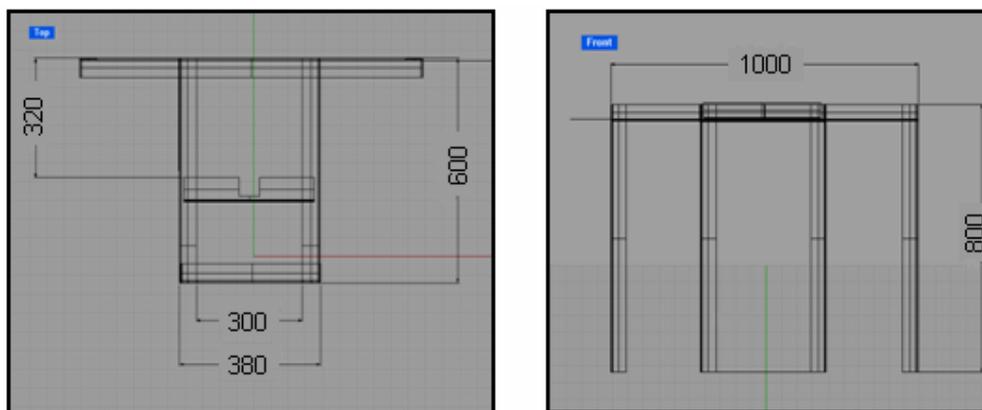
**Figura 5.6** En el esquema izquierdo se muestra la vista superior del soporte inferior con dimensiones en milímetros, mientras que en el esquema derecho se aprecia la vista frontal de la misma [8].

#### 5.4.2.2 Soporte superior.

El soporte superior se aprecia en la figura 5.7, el cual esta conformado por una serie de perfiles de acero tipo ángulo 90° de 38 mm (1½”) de ancho con un espesor de 5 mm (3/16”), unidos por tuercas y tornillos con la finalidad de realizar futuros ajustes en caso de ser necesarios. El soporte superior cuenta con dimensiones de 1000 mm de ancho por 600 mm de profundidad y 800 mm de altura, como se aprecia en el esquema de la Figura 5.8. Las medidas para esta sección de la estructura se diseñaron con la finalidad de contar con un espacio suficiente al ensamblar los subsistemas, evitando limitaciones de espacio para los demás componentes de la MEFT.



**Figura 5.7** Dibujo de la vista general del soporte superior [8].



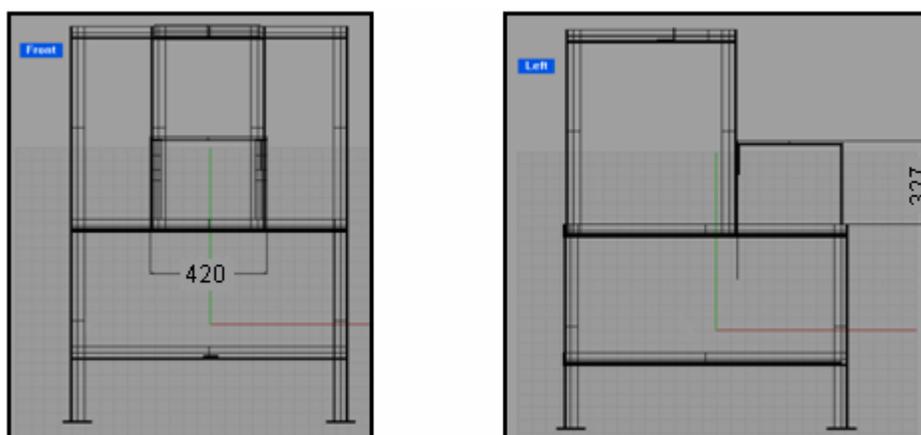
**Figura 5.8** En el esquema izquierdo se muestra la vista superior del soporte superior con dimensiones en milímetros, mientras que en el esquema derecho se aprecia la vista frontal de la misma [8].

### 5.4.2.3 Plataforma.

En conjunto, la estructura de la máquina cuenta con una plataforma en la parte posterior del soporte superior y sobre el soporte inferior. En esta plataforma descansa la unidad remota del sistema de calentamiento, la cual se indica en la Figura 5.9, con sus medidas correspondientes en la Figura 5.10.



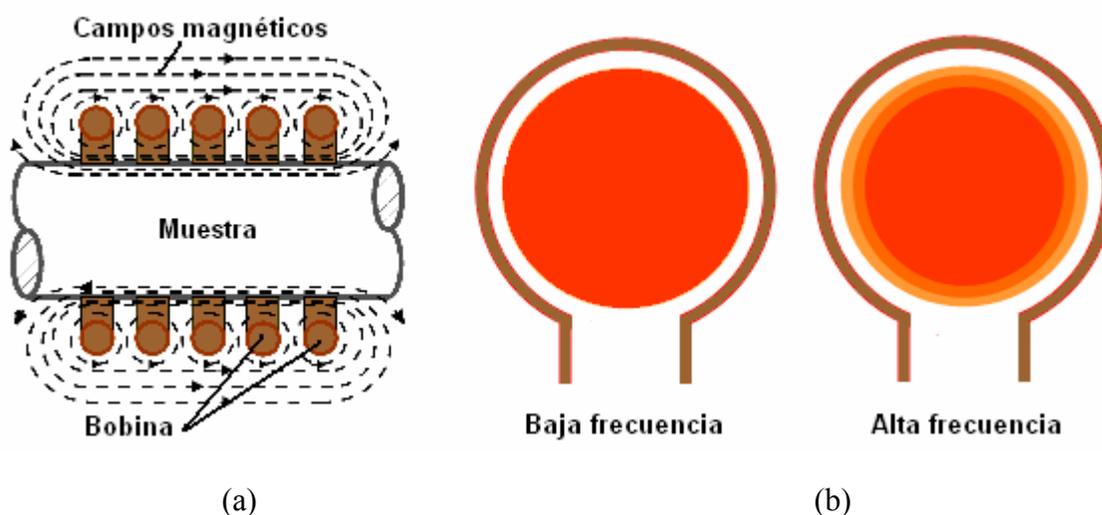
**Figura 5.9** Dibujo de la vista general del subsistema de estructura ensamblado [8].



**Figura 5.10** Se muestra la vista frontal y lateral del ensamble final de la estructura con dimensiones en milímetros [8].

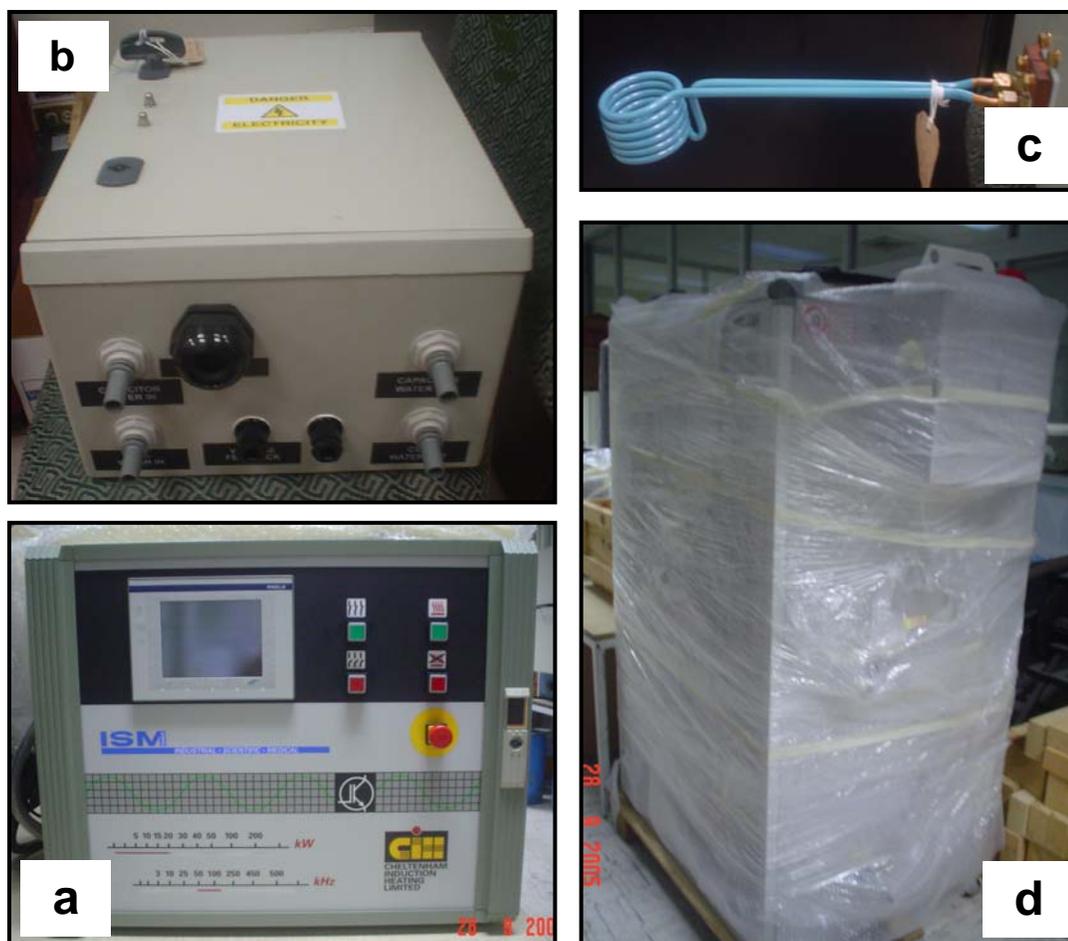
### 5.4.3 Subsistema de calentamiento.

Se requiere de un calentamiento rápido y superficial, por lo que se optó por el método de calentamiento por inducción. Éste es utilizado para calentar selectivamente una porción de la probeta (Figura 5.11 (a)), en un tiempo relativamente corto y de manera eficiente. El calentamiento por inducción es una combinación compleja de electromagnetismo, transferencia de calor y fenómenos metalúrgicos [9].



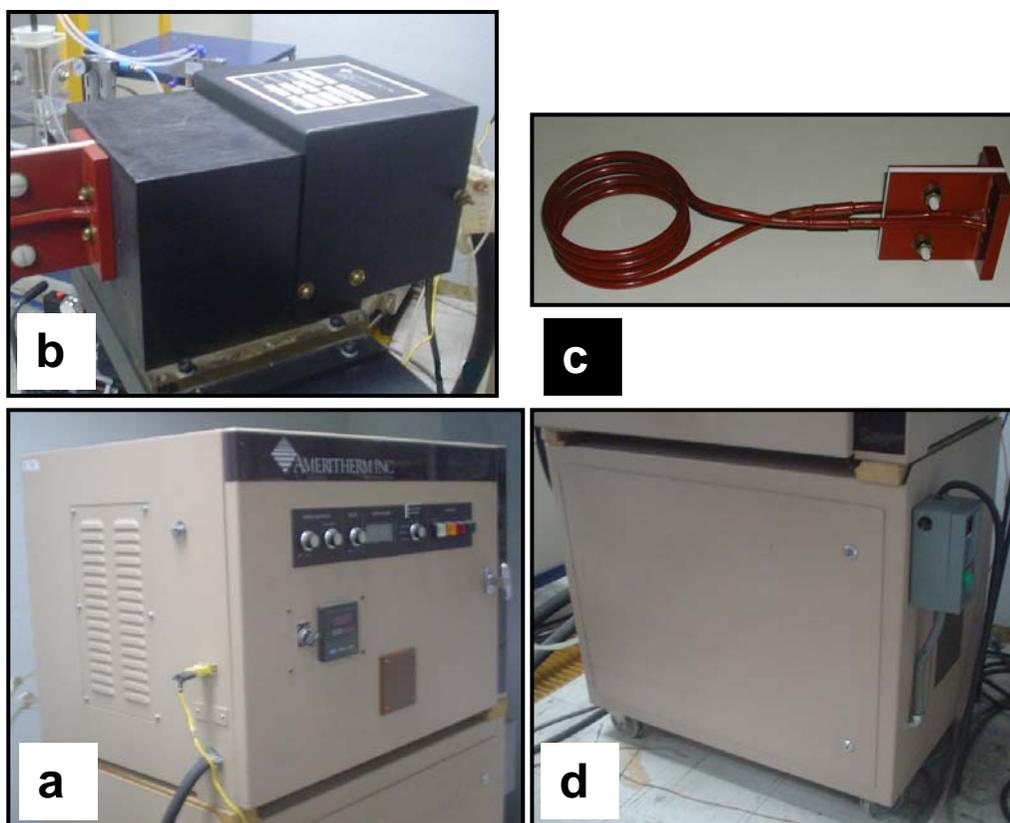
**Figura 5.11** (a) Calentamiento superficial preciso y localizado de un cilindro metálico por medio de campos magnéticos [10]. (b) Profundidad de calentamiento en función del rango de frecuencias, para baja frecuencia se tiene mayor penetración de calentamiento mientras que para alta frecuencia se tiene poca penetración de calentamiento [11].

El sistema de calentamiento por inducción funciona aplicando corriente alterna para generar un campo magnético como se muestra en la Figura 5.11(a). La corriente alterna se puede hacer fluir a baja o alta frecuencia (Figura 5.11 (b)). En el primer caso, el campo magnético y la corriente inducida penetran sobre la pieza llegando hasta el centro, en el segundo caso el campo magnético y la corriente inducida no penetran de igual manera, cubriendo solo áreas superficiales y por lo tanto causando el fenómeno llamado “efecto piel” [9,10].



**Figura 5.12** Componentes que conforman el equipo de calentamiento por inducción. (a) Unidad de potencia, (b) unidad remota, (c) bobina de inducción, (d) unidad de enfriamiento del equipo.

El sistema seleccionado en el presente trabajo se ilustra en la Figura 5.12, el cual consiste de 20 kw de potencia y un rango de frecuencias de 50-150 kHz, características necesarias para cumplir con los requerimientos de la presente aplicación, según la información proporcionada por el fabricante y de acuerdo a los requerimientos establecidos como objetivo. Dicho equipo calienta sólo la superficie de la muestra cilíndrica en una profundidad de 2 a 3 mm, causando el “efecto piel” deseado. Mediante el uso de este equipo, se alcanza un calentamiento de temperaturas superiores a 700 °C en un tiempo de 12 a 15 segundos, siendo posible modificar el rango temperaturas de calentamiento mediante la regulación de la potencia.



**Figura 5.13** Componentes que conforman el equipo de calentamiento por inducción utilizado. (a) Unidad de potencia, (b) unidad remota, (c) bobina de inducción, (d) unidad de enfriamiento del equipo.

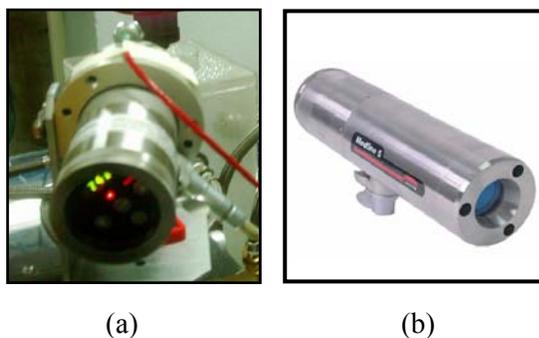
Para realizar los experimentos de validación de la MEFT no se contaba con la instalación del equipo mencionado anteriormente, por lo que se optó por el uso preliminar de un sistema de inducción ya existente en el laboratorio. El equipo de inducción utilizado para los ensayos de validación del banco de pruebas se muestra en la Figura 5.13, el cual cuenta con una potencia de 5 kw. De acuerdo a pruebas preliminares, ejecutadas con la finalidad de conocer la rapidez de calentamiento de este equipo, se encontraron tiempos más prolongados de calentamiento en comparación con el equipo de 20 kw. En estas pruebas, el calentamiento inicial de la probeta hasta la temperatura de 750 °C, se alcanzó en un tiempo de alrededor 8 minutos. Debido a la inercia térmica de los especímenes de ensayo, el calentamiento en ciclos subsiguientes se alcanzó en tiempos de alrededor de 5 minutos.

#### 5.4.4 Subsistema de medición de temperaturas.

Para obtener el monitoreo de evolución y control de temperaturas, se optó por pirometría óptica infrarroja.

Para cubrir la aplicación en el rango alto de temperaturas durante la etapa de calentamiento, se seleccionó un equipo de la serie G de la marca Ircon, comúnmente utilizado en aplicaciones similares debido a su desempeño y precisión. El pirómetro seleccionado fue del tipo Modline 5G con una resolución D/75 y un rango de temperaturas de 250-1000 °C (Figura 5.14). Dicho pirómetro se deberá instalar a una distancia de la bobina de 330 mm (13”) para medir la temperatura superficial del centro de la probeta, a través del espacio de 6.4 mm (0.25”) existente entre las espiras de la bobina. Este tipo de instrumentos se ajusta por medio de la emisividad de la superficie a medir. Para esta aplicación en particular la emisividad se ajustó alrededor de 0.85 debido al grado de oxidación de la probeta [13].

Para la medición de la muestra en la etapa de enfriamiento se seleccionó un pirómetro que cubriera intervalos bajos de temperatura (25-100 °C). El pirómetro utilizado es del tipo MiniRT Mod. RT440-06C-3 Ircon, con intervalo de medición de temperaturas de 0-600 °C y una resolución de D/10 [14]. El monitoreo de temperaturas en ambas etapas se complementó con el uso de termopares tipo “K” de 1.6 mm (1/16”) de diámetro insertados en el espécimen.



**Figura 5.14** (a) Se muestra el pirómetro MiniRT unido a la parte superior del pirómetro Modline 5G, (b) Imagen del pirómetro Modline 5G.

### 5.4.5 Subsistema de enfriamiento.

El sistema de enfriamiento tiene como finalidad reducir la temperatura superficial de la probeta, en el menor tiempo posible, de forma controlada y de manera repetitiva como parte de los ciclos térmicos.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el modo de enfriamiento seleccionado fue el de aspersión de agua. Para que este subsistema cumpla con el objetivo pretendido, debe existir un criterio acerca de la cantidad de calor removida por el líquido aplicado en la superficie de la probeta. Por tal razón se calculó el calor a extraer para reducir la temperatura de 600 a 40 °C, utilizando distintos gastos de agua a temperatura constante (25 °C) con el fin de predecir los tiempos de enfriamiento y seleccionar las boquillas aspersoras más adecuadas, así como su posicionamiento con respecto a la probeta de ensayos [15, 16].

#### 5.4.5.1 Cálculo de tiempo con respecto al gasto.

El primer paso fue calcular el flujo de calor mediante la Ecuación 6.1 [15]. En esta ecuación la masa se substituyó por el gasto en volumen y la densidad (Ecuación 6.2), con el fin de substituir distintos gastos.

$$Q = mcp(T_2 - T_1) \quad (6.1)$$

$$Q = (v\rho)cp(T_2 - T_1) \quad (6.2)$$

donde:

$Q$  = Flujo de calor.....(kw)

$v$  = Gasto en volumen.....(m<sup>3</sup>/seg)

$\rho$  = Densidad.....(kg/m<sup>3</sup>)

$cp$  = Calor específico.....(J/kg-°C)

$T_1$  = Temperatura inicial.....(°C)

$T_2$  = Temperatura final.....(°C)

Ya conocida la cantidad de calor a remover, se procedió a obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección mediante la Ecuación 6.3 [15].

$$\bar{h} = \frac{Q}{A(T_s - T_\infty)} \quad (6.3)$$

donde:

$\bar{h}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección .. (kw/m<sup>2</sup> -°C)

$Q$  = Flujo de calor.....(kw)

$A$  = Área del cilindro.....(m<sup>2</sup>)

$T_s$  = Temperatura de la superficie.....(°C)

$T_\infty$  = Temperatura del fluido.....(°C)

Finalmente se obtiene el tiempo con la ayuda del coeficiente de transferencia de calor por convección a través de la Ecuación 6.4 [16].

$$t = \frac{\rho V c_p}{\bar{h} A} \left[ \ln \frac{T_s - T_\infty}{T_o - T_\infty} \right] \quad (6.4)$$

donde:

$\rho$  = Densidad del sólido.....(kg/m<sup>3</sup>)

$V$  = Volumen del sólido.....(m<sup>3</sup>)

$c_p$  = Calor específico del sólido.....(J/kg-°C)

$\bar{h}$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección...(kw/m<sup>2</sup> -°C)

$A$  = Área del sólido.....(m<sup>2</sup>)

$T_s$  = Temperatura de la superficie.....(°C)

$T_\infty$  = Temperatura del fluido.....(°C)

$T_o$  = Temperatura inferior.....(°C)

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados de los distintos tiempos ( $t$ ) de enfriamiento obtenidos de acuerdo a la serie de gastos ( $v$ ) proporcionados, además del calor extraído ( $Q$ ) y el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $\bar{h}$ ) correspondientes.

**Tabla 5.1** Resultados obtenidos analíticamente del tiempo con respecto al gasto.

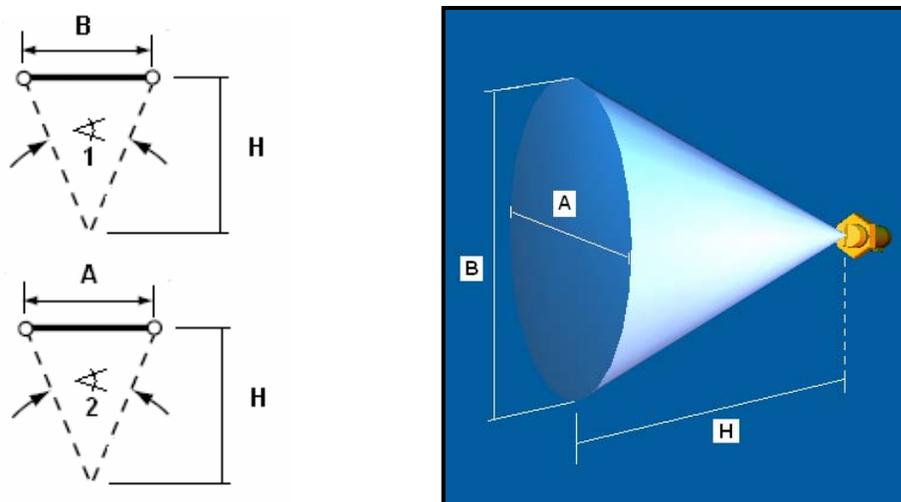
$v$		$Q$	$\bar{h}$	$t$
(m <sup>3</sup> /seg)	(l/min)	(kw)	(kw/m <sup>2</sup> -°C)	(seg)
$8.3 \times 10^{-5}$	5	195	21.59	8
$1.6 \times 10^{-4}$	10	390	43.18	4
$2.5 \times 10^{-4}$	15	585	64.75	2.5
$3.3 \times 10^{-4}$	20	780	86.36	2

#### 5.4.5.2 Pruebas preliminares para la selección de boquillas.

Se realizaron pruebas preliminares para la selección de las boquillas de acuerdo al patrón de impacto de aspersión. Se relacionó la distribución y cantidad de líquido a través de la cobertura y espesor del chorro, además del ángulo y la distancia de la boquilla al área de impacto [17].

Para llevar a cabo dichas pruebas se consideraron los siguientes parámetros (Figura 5.15):

- $H$  = Distancia de aspersión.
- $B$  = Cobertura de aspersión.
- $A$  = Ancho de aspersión.
- Angulo 1 = Correspondiente a cobertura de aspersión “B”
- Angulo 2 = Correspondiente al ancho de aspersión “A”



**Figura 5.15** Esquema del patrón de aspersión de impacto de las boquillas, en el cual se indican los parámetros principales a considerar para su selección.

En la Tabla 5.2 se presentan los tres tipos de boquillas utilizadas con sus características correspondientes. Las pruebas se ejecutaron a distancias de aspersión “H” de 50.8 mm (2”) hasta 304.8 mm (12”), con una presión de 2 Bar (30 Psi) y un gasto aproximado 6 l/min en cada boquilla (Figura 5.16). El objetivo en particular fue encontrar la ubicación más adecuada de las boquillas con respecto a la probeta, para cubrir la totalidad de su superficie a una cierta distancia de aspersión, considerando además el gasto previamente calculado para la aplicación.

**Tabla 5.2** Características de los tipos de boquillas contempladas para la presente aplicación [18].

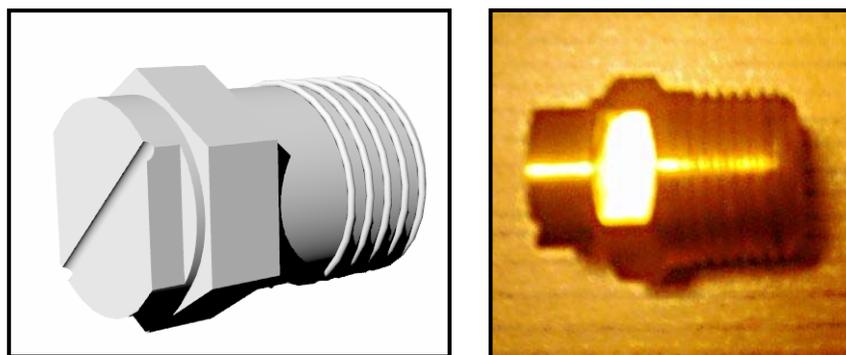
Tipo de boquilla	Plana ( <i>Flat Spray</i> )	Cuadrada ( <i>Square Full Cone</i> )	Ovalada ( <i>Oval Spray</i> )
Ángulo de aspersión	50°	60°	90°-60°
Código	670.604.16.BC	464.724.16.BE	400.291.30.11
Tipo de material	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Bronce
Tamaño	BC-6.4 mm (1/4”)	BE-9.5 mm (3/8”)	BE-9.5 mm (3/8”)
Presión	2 Bar (30 Psi)	2.8 Bar (40 Psi)	2.8 Bar (40 Psi)
Gasto	11.9 l/min	5.7 l/min	6.8 l/min



**Figura 5.16** En la imagen es posible identificar el patrón de aspersión de la boquilla tipo “*oval spray*”, durante las pruebas preliminares de análisis y selección del patrón de aspersión de impacto.

#### 5.4.5.3 Selección de boquillas.

De acuerdo a las pruebas preliminares y a las condiciones requeridas para la aplicación, se seleccionó la boquilla tipo “*oval spray*”, la cual presenta un patrón de aspersión cónico de impacto elíptico con ángulos de  $60^{\circ}$ - $90^{\circ}$  para “A” y “B” respectivamente. Se dispusieron 4 boquillas para cubrir la totalidad de la superficie a una distancia de aspersión “H” de 50.8 mm (2”).



**Figura 5.17** En la parte izquierda se muestra un dibujo de la boquilla tipo “*oval spray*” [8], mientras que en la imagen derecha una imagen real de la misma.

El tipo de boquilla seleccionada (presentada en la Figura 5.17) cuenta con dos ángulos de aspersión en su patrón de impacto. El ángulo de 90° para la cobertura de aspersión “B” y el ángulo de 60° para el ancho de aspersión “A”, como se muestra en la Figura 5.18. De acuerdo a estos datos se calculó de manera analítica la distancia de aspersión “H” para corroborarla con la obtenida de manera experimental. Para llevar a cabo las operaciones, se tomaron 100 mm de la altura de la muestra (ya que el resto de la longitud es ocupado por roscas) y 50 mm de ancho (diámetro aprox.). A partir de esto se calculó la distancia de aspersión “H” y el patrón de aspersión, ya que se conoce “A” (ancho) y “B” (altura) y sus respectivos ángulos de impacto. De esta manera fue posible evaluar si el patrón de impacto producido por cada boquilla cubriría el área designada de la superficie de la probeta.

El cálculo se realizó con la ecuación 6.5.

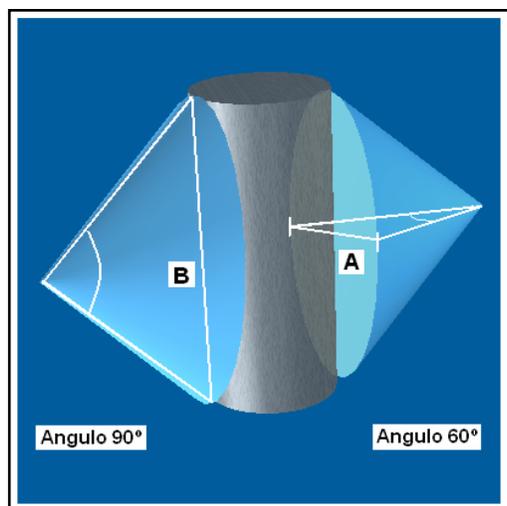
$$\tan \theta = \frac{CO}{CA} \quad (6.5)$$

donde:

$\theta$  = Ángulo conocido

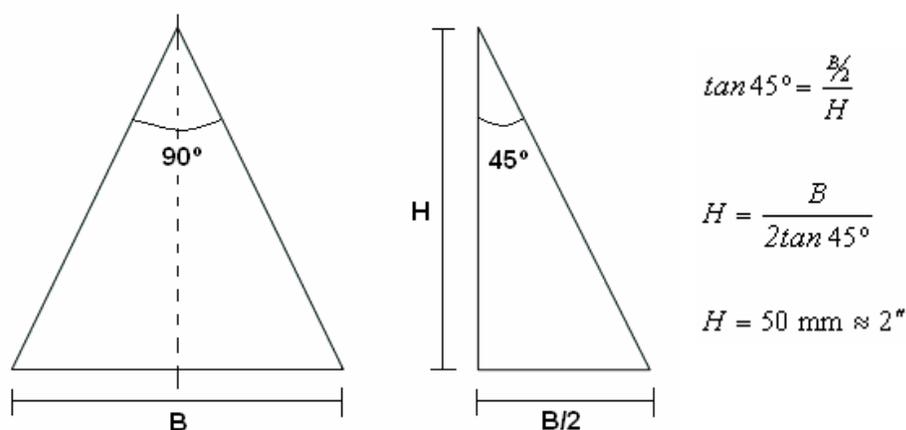
CO= Cateto opuesto

CA= Cateto adyacente



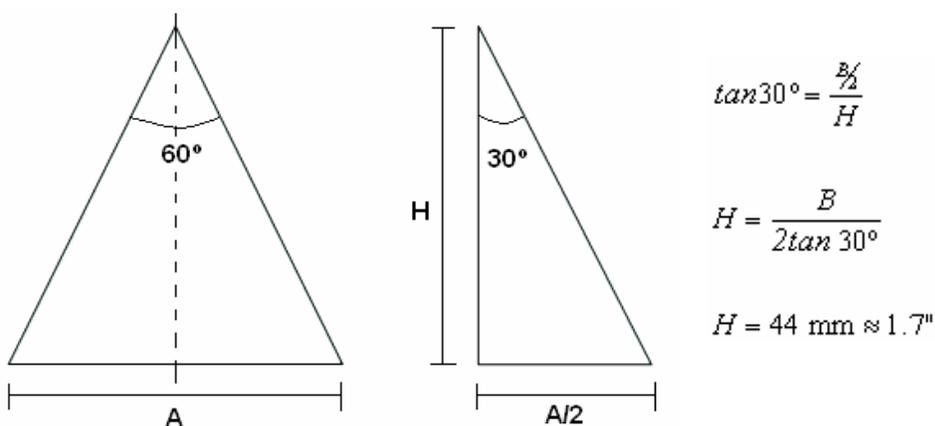
**Figura 5.18** Se muestra las características del patrón de aspersión de la boquilla seleccionada, el ancho y cobertura de aspersión (“A” y” B”) con sus respectivos ángulos.

El cálculo de la distancia de aspersión “H” se obtuvo a partir de la cobertura de aspersión “B” correspondiente a los 100 mm de altura o longitud de la muestra y el ángulo de 90° proporcionado para este parámetro (Figura 5.19).



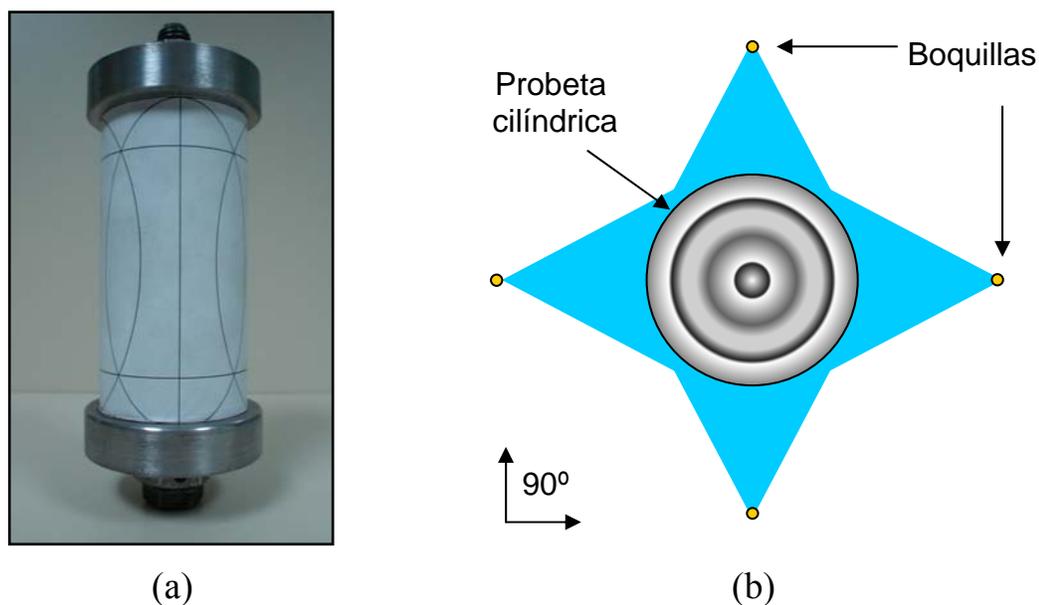
**Figura 5.19** Datos y esquemas utilizados para encontrar la distancia de aspersión “H” conociendo la cobertura de aspersión “B” y el ángulo de aspersión correspondiente.

El cálculo de la misma distancia “H” se obtuvo ahora a partir del ancho de aspersión “A” correspondiente a los 50 mm de diámetro de la muestra y el ángulo 60° para este parámetro (Figura 5.20).

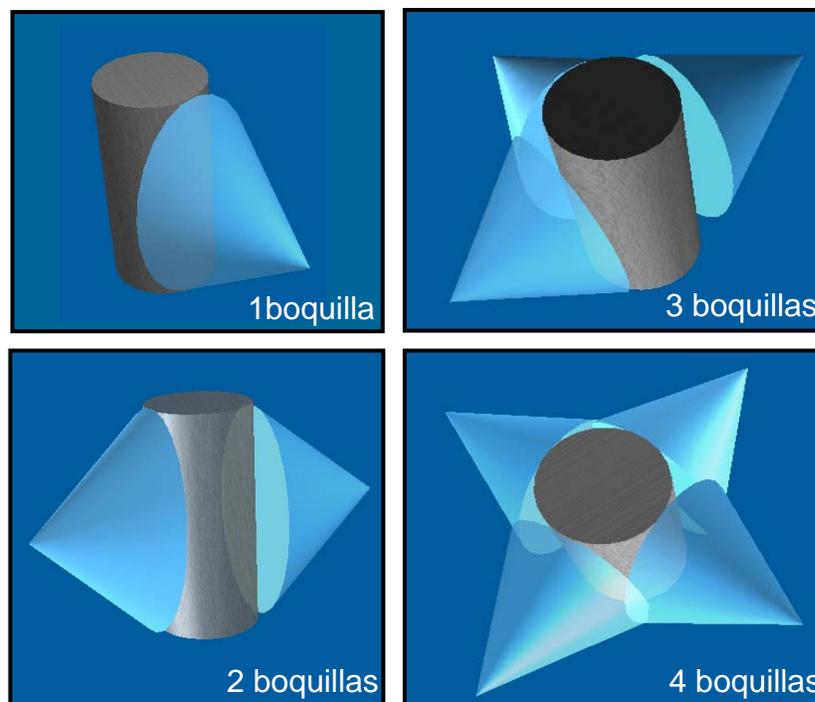


**Figura 5.20** Datos y esquemas utilizados para encontrar la distancia de aspersión “H”, conociendo el ancho de aspersión “A” y el ángulo de aspersión para el mismo.

La distancia de aspersión “H” para el ángulo de  $90^\circ$  fue de 50.8 mm (2”), mientras que para la “H” con un ángulo de  $60^\circ$  el valor obtenido fue de 44 mm (1.7”). Se demuestra, por lo tanto, que este tipo de boquilla es la indicada para la aplicación, debido a que cubre el área (tanto ancho como altura) designada para cada una de ellas, tal y como se esquematiza en la Figura 5.21 (a). En la Figura 5.21 (b) se muestra una vista superior del acomodo de las boquillas en el contorno de la muestra mientras que en la Figura 5.22 se presenta un dibujo de la vista general del patrón de aspersión de impacto desde una boquilla hasta las 4 boquillas designadas.



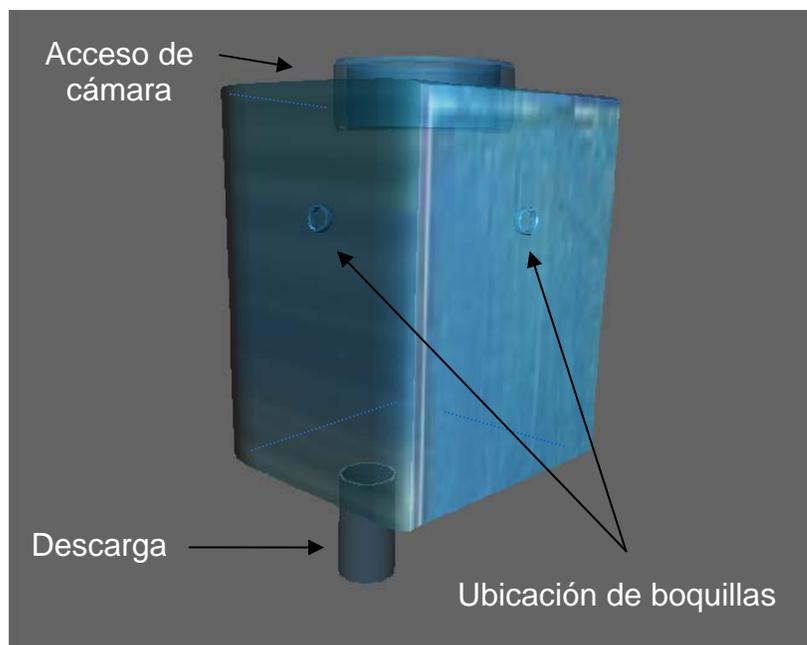
**Figura 5.21** (a) Esquema del patrón de aspersión de impacto elíptico generado sobre la superficie de la probeta. (b) Vista superior del patrón de aspersión sobre la periferia de la probeta en la cual se observa el ángulo de  $90^\circ$  formado entre la posición de una boquilla con respecto a otra.



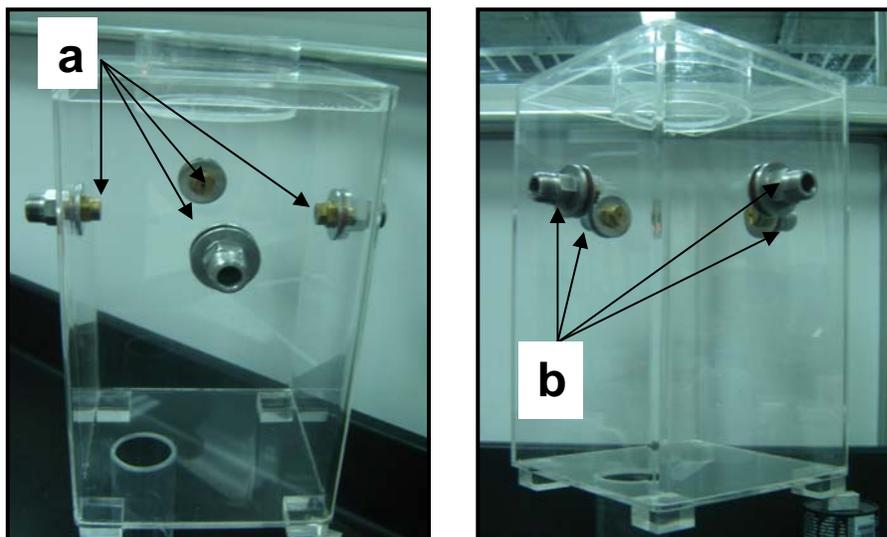
**Figura 5.22** Esquema que representa el patrón de aspersion en 3D sobre la periferia de la probeta, con diferente número de boquillas.

#### 5.4.5.4 Cámara de enfriamiento.

Debido a que el salpique provocado por las 4 boquillas y el choque entre sus aspersiones con la superficie de la probeta es considerable, se diseñó una estructura de acrílico cerrada en forma cúbica, en la cual las boquillas están colocadas estratégicamente. Dicha estructura es llamada “cámara de enfriamiento” (Figura 5.23 y 5.24), la cual fue diseñada y construida posterior a la selección de las boquillas para ubicarlas en sus respectivos lugares y cumplir con las distancias y alturas calculadas para cubrir uniformemente la superficie del espécimen. La parte superior de dicha cámara cuenta con una tapa con un orificio central de 36.5 mm (2½”), que permite introducir la probeta y llevar a cabo el enfriamiento por medio de la aspersion producida por las boquillas. Así mismo en la parte inferior cuenta con un tubo cilíndrico de 25.4 mm (1”) como descarga, para desalojar el agua en su totalidad y evitar estancamientos.



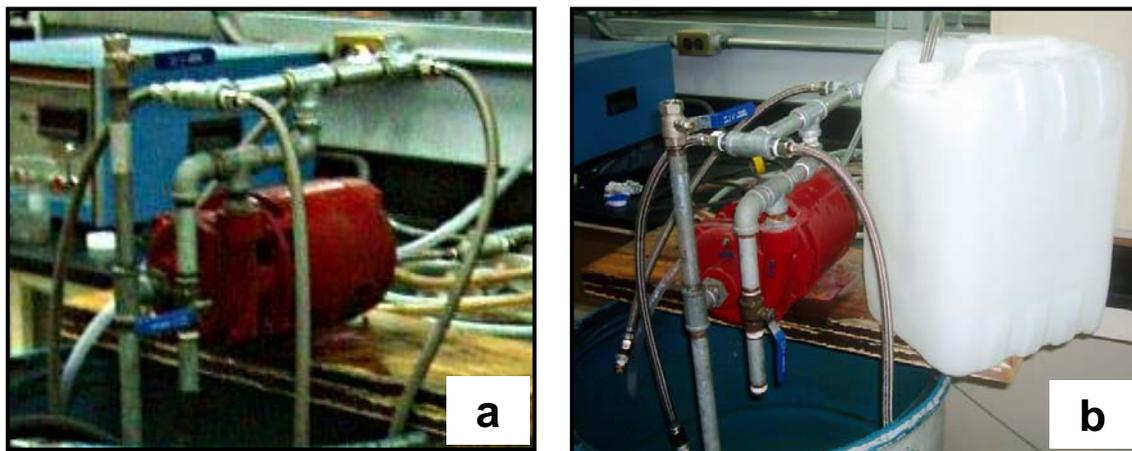
**Figura 5.23** Esquema de la vista general de la cámara de enfriamiento. Se indican dos de las perforaciones en las cuales se ubican las boquillas, el acceso a la cámara en la parte superior y la descarga en la parte inferior.



**Figura 5.24** Imágenes de la cámara de enfriamiento, (a) se aprecian las cuatro boquillas empotradas en las paredes de la cámara, (b) se indican sus respectivas conexiones diseñadas y maquinadas de acero inoxidable para evitar fugas y corrosión.

#### 5.4.5.5 Bomba de flujo de agua.

La bomba seleccionada para cumplir con los rangos de flujo requeridos, según los cálculos previamente realizados, es de tipo Jet de  $\frac{3}{4}$  HP de 3500 RPM con rango de presiones desde 2 - 4 bar (30-60 Psi) y gastos de 76-23 l/min [19]. Sin embargo debido a la falta del equipo mencionado anteriormente por cuestiones de instalación, se utilizó una bomba Siemens tipo jet de  $\frac{1}{4}$  Hp de 3450 RPM con rango de presiones de 2 - 4 bar (30-60 Psi) y succión-descarga de 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$ " ), la cual ofreció similares prestaciones (Figura 5.25 (a)). A diferencia de la primer bomba seleccionada, ésta sólo alcanzó un gasto total de 20 l/min (5 l/min por boquilla), a la presión de trabajo aproximada de 2 Bar (30 Psi). Dicho gasto está dentro del rango de los calculados analíticamente en la Tabla 5.1, siendo por lo tanto útil para los fines de la aplicación. En la Tabla 5.3 se muestran los datos obtenidos en las pruebas preliminares realizadas con la finalidad de conocer el gasto real que arroja la bomba a la presión de trabajo ya mencionada. Se utilizó un depósito graduado y un cronómetro para llevar a cabo las mediciones, como se presenta en la Figura 5.25 (b).



**Figura 5.25** (a) Imagen de la bomba Siemens tipo Jet de  $\frac{3}{4}$  Hp a 3500 RPM. (b) Se observan componentes tales como la bomba, mangueras, boquillas y el depósito graduado, utilizados en las pruebas para conocer el gasto.

**Tabla 5.3** Medición experimental del gasto proporcionado por la bomba de ¼ Hp” con 1 y 4 boquillas.

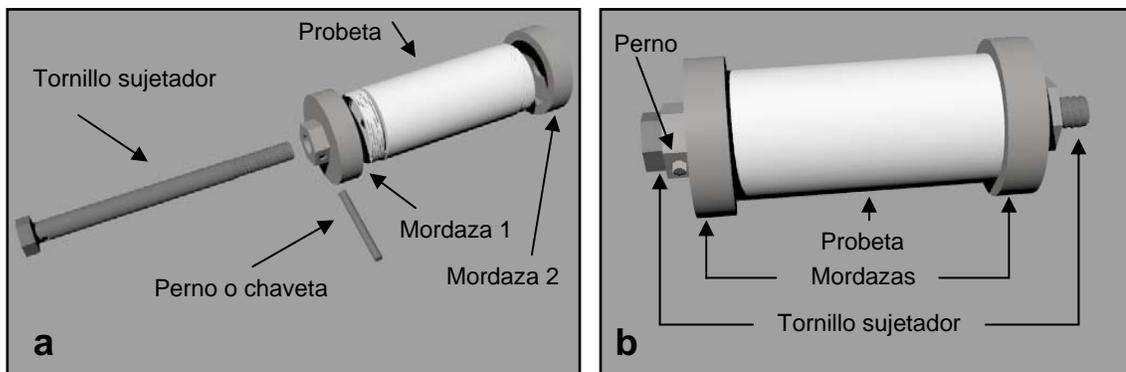
Depósito (l)	1 Boquilla		4 Boquillas	
	Tiempo (seg)		Tiempo (seg)	
5	58	59	17	16
10	116	114	30	30
15	178	179	47	46
20	239	242	62	61

#### 5.4.6 Subsistema de sujeción.

El subsistema de sujeción se diseñó y construyó con el objetivo de restringir cambios volumétricos de manera externa y actuar como un marco de esfuerzos de tensión-compresión sobre la probeta, con la finalidad de cumplir con uno de los principios de la fatiga térmica [7].

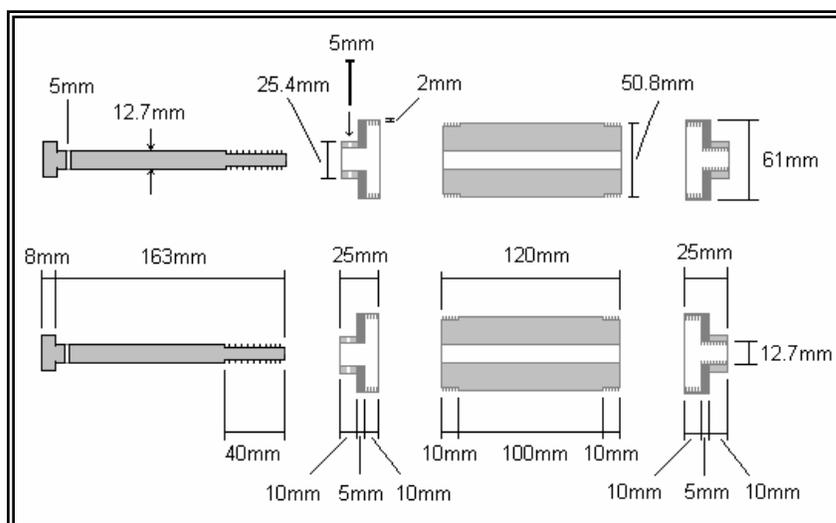
Es importante mencionar las características y dimensiones de la muestra para obtener su relación con los componentes del subsistema de sujeción. La probeta cuenta con 50.8 mm (2”) de diámetro por 120 mm (4.7”) de longitud de los cuales 10 mm son utilizados en ambos extremos para roscas. Asimismo posee un barreno 12.7 mm (½”) de diámetro que pasa longitudinalmente por el centro.

Los componentes que conforman al subsistema de sujeción son dos mordazas, un tornillo sujetador y un perno (ésta configuración se esquematiza mediante la Figura 5.26). Las dos mordazas se maquinaron con roscas interiores de tal forma que sujetaran a la probeta por los extremos. El tornillo pasa a la mordaza 1 y a la probeta y se enrosca en la mordaza 2. La mordaza 1, la cual queda ubicada cerca de la cabeza del tornillo, es sujeta a éste por medio de un perno (Figura 5.26 (a)). De esta forma se mantienen perfectamente fijos los cuatro elementos, ajustándose perfectamente al cuerpo de la probeta, como se muestra en la Figura 5.26 (b). En la Figura 5.27 se muestran las dimensiones de los componentes que conforman a dicho subsistema.



**Figura 5.26** (a) Componentes del subsistema de sujeción de la probeta. (b) Componentes del subsistema de sujeción y muestra ensamblados [8].

Al llevar a cabo los experimentos, la probeta es expuesta a constantes cambios térmicos, esto significa que se calienta y enfría cíclicamente como parte de los ensayos experimentales. La función del subsistema de sujeción es restringir de manera externa la expansión térmica en dirección longitudinal que se produce al momento de calentar el espécimen, generando de tal forma esfuerzos compresivos, mientras que genera esfuerzos de tensión en la misma dirección al evitar la contracción de la probeta durante la etapa de enfriamiento.



**Figura 5.27** El esquema que muestra las partes que componen al subsistema de sujeción o amordazamiento con sus dimensiones correspondientes en milímetros.

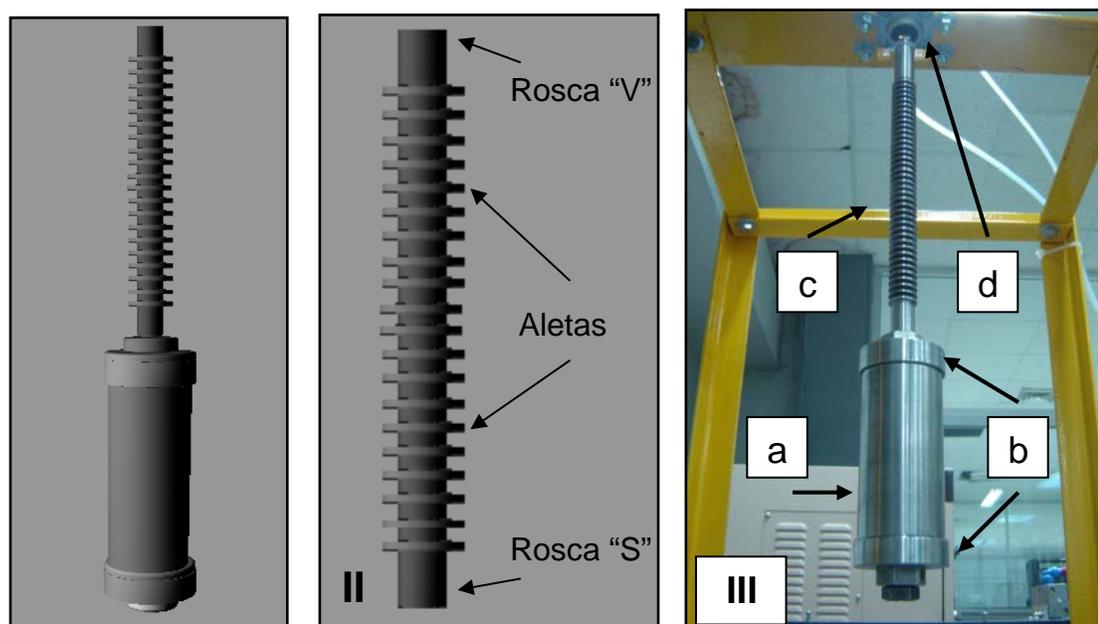
El material utilizado en las mordazas es de acero H13 grado herramienta para trabajo en caliente el cual posee como características: baja distorsión, buena tenacidad, buena dureza al rojo, resistencia al desgaste en caliente y al choque térmico [6]. El tornillo seleccionado cuenta con alta resistencia, ya que soporta los esfuerzos tanto de compresión como de tensión generados en las mordazas por parte de la expansión y contracción de la probeta. El subsistema de sujeción es independiente de la muestra (Figura 5.28), además de ser opcional debido a que se puede llevar a cabo el estudio del comportamiento del mecanismo de falla de fatiga térmica en ausencia de éste. Asimismo se tiene la versatilidad de modificarlo en experimentos que requieran cambios dimensionales y geométricos en el espécimen.



**Figura 5.28** Se muestran una serie de imágenes del subsistema de sujeción ensamblado y sin ensamblar.

#### 5.4.7 Extensión del vástago del actuador.

El funcionamiento de este componente tiene similar aplicación que el usado en la máquina prototipo. La extensión permitió separar la muestra del vástago del pistón para evitar un calentamiento excesivo del mismo durante las etapas de calentamiento. Ésta se fabricó a partir de una barra cilíndrica, con dimensiones de 19 mm (3/4") de diámetro por 250 mm de longitud. De acuerdo experimentos preliminares se decidió crear aletas en dicha barra, con el objetivo de disipar el calor transferido por la probeta y el sistema de calentamiento. Para formar las aletas de enfriamiento, la barra fue maquinada a una profundidad radial de 1.5 mm (1/16") formando anillos ubicados a distancias de 3 mm (1/8") entre sí. Con la reducción del material se minimizó la transferencia de calor por conducción. El diámetro de la barra se redujo hasta un punto óptimo de tal manera que no fuese a distorsionarse por efecto de las altas temperaturas (Figura 5.29).



**Figura 5.29** En las imágenes se observa: (I) La extensión sujeta a la muestra, la cual se encuentra a su vez montada en el subsistema de sujeción. (II) Se indican las aletas de enfriamiento y las roscas internas en los extremos de la extensión. (III) La muestra (a), el subsistema de sujeción (b), la extensión (c) y el vástago del pistón (d).

En la Figura 5.29 (II) se indican, además de las aletas, las roscas internas en los extremos de la extensión. La rosca señalada como “V” se une al vástago del pistón mientras la señalada como “S” al subsistema de sujeción-muestra. La rosca interna “V” se realizó a mayor profundidad con la finalidad de permitir realizar ajustes de altura al centrar la muestra con respecto a la bobina de inducción. Para este subsistema se utilizó acero H13 grado herramienta para trabajo en cliente, debido a las temperaturas a las que son expuestas ciertas secciones de su longitud, tales como el extremo unido a la probeta y la parte del centro al introducirse en la bobina durante la etapa de enfriamiento.

#### 5.4.8 Subsistema de desplazamiento.

Para realizar los ciclos térmicos se requiere mover la probeta de la zona de calentamiento a la de enfriamiento y viceversa, para lo cual se dispuso de un mecanismo capaz de desarrollar esta acción. El subsistema de desplazamiento es un mecanismo neumático, con los componentes necesarios, para realizar el desplazamiento eficiente de la probeta de manera automática y precisa, de una etapa a otra. El equipo neumático está integrado por diversos componentes, tales como: pistón de doble efecto resistente a altas temperaturas, unidad de mantenimiento, válvula de corredera, electro válvula, conectores, manguera y compresor de aire. Para regular la velocidad de la carrera del cilindro se posicionaron dos estranguladores de escape en la válvula utilizada. Al realizar las conexiones necesarias para formar el circuito del sistema se utilizó tubo de material sintético flexible, resistente a altas temperaturas.

#### 5.5 Descripción y operación de MEFT.

Ya presentados los subsistemas y componentes que integran la MEFT se procederá a dar una descripción de la misma y de su operación como un sistema.

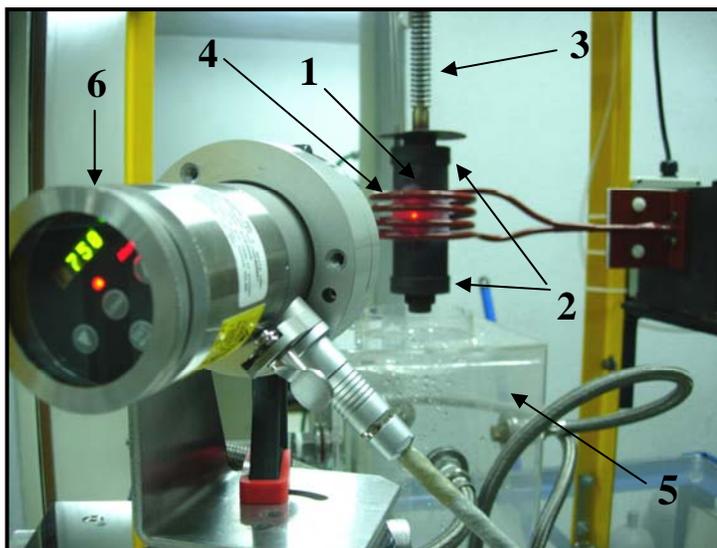
La máquina de ensayos experimentales, fue diseñada con la finalidad de reproducir el fenómeno de la fatiga térmica en distintos materiales metálicos bajo una amplia gama de

condiciones controladas. El funcionamiento de dicho banco de pruebas consiste en generar un determinado número de ciclos térmicos sobre la probeta, de acuerdo al experimento, controlando los intervalos de temperaturas y las razones de cambio en éstas. Se restringe a la probeta bajo los dos principios de la fatiga térmica [7]: primero por su propio volumen al producir un gradiente térmico mediante el sistema de calentamiento por inducción y el segundo con el subsistema de sujeción al provocar un marco externo de esfuerzos de tensión-compresión. Éstos en conjunto producirán esfuerzos térmicos en la muestra conduciendo a la falla por agrietamiento térmico.

La MEFT es capaz de trabajar en un intervalo de temperaturas entre 35 y 750 °C, además de operar en dos diferentes modos de control: control-temperatura y control-tiempo. De esta manera, las pruebas pueden ser controladas de acuerdo a las siguientes condiciones: temperatura máxima y mínima, tiempo de temperatura máxima y mínima, tiempo de sostenimiento en temperatura máxima y mínima (o temperaturas intermedias), tiempo de ciclos y número total de ciclos. Asimismo las pruebas pueden ser desarrolladas con o sin el subsistema de sujeción, con el fin de evaluar la influencia de un marco externo de esfuerzos aplicados. De esta manera se pretende evaluar la resistencia que presentan las diferentes aleaciones metálicas a la fatiga térmica así como clasificarlas de acuerdo a los resultados obtenidos y analizados.

La Figura 5.30 y la Figura 5.31 muestran la MEFT en operación durante las etapas de calentamiento y enfriamiento respectivamente. En resumen, la probeta (1) es amordazada por el subsistema de sujeción (2). Éste sistema se encuentra sujeto a una extensión (3), la cual a la vez está enroscada al vástago del actuador del subsistema de desplazamiento. Dicho actuador traslada a la probeta a la posición superior, dentro de la bobina del sistema de inducción (4) para llevar a cabo el calentamiento. Posteriormente al llegar a la temperatura determinada, el subsistema de desplazamiento cambia la posición de la probeta y la dirige hacia la posición inferior, al interior de la cámara del subsistema de enfriamiento (5), efectuando de esta manera los ciclos térmicos establecidos. La temperatura superficial de la probeta es monitoreada mediante el uso de un pirómetro óptico infrarrojo (6) durante las etapas de calentamiento, mientras que otro

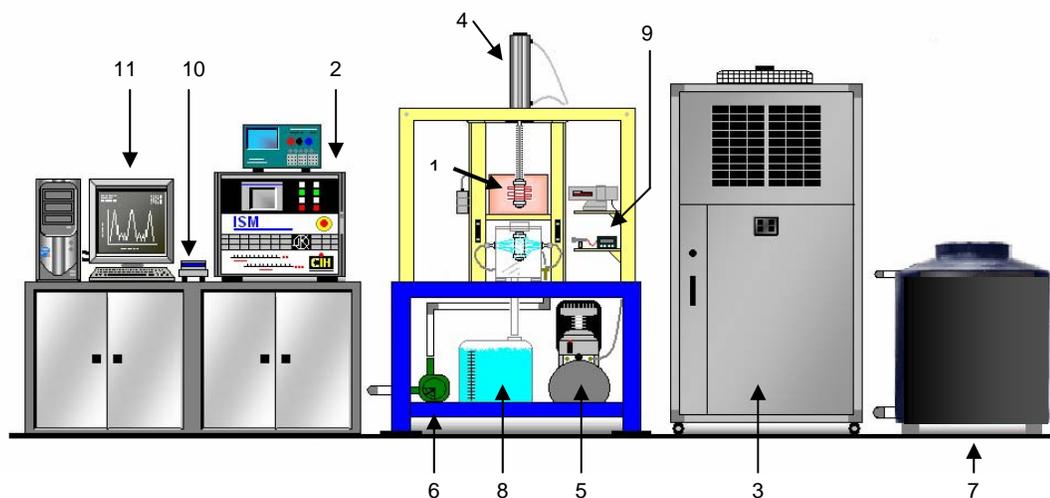
pirómetro es usado durante las etapas de enfriamiento. Conjuntamente se utilizan termopares para el registro de las temperaturas. Posteriormente son evaluados los datos arrojados por la máquina tales como el registro del tiempo, número de ciclos y temperaturas.



**Figura 5.30** Imagen de la MEFT durante la etapa de calentamiento de los ciclos térmicos. (1) Probeta, (2) subsistema de sujeción, (3) extensión, (4) bobina de inducción, (5) cámara de enfriamiento, (6) pirómetro óptico infrarrojo.



**Figura 5.31** Imagen de la MEFT durante la etapa de enfriamiento. Se aprecia la probeta ubicada dentro de la cámara de enfriamiento.



**Figura 5.32** Esquema de la máquina de ensayos de fatiga térmica y su equipo periférico.

En la Figura 5.32 se muestra un esquema de la MEFT en la cual se indican componentes que forman parte de los subsistemas, tales como: (1) unidad remota, (2) unidad de potencia, y (3) unidad de enfriamiento del subsistema de inducción; (4) actuador neumático y (5) abastecimiento de aire (compresor) del subsistema de desplazamiento; (6) bomba abastecedora de agua, (7) depósito de agua y (8) descarga del subsistema de enfriamiento; (9) pirómetro óptico para monitoreo temperaturas inferiores, (10) tarjeta de adquisición de datos y (11) computadora de registro, encontrándose estos últimos dos componentes en proceso de desarrollo e implementación.

## 5.6 Procedimiento experimental.

Posterior al diseño y construcción de la MEFT se procedió a realizar los experimentos de validación. Se realizó la caracterización microestructural del acero a utilizar y se obtuvieron las variables presentes en los diferentes procesos que involucran el fenómeno de fatiga térmica. Estas fueron necesarias para designar los parámetros y condiciones bajo las cuales trabajaría el banco experimental.

Consideraciones de experimentación:

Material a ensayar:

- Análisis químico.
- Pruebas de dureza Rockwell escala “C”.
- Pruebas de microdureza Vickers.
- Caracterización microestructural.
- Tratamiento térmico.

Condiciones experimentales:

- Temperaturas de calentamiento/enfriamiento.
- Número de ciclos térmicos.
- Duración del ciclo térmico.
- Restricción volumétrica.

## 5.6.1 Caracterización del material acero D2.

### 5.6.1.1 Acero D2 (sin tratamiento).

El material utilizado para la validación experimental del banco de pruebas fue acero grado herramienta AISI D2 alto carbono, alto cromo, típico para trabajo en frío y de baja tenacidad [5, 6], de composición química nominal mostrada en la Tabla 5.4. Dicho material se adquirió sin tratamiento térmico

**Tabla 5.4** Composición química nominal del acero D2 obtenida mediante un espectrómetro de emisión óptica.

ANÁLISIS QUÍMICO PROMEDIO AISI (% PESO)									
Dureza de entrega máxima; Brinell (Bn) / Rockwell C (HRC)									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Fe	Bn/HRC
D2	1.62	0.45	0.35	10.97	0.69	0.60	0.42	84.82	262/26

Se conservaron dos especímenes testigo de acero D2, una sin tratamiento térmico y otra con tratamiento térmico de endurecido, con la finalidad de llevar a cabo comparaciones de la microestructura entre sí y con las probetas que fueron sometidas a los ensayos experimentales (Tabla 5.5).

**Tabla 5.5** Características de los cuatro tipos de probetas.

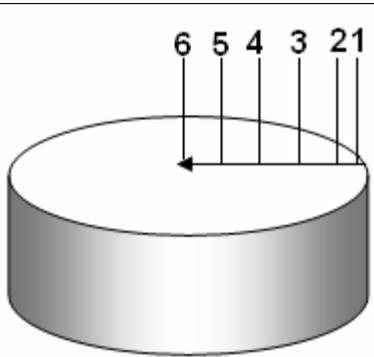
Probeta	Tratamiento térmico endurecimiento	Maquinado	Pruebas experimentales
Testigo 1	No	No	No
Testigo 2	Si	No	No
P/ ensayos 1	Si	Si	Si
P/ ensayos 2	No	Si	Si

### Pruebas de dureza.

Antes de llevar a cabo el análisis metalográfico se realizaron los ensayos de dureza escala Rockwell “C” sobre la probeta sin tratamiento térmico, los cuales fueron hechos en un durómetro con el indentador indicado a una carga de 150 kg. Los ensayos se ejecutaron de manera radial, de la superficie hacia el centro de la probeta. En la Tabla 5.6 se muestran la serie de mediciones obtenidas.

**Tabla 5.6** Durezas obtenidas en dirección radial sobre la probeta sin T. T.

No.	Distancia(mm)	Dureza(HRC)
1	2	30
2	5	27
3	10	26
4	15	24
5	20	23
6	25	22



### Pruebas de microdureza.

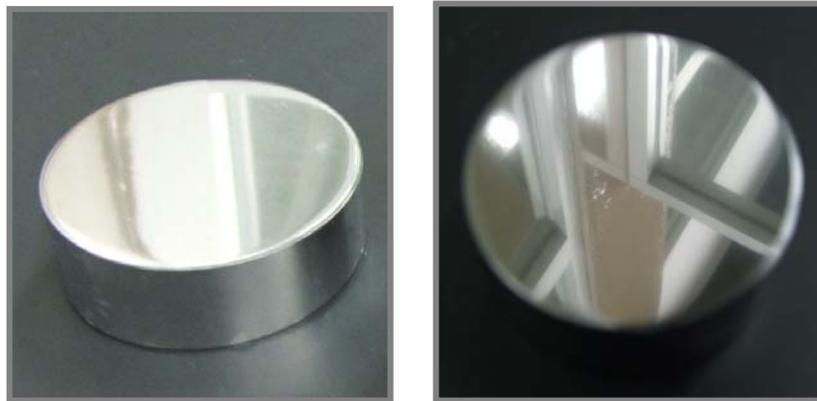
Se efectuaron ensayos de microdureza Vickers con cargas de 100, 200 y 300 g durante un tiempo de 15 segundos (Tabla 5.7). Los ensayos se realizaron en una zona intermedia del radio de la probeta. Al convertir los resultados a dureza Rockwell escala “C”, se encontró que los valores oscilan entre 26 y 30 HRC, siendo similares a los encontrados anteriormente en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.7** Microdurezas obtenidas en probeta sin tratamiento térmico.

No. de ensayo	1	2	3
Carga (g)	100	200	300
Tiempo (seg)	15	15	15
Promedio diagonales	25	35	45
Dureza Vickers	296.7	302.7	274.7

### Caracterización metalográfica.

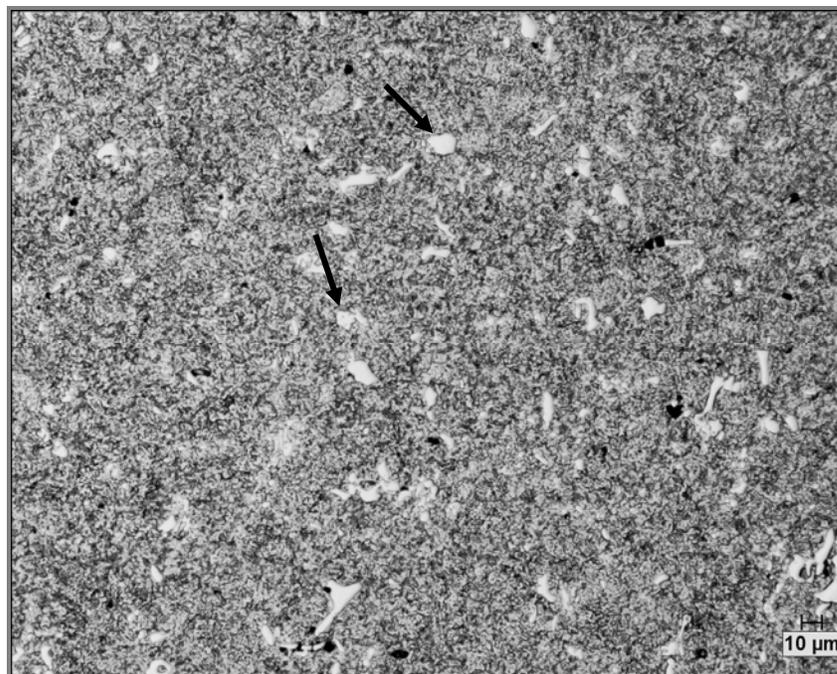
Se realizó un análisis metalográfico en una de las caras de la probeta con el fin de obtener micrografías y observar su microestructura. Se llevó a cabo el desbaste de la cara seleccionada del espécimen con lijas a partir del número 320 hasta 2400 y se pulió con lubricante, paño y alumina de  $1\ \mu\text{m}$  (Figura 5.33). Posteriormente el ataque químico se realizó con Nital al 2% durante un tiempo de 5 segundos. Con este ataque se generó el contraste adecuado entre las fases, revelándose la matriz y los carburos.



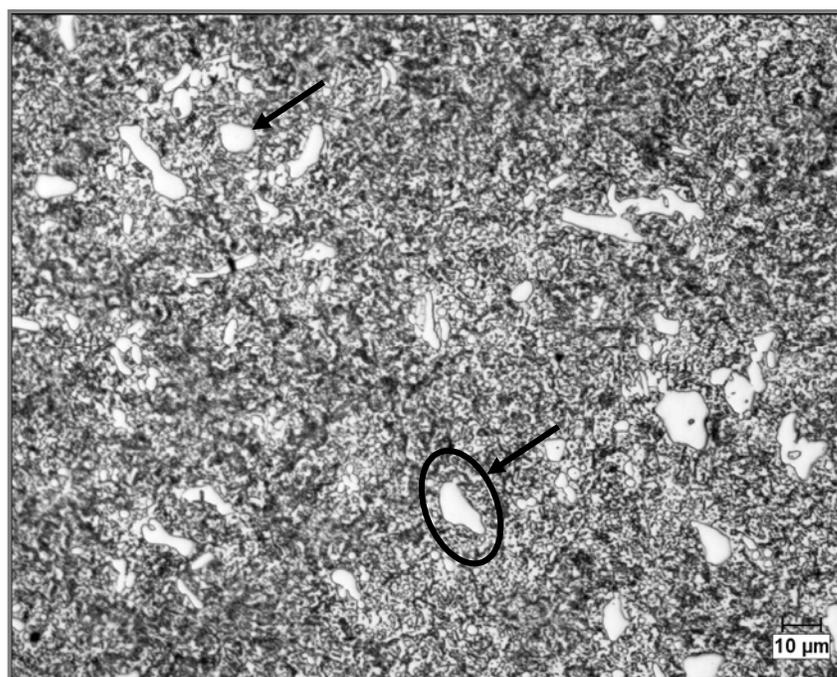
**Figura 5.33** Se muestra una de las caras pulidas en acabado espejo de la probeta sin tratamiento térmico, la cual posee dimensiones de 25.4 mm (1") de altura por 50.8 mm (2") de diámetro.

### Micrografías.

Se tomaron una serie de imágenes a 50x, 100x, 200x y 400x. Las imágenes presentadas son a 200x y 400x, las cuales proporcionan una resolución adecuada que facilitó el análisis de la microestructura. En la Figura 5.34 se muestran imágenes que presentan una estructura con carburos en forma de partículas masivas (blancas), en una matriz de martensita (gris).



(a)



(b)

**Figura 5.34** En la imagen (a) se muestra la microestructura del acero D2 a 200x, mientras que en la imagen (b) la misma a 400x. Además se señalan los carburos como partículas masivas en ambas imágenes.

### 5.6.1.2 Acero D2 (endurecido).

Se conservó otra probeta testigo solamente con el tratamiento térmico de endurecimiento (Tabla 5.8). El espécimen no fue sometido a los ensayos experimentales. La finalidad fue realizar comparaciones de éste con el espécimen testigo sin tratamiento térmico y con las probetas probadas en el banco experimental.

#### **Tratamiento térmico.**

Se proporcionó un tratamiento térmico de endurecimiento (Tabla 5.8) para incrementar la dureza hasta 60 HRC, con el objetivo de volver al material más frágil y provocar una disminución en su tenacidad. De esta manera se facilita el agrietamiento al ser sometido a los ciclos térmicos experimentales.

**Tabla 5.8** Tratamiento térmico de endurecimiento.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENDURECIMIENTO (°C)				
	Austenitizado	Enfriamiento	Revenido	Enfriamiento
D2	950-980 °C (8 hrs)	Aire	300 °C (2 hrs)	Aire

#### **Pruebas de dureza.**

Se realizaron los ensayos de dureza bajo las mismas condiciones anteriormente descritas en el punto 5.6.1.1. Se ejecutaron dichos ensayos de manera radial, de la superficie hacia el centro de la pieza, y de manera longitudinal con una carga de 150 kg, obteniéndose valores de 60 HRC en todas las mediciones elaboradas.

#### **Caracterización metalográfica.**

Del mismo modo se realizó un análisis metalográfico en una de las caras de esta sección de la probeta con el fin de obtener micrografías y observar la microestructura del acero en el estado endurecido. Se llevó a cabo el desbaste de la cara seleccionada con lijas a partir del número 80 hasta 2400 y se pulió con lubricante, paño y alumina de 1  $\mu\text{m}$ . La probeta preparada se observa en la Figura 5.35.

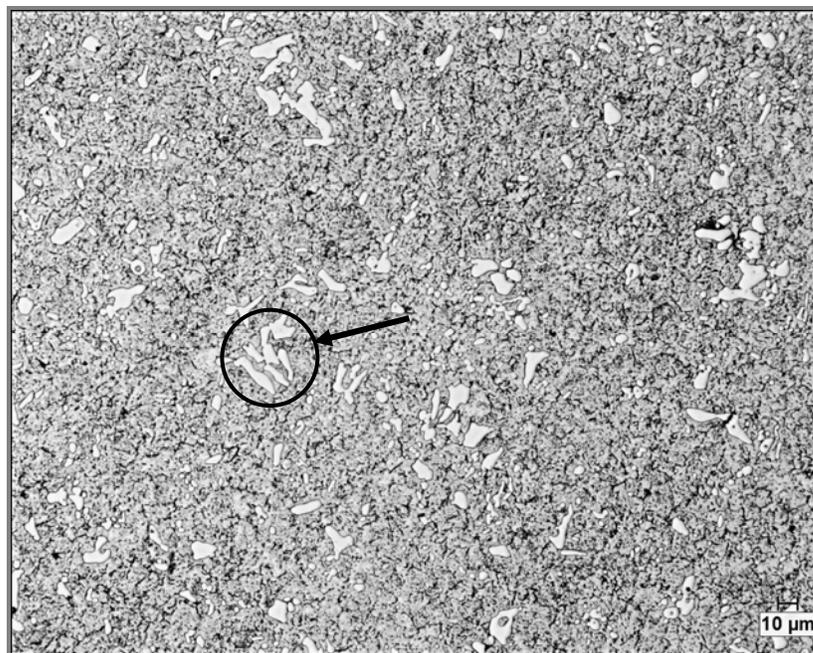
Posteriormente el ataque químico se realizó con Nital al 2% durante un tiempo de 5 a 8 segundos para observar progresivamente como se generaba el contraste adecuado entre las dos fases de matriz y carburos, como se muestra en las Figuras 5.36 y 5.37.



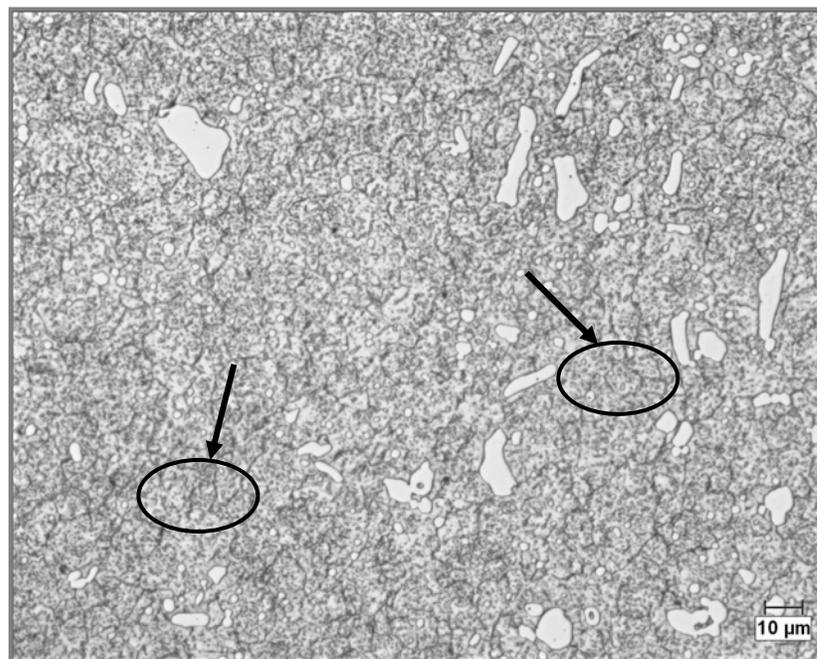
**Figura 5.35** Imagen de una sección de barra de acero D2 con un tratamiento térmico de endurecimiento, y una de sus caras pulidas a acabado espejo.

### **Micrografías.**

Se tomaron una serie de imágenes a 50x, 100x, 200x y 400x. Se seleccionaron las imágenes a 200x y 400x. En estas imágenes, presentadas en la Figura 5.36, se observa después del tratamiento térmico proporcionado, el dominio de una matriz martensítica con fronteras de austenita, además de no encontrarse cambio aparente tanto en el tamaño como en la dispersión de los carburos presentes.

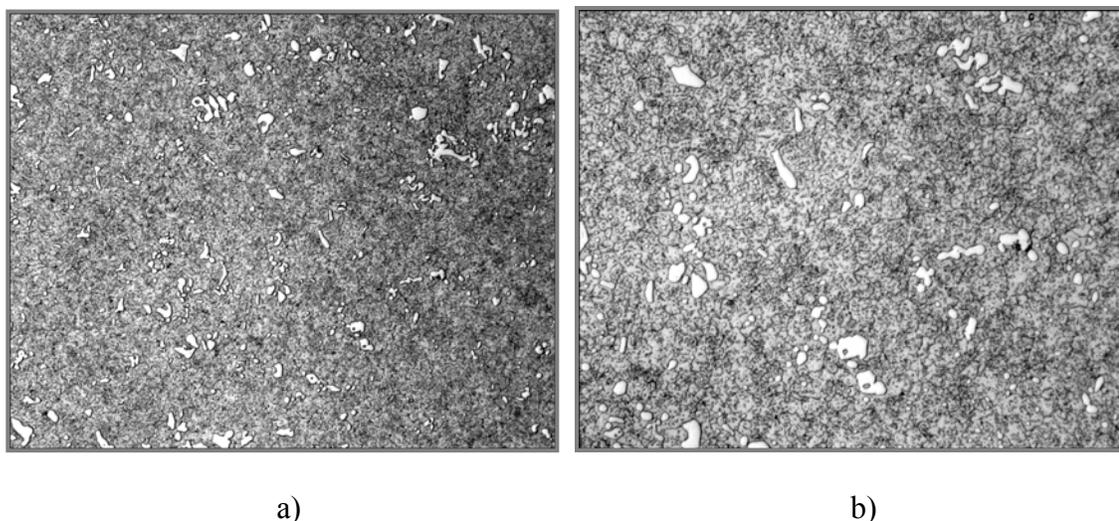


(a)



(b)

**Figura 5.36** En la imagen (a) se muestra la microestructura del acero D2 con tratamiento térmico de endurecimiento a 200x, así mismo se indican los carburos. (b) La misma imagen a 400x, señalándose las fronteras de grano de la austenita.



**Figura 5.37** En las imágenes (a) y (b) se muestran las mismas microestructuras a 200x y 400x respectivamente. Estas imágenes son presentadas con ataque de Nital al 2% con un tiempo de 8 segundos, es decir 3 segundos más que las presentadas en la Figura 5.36.

Antes de efectuar los ensayos de validación se realizó el maquinado de siete probetas, de acuerdo a las dimensiones establecidas anteriormente. Posteriormente seis piezas (probetas p/ ensayos 1) se sometieron al tratamiento térmico de endurecimiento para alcanzar una dureza de 60 HRC mientras que una se conservó sin el tratamiento térmico (probetas p/ ensayos 2).

### 5.6.2 Ensayos de validación.

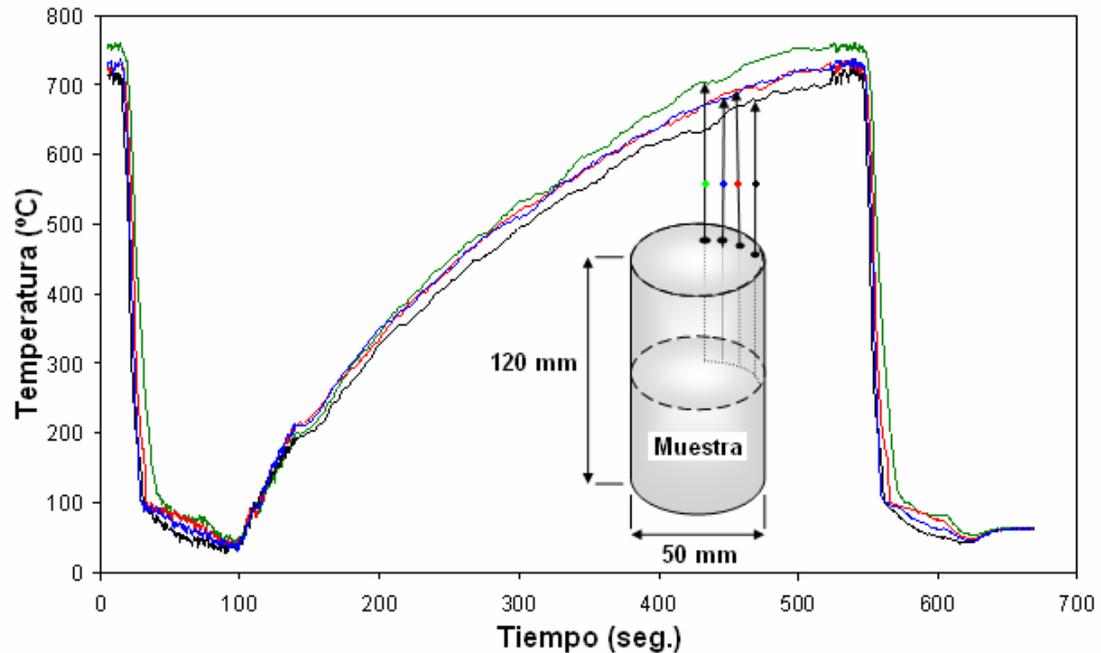
Como ya se mencionó, se utilizó acero D2 para los ensayos experimentales puesto que es un material con tenacidad relativamente baja, lo cual lo hace altamente susceptible al agrietamiento térmico. Este material se seleccionó únicamente para efectos de validación experimental y verificación del funcionamiento del banco de pruebas. Se llevaron cabo un total de siete pruebas las cuales fueron desarrolladas bajo las condiciones experimentales mencionadas en la Tabla 5.9.

**Tabla 5.9** Condiciones experimentales bajo las que se realizaron los ensayos de validación de la máquina de ensayos de fatiga térmica.

No. Prueba	No. Muestra	No. Ciclo	T máx. (°C)	T mín. (°C)	Dureza (HRC)	Subsistema Sujeción
1	1	28	750	35	60	Si
2	2	11	750	35	60	Si
3	3	10	750	35	60	Si
4	4	4	750	35	60	Si
5	5	2	750	35	60	Si
6	6	1	750	35	60	No
7	7	2	750	35	30	No

El calentamiento se realizó en la parte central del espécimen (aproximadamente 50 mm). Con una potencia 5 kw en el subsistema de inducción, se logró un tiempo de calentamiento promedio de 450 segundos para llegar a la temperatura máxima de 750°C. El enfriamiento fue realizado uniformemente en toda la superficie del espécimen a temperaturas mínimas de 35 °C, con un gasto total a través las 4 boquillas de 20 l/min en un tiempo aproximado de 75 segundos. El mecanismo de falla fue evaluado a partir del inicio de la prueba, desde el primer ciclo y progresivamente.

Por medio del método de electroerosión se realizaron cuatro perforaciones en la parte superior de la probeta, en dirección radial y a una profundidad de 50.8 mm ( 2”). Cuatro termopares fueron insertados en las perforaciones, desde la superficie a 1, 6, 11 y 16 mm sucesivamente, con el objetivo de monitorear el gradiente térmico y la distribución de temperaturas durante los ciclos térmicos experimentales. Se obtuvo un registro típico de datos de temperatura contra tiempo mostrado en la Figura 5.38.



**Figura 5.38** Se muestran las curvas de enfriamiento y calentamiento producidas por los ciclos térmicos durante las pruebas. Se realizó un esquema de la muestra para indicar la posición de los termopares y a que medición corresponden.

### Pruebas 1 a 5.

Durante las primeras cinco pruebas se mantuvieron constantes las condiciones experimentales, variando únicamente el número de ciclos térmicos. Las probetas (1-5) utilizadas en estas pruebas fueron amordazadas mediante el sistema de sujeción (restricción volumétrica), además de presentar el tratamiento térmico de endurecimiento (60 HRC).

### Prueba 6.

En la sexta prueba se modificaron las condiciones experimentales y del material ya que la probeta fue sometida a los ensayos sin tratamiento térmico de endurecimiento (28 HRC). Este espécimen se montó en la máquina en ausencia del subsistema de sujeción, es decir sin restricción volumétrica.

**Prueba 7.**

La séptima prueba fue realizada bajo las mismas condiciones que las primeras cinco pruebas pero a diferencia de éstas, la probeta fue montada en la máquina sin el subsistema de sujeción (sin empotramientos en los extremos). La probeta siete presentó una dureza de 60 HRC.

**5.6.3 Procedimiento para análisis de resultados.**

Posterior a los experimentos de validación se procedió a realizar el análisis macro y microestructural de las probetas ensayadas en la máquina.

**5.6.3.1 Análisis macroestructural.**

Se inició con el análisis macroestructural, durante el cual se observó el patrón de grietas generado en la superficie y se llevó a cabo una comparación de estos en probetas bajo las mismas condiciones experimentales, así como con las ensayadas bajo diferentes condiciones.

Se aplicaron líquidos penetrantes y revelador en la superficie de las probetas con el fin de tomar diferentes imágenes seccionadas, unirlos para comparar nuevamente el patrón de agrietamiento generado entre los diferentes especímenes.

Posteriormente al análisis superficial, se seleccionó una probeta y se procedió a cortarla en dirección transversal en el centro, en una zona compleja de grietas. En ambas secciones, se realizaron pruebas de dureza Rockwell escala “C”. Dichas pruebas se ejecutaron en ambas caras, tanto de corte como las que tienen contacto con el subsistema de sujeción, así como de manera longitudinal en la periferia del espécimen.

### 5.6.3.2 Análisis microestructural.

Se realizaron metalografías en las caras de corte de ambas secciones y se atacaron con Nital al 2% durante 5 segundos. Se tomaron una serie de imágenes a través de un analizador metalográfico con microscopía óptica, a 50x, 100x, 200x y 400x para observar la microestructura después de los ensayos.

Se realizaron ensayos de micro dureza Vickers, con cargas de 25, 50, 100 y 300 durante 15 segundos, en una zona intermedia del radio de la sección. Se compararon dichos resultados con los obtenidos en las pruebas de dureza Rockwell escala “C”

Para observar el comportamiento de la grieta en la microestructura se realizaron análisis en un microscopio electrónico de barrido (SEM), mediante las modalidades de electrones retrodispersados para observar la microestructura y electrones secundarios para observar dimensiones de la grieta.

## Referencias

1. Weronki A. and Hejwowski T., "Thermal Fatigue of Metals", Technical University of New York, N.Y., Mercel Dekker, Inc., 1991, pp 108-128.
2. Mercado-Solís R. D., Propuesta de investigación, PROMEP/103.5/04/2590, Dic. 2005.
3. Goodchild J., "The design of a laboratory test machine to simulate surface damage to work rolls for hot strip mills", PhD. Thesis, The University of Sheffield, UK, 2001.
4. Mercado-Solís R. D. and Beynon J. H., "Simulation of thermal fatigue in hot strip mill work rolls" Scandinavian Journal of Metallurgy, 34, 2005, pp 175-191.
5. Roberts G. and Cary R. A., "Tool Steels", Beachwood, OH, American Society for Metals, 1980, pp 21, 24.
6. Avner H. S., "Introducción a la metalurgia física", McGraw-Hill Book Company, N.Y. 2ª ed., 1979, pp 398-402.
7. Glenny E., B. Sc., F.I.M., "Thermal Fatigue", Metallurgical Reviews, Institute of Metals, London, 1961, Vol. 6, No. 24, pp 387-399.
8. Montemayor de la Garza K., "Diseño de una máquina para ensayos de fatiga térmica", Tesis de licenciatura, U.A.N.L., México, 2005, pp 44-47.
9. Rudnev V. I., Cook R. L., Loveless D. L. and Black M. R., "Induction Heat Treatment", Marcel Dekker, Inc., 1997, pp 784-785, 794-797.
10. Induction Heat URL: <http://www.inductothermindia.com/tech.htm>.
11. Ameritherm URL: <http://www.ameritherm.com/aboutinduction.html>.
12. Pogodin-Alexeev G. I., "Procesos Tecnológicos Progresivos en la Construcción de Maquinaria" Editorial Mir Moscu, pp 14-16, 131.
13. Modline 5, Stand Alone Temperatura Sensor, Ircon Inc., Niles, IL USA. Folleto de especificaciones técnicas.
14. MinRIT, Mini Infrared Thermometer, 7300 North Natchez Ave Niles, IL, USA. Folleto de especificaciones técnicas.
15. Incorpora F. P. y Dewitt D. P., "Fundamentos de Transferencia de Calor", 4ª ed., Editorial Pretince Hall.

16. Holman J. P., "Heat Transfer", McGraw-Hill Book Inc., N.Y. 8<sup>va</sup> ed., pp 142-143.
17. Perez Hernandez A., "Simulación del ciclo superficial en un rodillo de trabajo de un Molino continuo de laminación en caliente", Tesis de maestría, 1992, 5.1.
18. Lechler, Precision Spray Nozzles and Accessories, Catalog 202, Lechler Inc.
19. Gastelum F., Motorización y Bombas, Folleto de especificaciones técnicas.

## **CAPÍTULO 6**

# **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **6.1 Introducción.**

En el presente capítulo se muestran los resultados y discusión del diseño, construcción y los experimentos de validación de la Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica (MEFT). Así mismo se discuten los parámetros, variables del sistema, modificaciones y desempeño de sus componentes en las diferentes etapas desarrolladas. Se presentan las fallas generadas en la superficie y parte interna de las probetas que fueron detectadas mediante aplicación de líquidos penetrantes-revelador para análisis macroestructural, así como mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para análisis microestructural. Además se complementan los resultados con análisis de microdureza Vickers y dureza Rockwell.

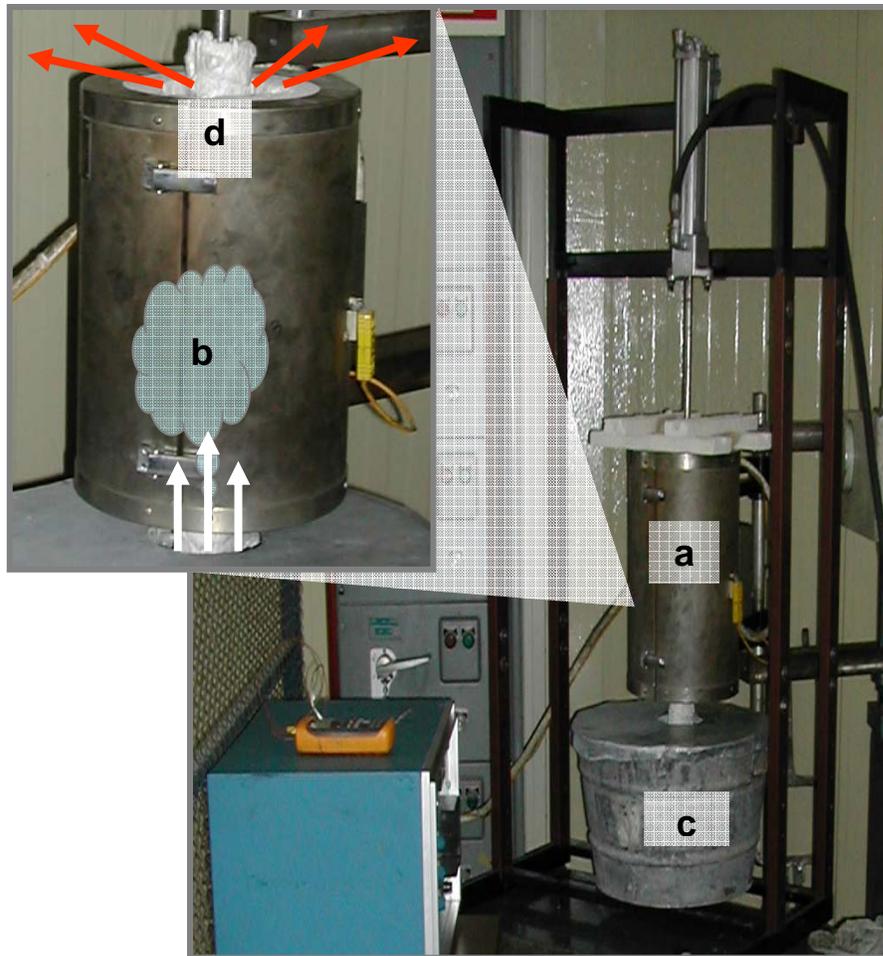
## 6.2 Diseño y construcción ProMEFT.

Los principales resultados y observaciones encontrados durante las pruebas de factibilidad con el prototipo del banco de pruebas se mencionan a continuación.

### 6.2.1 Subsistema de calentamiento.

El horno utilizado en este subsistema no mostró eficiencia satisfactoria al realizar los experimentos. Debido a las limitaciones de potencia del equipo utilizado y al volumen de la probeta de ensayos, el tiempo requerido para incrementar la temperatura de los especímenes fue prolongado, tomando aproximadamente 45 minutos para llegar a la temperatura de 700 °C. Durante el experimento comúnmente se encontraban caídas de temperaturas en el horno, por lo que se requería un tiempo de calentamiento para los ciclos subsecuentes de alrededor de 12-15 minutos. Esto se tradujo en tiempos experimentales prolongados, lo cual se tornó impráctico. La baja velocidad de calentamiento se debió en parte a las zonas de los extremos del horno, las cuales se encuentran abiertas, produciéndose pérdidas importantes de calor, situación que se observa en la Figura 6.1 (d). Además en cada etapa de enfriamiento, al sumergir la probeta a alta temperatura (500 °C) en el depósito de agua, se desprendía vapor de agua, que se introducía por la parte inferior del horno lo cual se traducía en una pérdida de calor dentro del horno (Figura 6.1 (b)). Uno de los objetivos del experimento fue tratar de producir un gradiente térmico a través del cuerpo del espécimen, para cumplir con uno de los principios de la fatiga térmica. Esto no fue logrado ya que se producía un calentamiento estable a través de todo el cuerpo de la probeta debido al largo tiempo que necesitaba ser mantenida dentro del horno para alcanzar la temperatura deseada.

Las observaciones anteriores sugieren que se tendría que considerar el uso de otra forma de calentamiento que involucre mayor rapidez de calentamiento, mayor eficiencia de sostenimiento en altas temperaturas y la capacidad de producir un calentamiento controlado y localizado, con la finalidad de generar un gradiente térmico a través del cuerpo de la probeta de ensayos.



**Figura 6.1** Prototipo de Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica (ProMEFT). Se muestra el (a) horno de resistencia y se aprecia de manera esquemática: (b) una nube de vapor de agua proveniente del (c) depósito que se introduce en dicho horno. Las flechas indican la (d) pérdida de calor que se generaron por la parte superior del horno.

### 6.2.2 Subsistema de enfriamiento.

Se observó aumento en la temperatura del agua a través de la acumulación de calor en el número de ciclos térmicos. Se inició con una temperatura de 25 °C en el agua, sin embargo alrededor de los 30 ciclos se registró una temperatura de 70 °C. Esto repercutió en etapas de enfriamiento posteriores, ya que se requería de mayor tiempo de inmersión para llegar a la misma temperatura final de enfriamiento. Por el contrario, si se realizaba

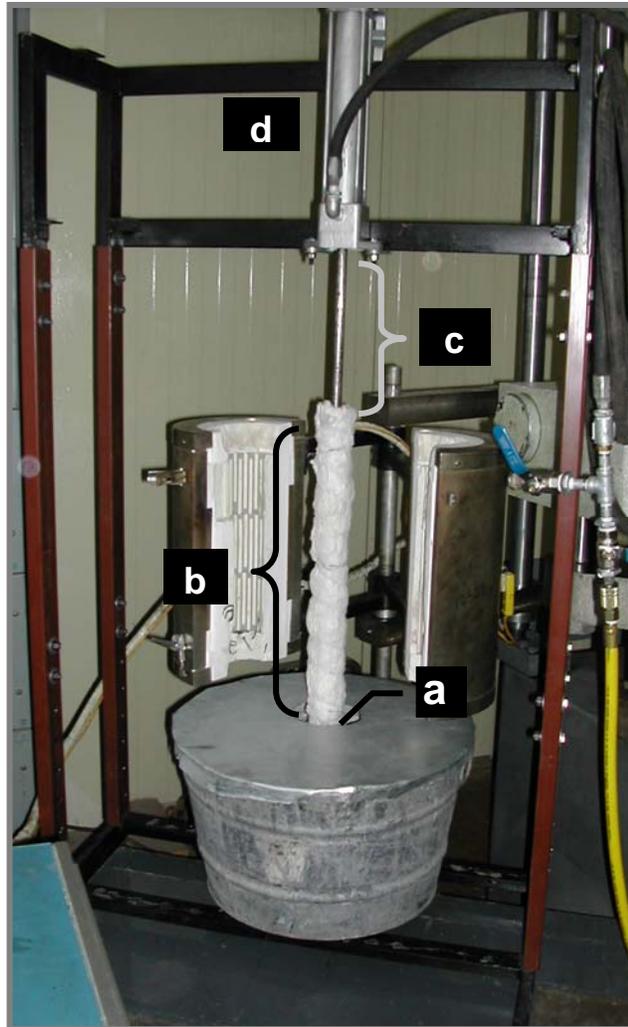
el enfriamiento en los mismos tiempos la temperatura final de la muestra sería distinta debido a la temperatura elevada del agua.

Otra desventaja que fue encontrada cuando la probeta fue sumergida en el depósito de agua (Figura 6.2 (a)), es que se generaba una capa de vapor alrededor de ésta, afectando el tiempo de enfriamiento. Por tanto no se tenía un control preciso de la temperatura final de enfriamiento. Dichas complicaciones se debieron a la falta de recirculación del agua dentro del depósito, ya que el agua acumulaba calor gradualmente durante el experimento.

Esta condición de enfriamiento no mostró ser eficiente para realizar la disminución rápida y controlada de temperaturas en la probeta. Sería importante considerar agua en constante recirculación, a temperatura constante y un método que facilite el enfriamiento uniforme de toda la superficie del espécimen.

### 6.2.3 Subsistema de desplazamiento.

El actuador neumático (Figura 6.2 (d)), utilizado para el movimiento vertical de la probeta, presentó daños severos tanto en la rosca del vástago como en sus empaques internos. Esto fue debido al calentamiento excesivo de la extensión, la cual descendía continuamente posicionándose dentro del horno durante las etapas de enfriamiento de la probeta. La extensión transfería el calor al vástago del actuador, el cual no lo disipaba con rapidez, provocando los daños antes mencionados. La carencia de un control y regulador de presiones de aire y la falta de precisión en cuanto a tiempos se refiere, generaron de manera periódica movimientos violentos y rápidos. Se considera como parte de los requerimientos de la selección del actuador neumático el uso de reguladores de velocidad así como amortiguadores internos. Además de contemplar, un actuador más ligero, con mayor capacidad de disipación de calor y que posea componentes internos (sellos, empaques, etc.) preparados para soportar altas temperaturas.



**Figura 6.2** Etapa de enfriamiento de ProMEFT, (a) muestra sumergida en el depósito de agua, (b) extensión recubierta de colcha cerámica aislante, (c) vástago de pistón, d) actuador de acción doble.

#### 6.2.4 Extensión del vástago del actuador.

La barra cilíndrica de acero H13, que se utilizó como extensión del vástago del pistón, sufrió daños en sus roscas a pesar del aislante térmico instalado. (Figura 6.2 (b)). Esto se debió a que se encontraba en constante calentamiento al bajar y ubicarse dentro del horno durante la etapa de enfriamiento de la probeta.

### 6.2.5 Resultados de las pruebas de factibilidad.

Después de 500 ciclos térmicos realizados en la probeta, sometida bajo las condiciones antes mencionadas, se realizó un decapado sobre la superficie para eliminar la capa de óxido generada por los calentamientos. Se aplicaron líquidos penetrantes para realizar un análisis macroscópico sobre la superficie del espécimen. Al no observarse agrietamiento se procedió a analizarla mediante microscopía óptica, sin encontrar indicio alguno de agrietamiento por fatiga o choque térmico en la superficie.

Posteriormente se realizaron ensayos de dureza en la superficie y de manera radial en una de las caras de la probeta, encontrando una reducción global en la dureza a 27 HRC, como se presenta en la Figura 6.3.



**Figura 6.3** En esta imagen se muestra la probeta de acero D2 después de 500 ciclos térmicos. Se indican las zonas de las lecturas de dureza. Se encontró que la dureza había disminuido de 60 HRC en la condición inicial a un valor final de 27 HRC.

La ausencia del fenómeno de fatiga/choque térmico se debió a factores tales como la forma de calentamiento, la cual carecía de control en la profundidad de calentamiento y que por lo tanto generaba un estado estable en la probeta con ausencia de gradientes térmicos. Otro factor fue la falta de un marco mecánico externo que restringiera los cambios volumétricos del espécimen durante las etapas de calentamiento y enfriamiento.

Debido a esto la probeta no experimentó esfuerzos de tensión-compresión, necesarios para originar deformaciones que posteriormente pudieran provocar agrietamiento térmico. Aunado a esto, el enfriamiento no fue rápido y efectivo debido a que el agua no estaba en recirculación, esta aumentaba de temperatura y se generaba una capa de vapor alrededor del espécimen lo que impedía que se removiera el calor de manera rápida.

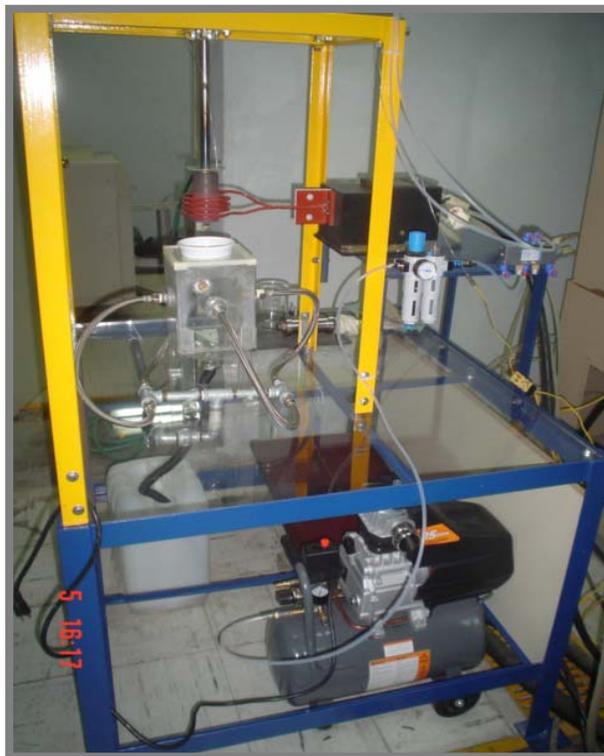
#### 6.2.6 Problemas de operación encontrados en el ProMEFT.

1. Problemas de accesibilidad al momento de llenar el depósito de agua utilizado para enfriamiento. La desventaja en el cambio de agua fue el tener que remover continuamente la cubierta superior y en algunos casos el depósito completo.
2. Debido a que el horno se encontraba en cantiliber, sostenido de manera externa, era problemático el posicionamiento constante de éste con respecto a la probeta. En cada experimento se tenía que centrar dicho horno para obtener un buen calentamiento y evitar golpes en las paredes internas del horno al realizar el movimiento vertical del espécimen.
3. En el procesador del horno no se contó con un control preciso de temperaturas de calentamiento durante la prueba, ya que se tenía un punto de ajuste de 1350 °C mientras que sólo se llegaba a temperaturas de 700 °C en el horno y a 500 °C en la probeta.
4. Durante el movimiento vertical del vástago del actuador se detectaron constantes y acentuados golpeteos en la parte final de la carrera, tanto en el ascenso como en el descenso, provocando vibraciones en la máquina.

### 6.3 Diseño y construcción de la MEFT.

Posterior a la ejecución de las pruebas de factibilidad correspondientes a la primera etapa de desarrollo, se procedió a llevar a cabo la siguiente etapa, en donde se realizó la construcción de la Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica (MEFT) de acuerdo a las condiciones y consideraciones ya citadas en el capítulo 5. En esta etapa no se contemplaron experimentos sobre probetas de ensayo, sólo se presentó la evaluación del diseño, construcción y desempeño de los diferentes subsistemas.

Las evaluaciones de los resultados y observaciones hallados durante las pruebas preliminares con el banco de pruebas, se presentan en esta sección. La Figura 6.4 muestra una imagen de la MEFT.



**Figura 6.4** Imagen de la Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica (MEFT) en operación.

### 6.3.1 Subsistema estructural.

El subsistema estructural (Figura 6.4) diseñado y construido para el sostenimiento de los diferentes elementos que conforman a la máquina, ofreció un excelente soporte, ergonomía y distribución. Los espacios previamente diseñados fueron los más adecuados y no se encontraron problemas de distribución y de acceso con los diferentes subsistemas. Así mismo ofrece el soporte necesario para el peso y movimiento de los componentes que aloja.

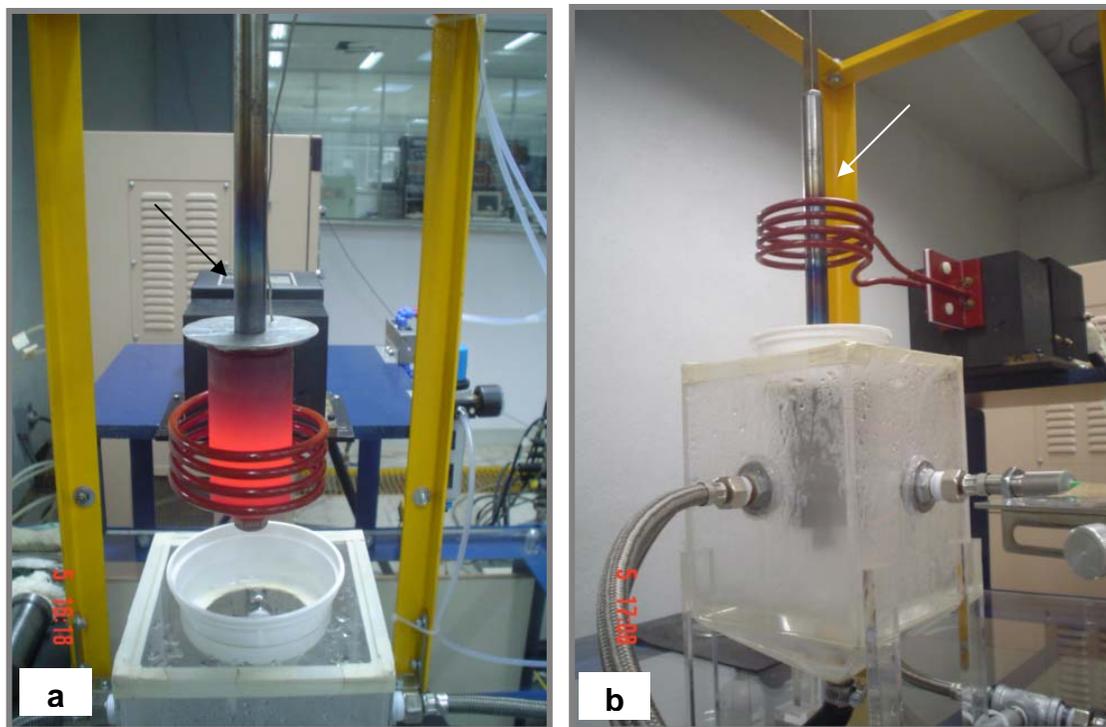
### 6.3.2 Subsistema de calentamiento.

El método de calentamiento a través de inducción electromagnética arrojó buenos resultados. Se realizaron calentamientos rápidos, alcanzando temperaturas de prueba de 750 °C en un tiempo aproximado 450 segundos. El calentamiento fue localizado solo en la sección central de la probeta (Figura. 6.5 (a)), generando gradientes térmicos radiales y longitudinales en el cuerpo de la misma (entre 100-200 °C), cubriendo el objetivo previamente establecido.

Se contempla el uso de un sistema de inducción con mayor potencia con el fin de reducir el tiempo de calentamiento, además de poder variar la frecuencia utilizada para controlar la profundidad de calentamiento (efecto piel).

### 6.3.3 Subsistema de enfriamiento.

El enfriamiento es uniforme y efectivo por convección forzada, con una rapidez calculada aproximadamente de 8 segundos, reduciendo las temperaturas de 600 hasta 40°C en la superficie. Este tiempo se logró a través de un gasto de 5 l/min por boquilla, calculado de acuerdo a los flujos requeridos por la aplicación. Se utiliza agua corriente como medio de enfriamiento impulsada mediante una bomba a través de cuatro boquillas posicionadas en la cámara de enfriamiento (Figura 6.5 (b)).



**Figura 6.5** Imágenes de la MEFT en operación. (a) Izquierda: detalle de la etapa de calentamiento por inducción electromagnética. Se observa el calentamiento de la extensión en el extremo en contacto con la muestra, indicado por la flecha. (b) Derecha: detalle de la etapa de enfriamiento mediante agua por aspersión. Se indica con una flecha el calentamiento generado en la extensión al entrar en la zona de la bobina.

Se obtuvieron mejores resultados en cuanto al método manejado para realizar el enfriamiento de la muestra ya que el agua utilizada se mantenía siempre a una temperatura de abastecimiento constante de 25 °C.

Los problemas encontrados fueron fugas localizadas en partes de la cámara de enfriamiento, tales como: empotramientos de las boquillas, debido a la presión utilizada y a la falta de empaques; así mismo en la tapa superior después de que el agua impactaba a la probeta, se fugaba por las uniones y principalmente por el orificio utilizado para introducir el espécimen a la cámara.

Se encontraron daños por corrosión en el acero galvanizado del sistema, tales como conexiones tipo “T”, codos y coples utilizados para los empotramientos de las boquillas (Figura 6.6 (b)). Las partículas metálicas desprendidas por corrosión afectaron directamente el desempeño de las boquillas produciendo cambios en el patrón de aspersión así como obstrucciones en la salida de agua.

Se contempló el rediseño de la cámara de enfriamiento para resolver las fugas producidas, así como buscar materiales sustitutos para la renovación de los componentes vulnerables a la corrosión. Una explicación completa de las modificaciones realizadas en este rubro se describe en la sección 6.4.1 de este capítulo.

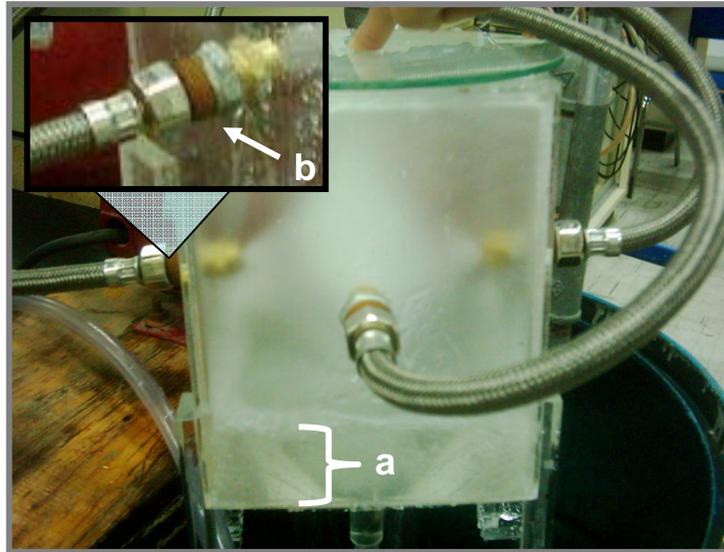
#### 6.3.4 Subsistema de desplazamiento.

El equipo neumático cumplió con los requerimientos solicitados anteriormente. No se presentaron resultados negativos en este sistema ya que fueron corregidos mediante la acertada selección del equipo. El movimiento del vástago del pistón fue rápido y controlado, ya que el nuevo componente posee amortiguamiento interno y un dispositivo de control de velocidades útil para regular la rapidez del desplazamiento del vástago durante su carrera.

#### 6.3.5 Extensión del vástago del pistón.

Se utilizó el mismo tipo de barra de acero H13 que en el ProMEFT. Con el uso del nuevo método de calentamiento, la barra no sufrió calentamiento en toda su longitud, como sucedía en las pruebas de factibilidad. A pesar de que la extensión permanece dentro de la bobina durante la etapa de enfriamiento, sólo se calentó una sección y en menor grado (Figura 6.5 (b)). En esta sección se registraron temperaturas alrededor de 250°C. Además se detectaron temperaturas altas en el extremo de la extensión que conecta con la probeta.

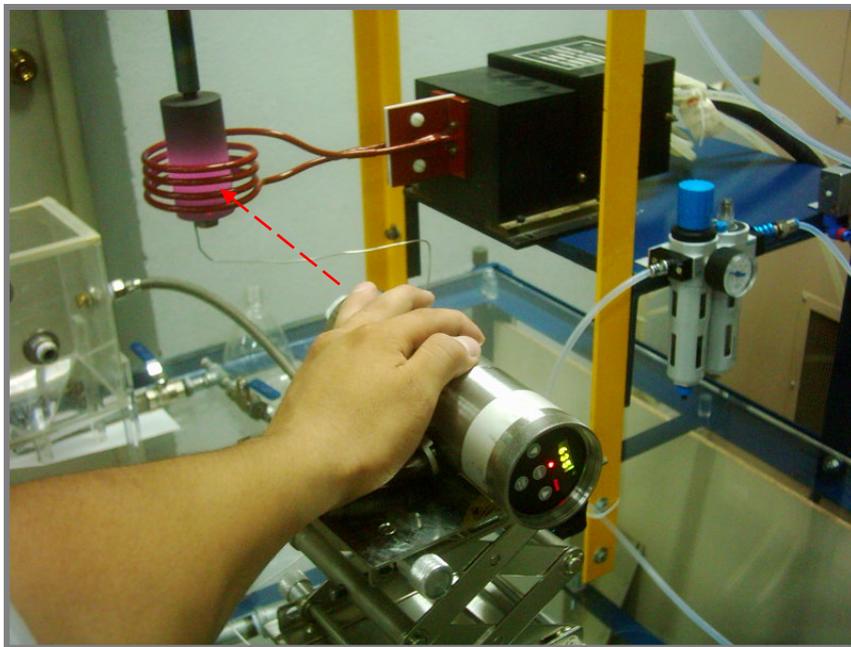
Se considera necesario llevar a cabo un rediseño de la extensión, para adecuar su forma de tal manera que se logre disipar fácilmente el calor que es transferido tanto por el extremo conectado a la probeta, como el calor generado en la sección expuesta a la bobina. Una explicación completa de las modificaciones realizadas a este respecto se describe en la sección 6.4.1 de este capítulo.



**Figura 6.6** Se muestra el choque de aspersión cónica de impacto elíptico generado por las boquillas en el centro de la cámara de enfriamiento. (a) En la parte inferior de esta misma se aprecia el estancamiento de agua generado. (b) Además se observa un aumento que muestra la corrosión en las conexiones galvanizadas que se acoplan con las boquillas.

### 6.3.6 Subsistema de medición de temperaturas.

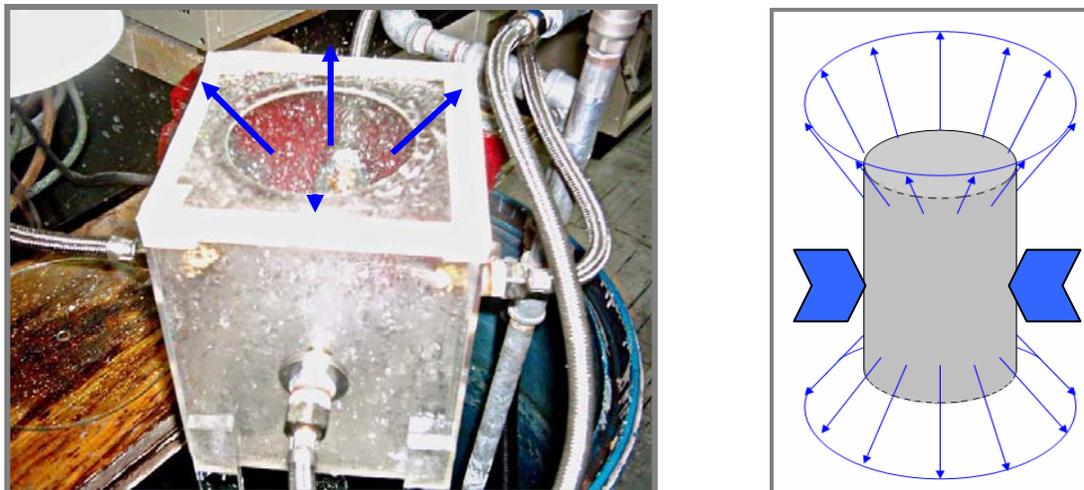
Se obtuvo un control más preciso del monitoreo de las temperaturas mediante el uso de pirometría óptica infrarroja (Figura 6.7). Así mismo, debido a que los pirómetros sólo proporcionan la medición de la superficie, se complementó con el uso de termopares insertados en barrenos hechos en el cuerpo de la probeta con el fin de conocer el gradiente de temperaturas desde la superficie hacia el centro de la misma.



**Figura 6.7** En esta imagen se muestra la MEFT en su etapa de calentamiento. Se aprecia como mediante pirometría óptica infrarroja y el uso de termopares se lleva a cabo el monitoreo de las temperaturas tanto en la superficie como en la parte interna de la muestra de ensayo.

### 6.3.7 Problemas de operación encontrados.

1. Dificultad para controlar la profundidad de calentamiento en el sistema de inducción.
2. Fugas en la cámara de enfriamiento. Tanto en el marco como en el orificio central de la tapa superior así como en las perforaciones en las cuales se empotraron las boquillas (Figura 6.8).
3. Debido a que no se contaba con un drenaje cercano para descargar el agua utilizada para el enfriamiento de la probeta, se recurrió a un depósito de 20 l. para extraer dicho líquido, sin embargo, se tenía que retirar el bote continuamente para vaciarlo y evitar derrames.



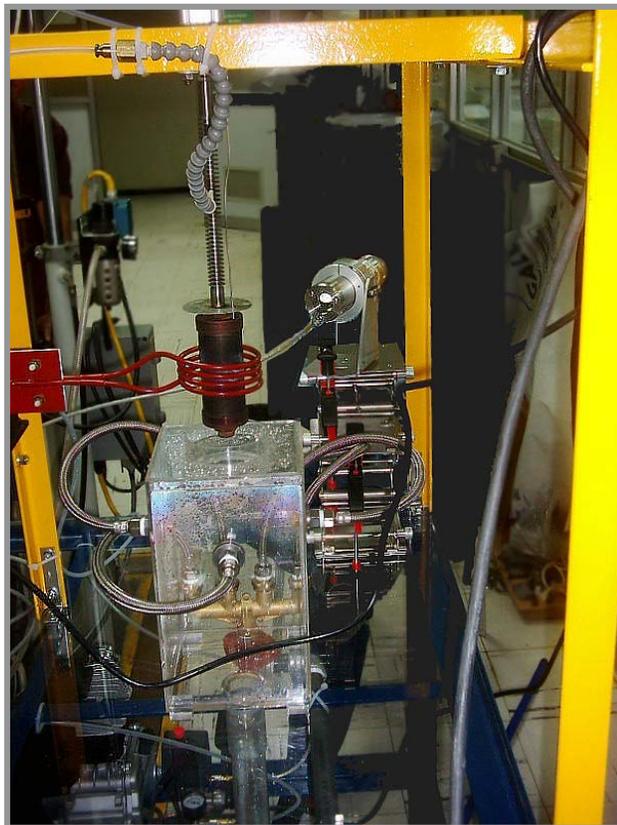
**Figura 6.8** Izquierda: Se observa en la parte superior de la cámara, el orificio creado para el acceso de la muestra. En dicho lugar es notorio el salpique generado después de impactarse el agua con la probeta a través de las cuatro boquillas. Derecha: en este esquema se muestra como el agua, representada por flechas, se proyecta en dirección superior e inferior después de chocar con la probeta.

4. Después de un tiempo determinado (75 seg) de aspersion continua de agua sobre la probeta, se generaron estancamientos dentro de la cámara, debido a la dimensión del conducto de evacuación, el cual era insuficiente en diámetro para drenar la cantidad arrojada por las boquillas (Figura 6.6 (a)). Se propone modificar la tubería de desagüe para aumentar la velocidad de salida y evitar retención de agua. Una explicación completa de las modificaciones realizadas en este rubro se describe en la sección 6.4.1 de este capítulo.
5. Se presentó dificultad para monitorear la temperatura en la etapa de enfriamiento (Figura 6.5 (b)). El pirómetro óptico utilizado para intervalos bajos de temperatura, captó la temperatura de la pared de la cámara de enfriamiento por lo que no se logró medir con exactitud la temperatura de la probeta debido a que ésta se encontraba dentro de la cámara. Del mismo modo se dificultó la medición a través del baño de agua producido por la aspersion de las boquillas.

6. Durante los movimientos verticales de la probeta se detectaron problemas de contacto por parte de las mordazas del subsistema de sujeción con la sección interna de la bobina del sistema de inducción. Se contempló modificar el diámetro de las mordazas. Una explicación completa de las modificaciones realizadas en este rubro se describe en la sección 6.4.1 de este capítulo.

#### 6.4 Rediseño y modificaciones de la MEFT.

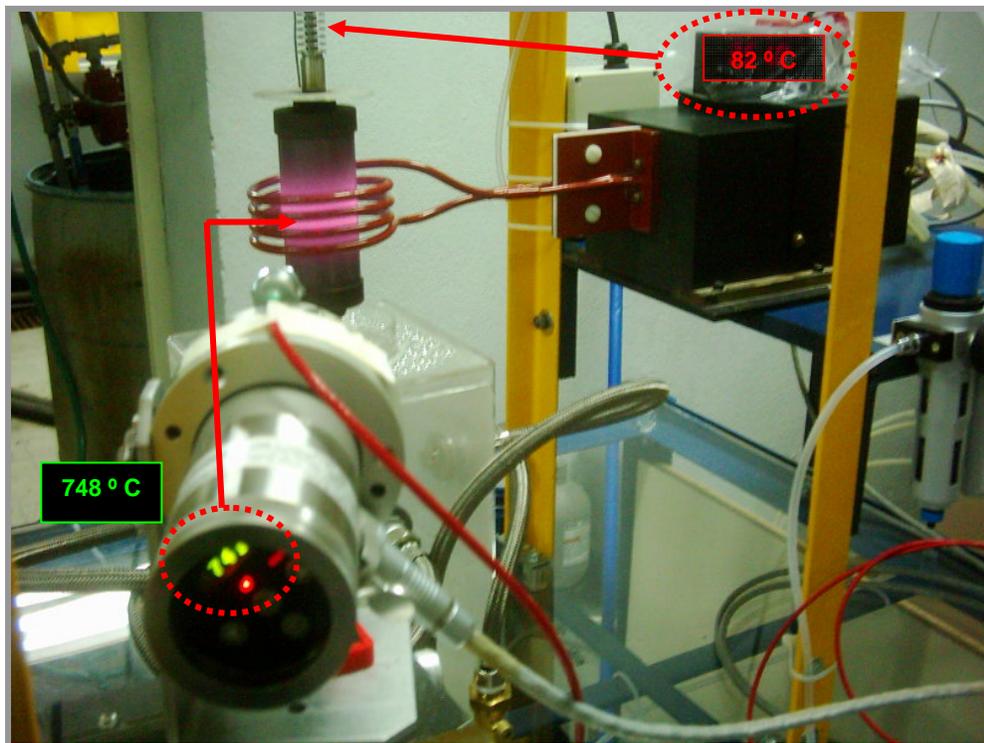
Se realizaron las modificaciones y ajustes necesarios del banco de pruebas según los resultados desarrollados en los experimentos de la segunda etapa, tanto en la operación como en los subsistemas que componen la MEFT. La Figura 6.9 muestra una imagen de la máquina de ensayos de fatiga térmica en su tercera etapa.



**Figura 6.9** Máquina de ensayos de fatiga térmica en operación, tercera etapa.

#### 6.4.1 Resultados del funcionamiento del la MEFT.

Los problemas de calentamiento generados en la extensión fueron solucionados con la ayuda del nuevo diseño y maquinado de la barra así como la instalación de la boquilla con flujo de aire incidiendo sobre ésta para su enfriamiento; se disipó en mayor grado el calor, reduciéndose a temperaturas de 250 a 80 °C. En la Figura 6.10 se muestra una imagen de las pruebas de calentamiento en las cuales gracias a las aletas maquinadas sobre la extensión es posible la disipación de calor debida a la transferencia que existe por parte de la probeta. Se observa que mientras la muestra está a casi 750 °C la extensión apenas alcanza 82 °C, disminuyéndose así los problemas en el vástago del actuador debido al calentamiento excesivo.

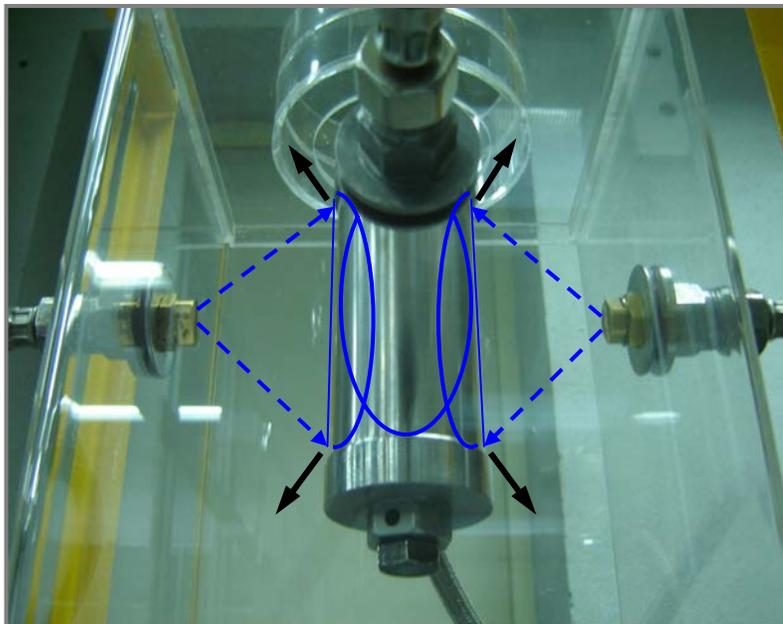


**Figura 6.10** Imagen del monitoreo de temperaturas durante las pruebas de transferencia de calor de la probeta a la extensión a través del equipo de pirometría óptica infrarroja.

Con el rediseño de la cámara de enfriamiento se solucionaron las fugas antes mencionadas. El salpique del agua fue eliminado en el orificio central de la tapa superior, así como las fugas en los empotramientos de las boquillas con la ayuda de conexiones diseñadas y maquinadas de acero inoxidable con sus respectivos empaques. Además se eliminaron los estancamientos e inundaciones con la amplitud en el desagüe en dicha cámara, aumentando de esta manera también la velocidad de salida de agua, lo cual se evidenció mediante la figura 6.11 y la Figura 6.12.



**Figura 6.11** Imagen de la etapa de enfriamiento. Se aprecia la probeta de ensayos envuelta en un baño de agua dentro de la cámara de enfriamiento rediseñada, en la cual no se observaron fugas. Se aprecia como se retorna el agua en la parte superior (flechas) después de chocar con una sección rediseñada de la tapa.



**Figura 6.12** Se muestra un esquema del flujo de agua después del choque sobre la muestra (flechas oscuras), este es retenido y regresado por una dona diseñada en la tapa superior, alrededor del orificio de entrada de la cámara.

Se continuó presentando dificultad para monitorear la temperatura en la etapa de enfriamiento. A pesar del rediseño de la cámara se siguió captando la temperatura de la pared de la cámara de enfriamiento. Del mismo modo se dificultó la medición a través de la aspersion de agua producida por las boquillas. Se considera realizar posteriormente una perforación en una de las paredes de la cámara de enfriamiento para insertar un tubo hueco por el cual se pueda introducir el lector óptico del pirómetro. Además de contemplar una posición de la probeta fuera de la cámara de enfriamiento para realizar la medición de la temperatura antes de entrar a la etapa de calentamiento.

Con la instalación de un drenaje propio para la MEFT se superaron las complicaciones del agua desechada por la cámara de enfriamiento.

Con la modificación en las dimensiones de las mordazas se evitaron los problemas de contacto durante los movimientos verticales de la muestra con las espiras de la bobina.

## 6.5 Resultado de experimentos de validación.

### 6.5.1 Análisis macroestructural.

En la Tabla 6.1 se muestran un resumen de las condiciones bajo las que se realizaron la serie de pruebas para la validación del banco experimental.

**Tabla 6.1** Resumen de las condiciones experimentales de las pruebas de fatiga/choque térmico.

No. Prueba	No. Probeta	No. de Ciclos	T <sub>máx</sub> (°C)	T <sub>mín</sub> (°C)	Dureza (HRC)	Empotramiento
1	1	28	750	35	60	Si
2	2	11	750	35	60	Si
3	3	10	750	35	60	Si
4	4	4	750	35	60	Si
5	5	2	750	35	60	Si
6	6	1	750	35	60	No
7	7	2	750	35	30	No

#### 6.5.1.1 Prueba 1.

Durante la primera prueba se llevó a cabo un total de 28 ciclos en dos etapas. Después de 15 ciclos correspondientes a la primer parte de esta prueba se retiró la probeta del banco de pruebas y se observó el patrón de agrietamiento generado, el cual se preservó hasta al final del experimento sin cambio significativo. La Figura 6.13 muestra la condición superficial de la probeta 1 después de 28 ciclos térmicos en la MEFT.



**Figura 6.13** Izquierda: se muestra la superficie extendida de la probeta 1, después de 28 ciclos, donde se aprecia el patrón de agrietamiento a nivel macroscópico típica en la superficie producida por choque térmico. Derecha: misma superficie con líquidos penetrantes y revelador.

#### 6.5.1.2 Pruebas 2 a 5.

El patrón de agrietamiento observado en las pruebas 2 a 5 fue semejante al de la prueba 1 (Figura 6.14). Estas pruebas se realizaron bajo condiciones experimentales similares (Tablas 6.1), variando solamente el número total de ciclos térmicos.

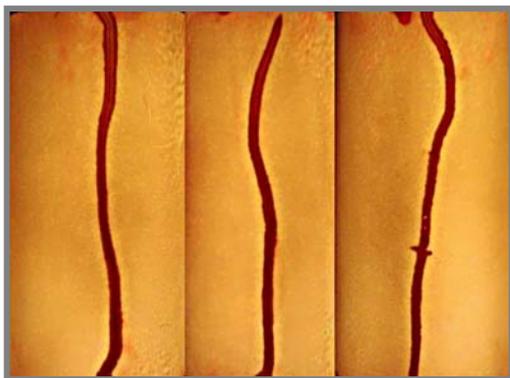


**Figura 6.14** En la imagen izquierda se muestra la superficie extendida de la probeta 2, con un patrón de agrietamiento similar al de la probeta 1. Derecha: misma superficie con líquidos penetrantes y revelador. Nota: Se aplicó un efecto de bordes a la imagen para remarcar el patrón de agrietamiento.

En las pruebas 1 a 5 se observó después del primero o segundo ciclo, el desarrollo de grietas térmicas prolongadas en dirección longitudinal de la probeta. Algunas grietas se originaron en los extremos del espécimen, cerca de los empotramientos del sistema de sujeción. Otras grietas nuclearon en el centro de la probeta en donde se desarrollaron puntos calientes durante la etapa de calentamiento. Los ciclos adicionales no provocaron crecimiento apreciable de estas grietas. Además se observaron grietas desarrolladas a lo largo de la dirección circunferencial cerca del centro de la probeta. Dichas grietas se propagaron circunferencialmente para después tornarse de manera vertical hacia los extremos de la probeta. En algunos casos se observó coalescencia entre las grietas circunferenciales y las longitudinales.

#### 6.5.1.3 Prueba 6.

El experimento se realizó bajo las mismas condiciones que las pruebas 1 a 5 pero la probeta no fue amordazada con el subsistema de sujeción. En esta probeta, tal como se indica en la Figura 6.15, se observó una diferencia en el patrón de agrietamiento ya que las grietas van de un extremo a otro en forma longitudinal y no se observaron grietas circunferenciales. Esto proporciona una indicación del desempeño del sistema de sujeción ya que éste provee un efectivo marco de restricción al desarrollar deformaciones y esfuerzos mecánicos como resultado de la expansión y contracción de la muestra durante los ciclos térmicos.



**Figura 6.15** Se muestra el patrón de agrietamiento producido por choque térmico sobre la superficie de la probeta 6 después de un ciclo. Superficie con líquidos penetrantes y revelador.

#### 6.5.1.4 Prueba 7.

La última prueba fue realizada bajo diferentes condiciones de experimentación. La probeta 7 fue ensayada sin el sistema de sujeción, es decir sin restricción en el cambio volumétrico, además de carecer de la condición del tratamiento térmico de endurecimiento que se les proporcionó a las probetas 1 a 6. El espécimen presentaba una dureza de 30 HRC. En este caso no se observaron grietas ni indicios de ellas a nivel macroestructural durante todos los ciclos térmicos realizados (Figura 6.16). Esto indica que el comportamiento de fatiga /choque térmico es sensible a la dureza del espécimen bajo estas condiciones experimentales.



**Figura 6.16** Se observa la superficie de la muestra 7 después de dos ciclos.

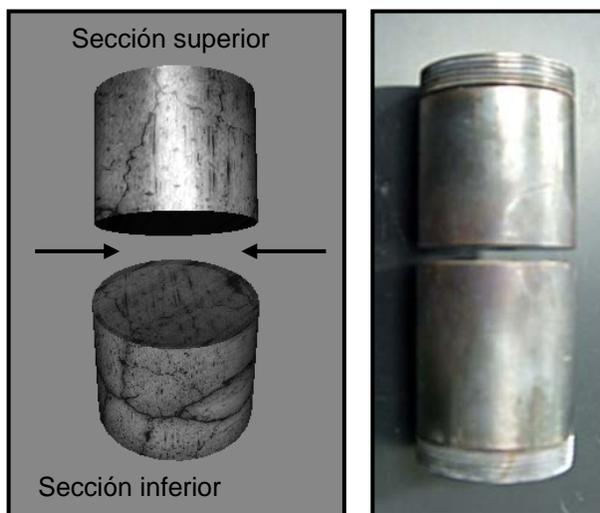
#### 6.5.1.5 Análisis macroestructural en muestra 5.

De las primeras etapas de experimentos (pruebas 1 a 5), se tomó una probeta que fue ensayada bajo las siguientes condiciones, indicadas en la Tabla 6.1:

- Temperatura máxima = 750 °C
- Temperatura mínima = 35 °C
- No. de ciclos térmicos = 2

- Tratamiento térmico de endurecimiento = 60 HRC
- Con restricción volumétrica (amordazada).

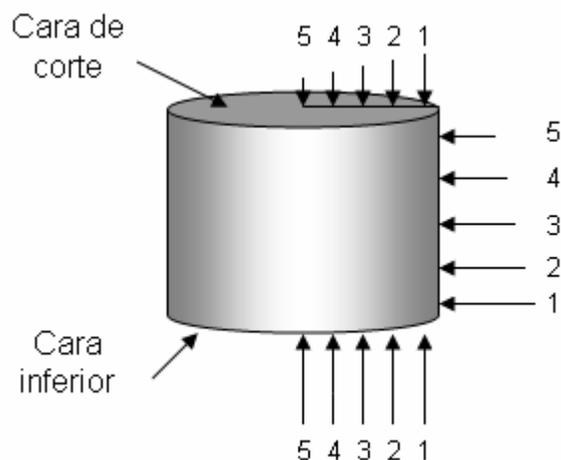
Primeramente se observó la superficie con la finalidad de identificar el área que pudiera proporcionar más información del complejo de grietas originado, recordando que en esta pieza existen grietas en dirección longitudinal, circunferencial e intersecciones entre éstas. Se realizó un corte en dirección transversal aproximadamente en el centro de la probeta (Figura 6.17). Posteriormente se continuó con los análisis macroestructurales.



**Figura 6.17** Se muestra el corte transversal de la muestra.

### **Pruebas de dureza.**

Se realizaron los ensayos de dureza Rockwell escala “C”, con una carga de 150 kg. Se efectuaron dichos ensayos en distintas áreas: de manera radial, de la superficie al centro de la muestra, tanto en la cara de corte como en la que se encuentra en contacto con las mordazas del subsistema de sujeción. Así mismo sobre la periferia de manera longitudinal, en dirección a la cara de corte, para las dos piezas. En la Tabla 6.2 se muestran los datos obtenidos para la sección inferior, mientras en la Figura 6.18 se indican los puntos de medición que fueron realizados, en los cuales se indican los valores de dureza obtenida con las flechas.

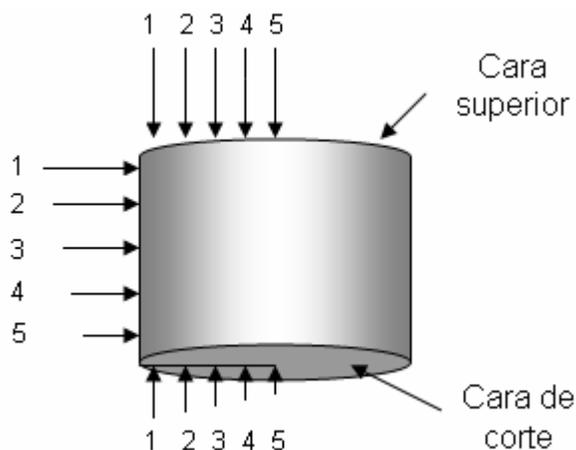


**Figura 6.18** Sección inferior de probeta ensayada. Se indica de acuerdo al tamaño de la flecha como aumenta o disminuye la dureza en base a la dirección y área en que se tomaron.

**Tabla 6.2** Durezas obtenidas sobre la sección inferior de la probeta ensayada.

No. de medición	Cara de corte		Cara inferior		Altura	
	Distancia (mm)	Dureza (HRC)	Distancia (mm)	Dureza (HRC)	Distancia (mm)	Dureza (HRC)
1	1	40	1	61.0	15	57.5
2	5	37	5	59.0	25	53.5
3	10	36	10	59.0	35	47.5
4	15	36	15	56.5	45	43.5
5	18	35	18	56.5	50	39.0

Para la sección superior se efectuaron los ensayos de igual manera, tanto en la cara de corte como en la que se encuentra en contacto con el subsistema de sujeción. La medición en la periferia se realizó también en forma longitudinal en dirección a la cara de corte. En la Tabla 6.3 se muestran los datos obtenidos para la sección superior. La Figura 6.19 indica los puntos de medición que fueron realizados y así mismo de acuerdo a la longitud de la flecha fue el valor de la dureza. Los resultados de la sección superior son similares a los obtenidos en la sección inferior.

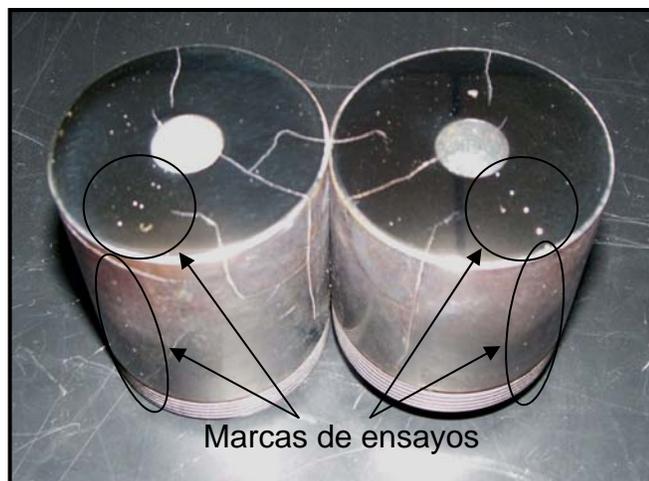


**Figura 6.19** Sección superior de probeta ensayada. Se indica de acuerdo al tamaño de la flecha como aumenta o disminuye la dureza en base a la dirección y área de lectura.

**Tabla 6.3** Durezas obtenidas sobre la sección superior de la probeta ensayada.

No. de medición	Cara de corte		Cara superior		Altura	
	Distancia (mm)	Dureza (HRC)	Distancia (mm)	Dureza (HRC)	Distancia (mm)	Dureza (HRC)
1	1	41	1	58.0	15	58.0
2	5	37	5	57.0	25	55.0
3	10	37	10	56.5	35	48.0
4	15	36	15	56.5	45	45.0
5	18	36	18	56.0	48	40.5

En los resultados obtenidos se encuentra una disminución de la dureza tanto en la sección central de la probeta como en dirección radial. Esto es debido a que el calentamiento fue concentrado en la sección del centro de la probeta, aunado a que el enfriamiento sólo fue llevado en la superficie, dejando la parte interna a mayor temperatura. En la Figura 6.20 se muestran las dos secciones del espécimen con la huellas de dureza en la cara de corte y en la superficie. Se aprecia así mismo la trayectoria de las grietas a través de la probeta.



**Figura 6.20** Imagen de sección superior e inferior, donde se perciben las marcas de los ensayos de dureza en las caras de corte y en la superficie de la periferia.

### 6.5.2 Análisis microestructural.

La probeta ensayada fue evaluada posteriormente mediante pruebas de microdureza, microscopía óptica y finalmente con microscopía electrónica de barrido (SEM).

#### **Caracterización metalográfica.**

Se realizó un análisis metalográfico en ambas caras de esta sección con el fin de obtener micrografías y observar la microestructura de la probeta después de los ensayos. Se llevó a cabo el desbaste de la cara seleccionada de la probeta con lijas a partir del número 320 hasta 2400 y se pulió con lubricante, paño y alumina de 1  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, el ataque químico se realizó con Nital al 2% durante un tiempo de 5 segundos.

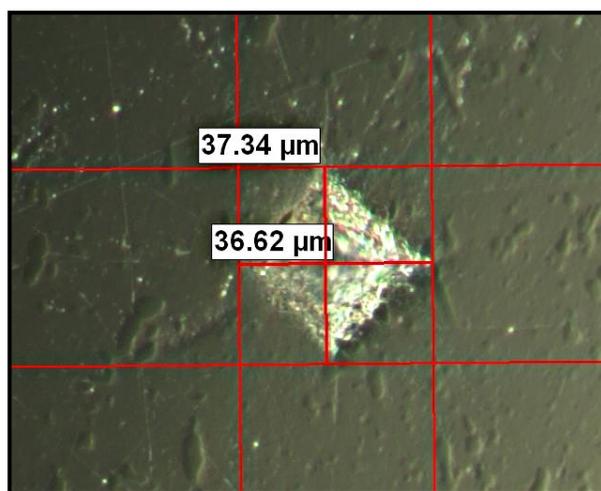
#### **Pruebas de microdureza.**

Se realizaron ensayos de microdureza Vickers, en la cara de corte, con cargas de 25, 50, 100 y 300 g durante un tiempo de 15 segundos (Tabla 6.4). Los ensayos se realizaron en una zona intermedia del radio de la probeta (Figura 6.21). Al convertir los resultados

a dureza Rockwell escala “C” se observa que los valores para esta zona son similares a los obtenidos en las Tablas 6.2 y 6.3 (43 - 48 HRC).

**Tabla 6.4** Microdurezas Vickers obtenidas en cara de corte de acero D2 ensayado.

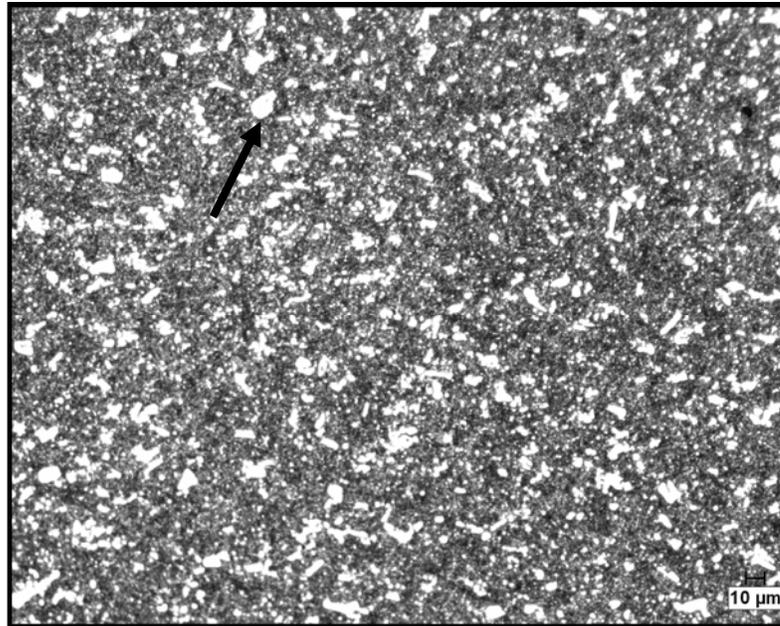
No. de ensayo	1	2	3	4
Carga (g)	25	50	100	300
Tiempo (seg)	15	15	15	15
Promedio de diagonales	10	14	20	37
Dureza	463.6	472.9	463.6	429.3



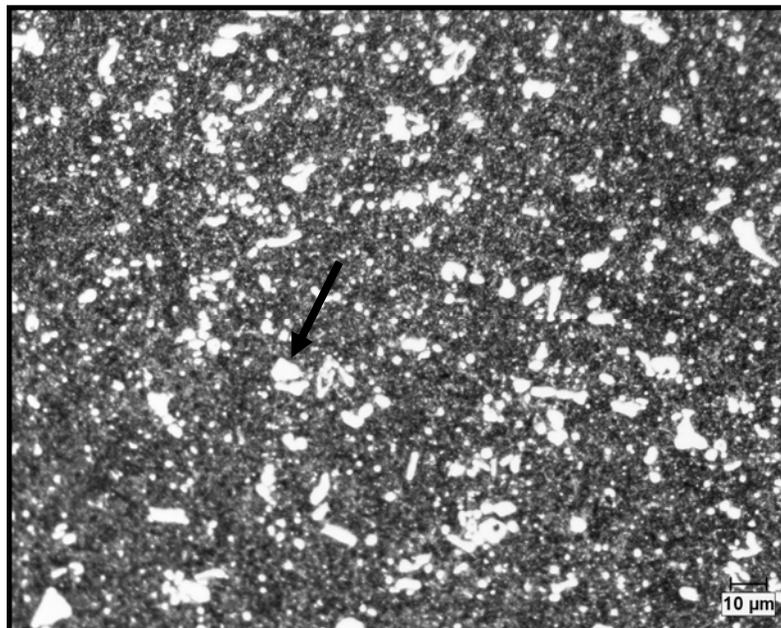
**Figura 6.21** Huella de un ensayo de micro dureza Vickers.

#### **Análisis con microscopía óptica.**

Se tomaron una serie de imágenes a 50x, 100x, 200x y 400x. Las imágenes presentadas son a 200x y 400x (Figura 6.22). En estas imágenes se observan carburos de cromo como partículas blancas de forma masiva.



(a)

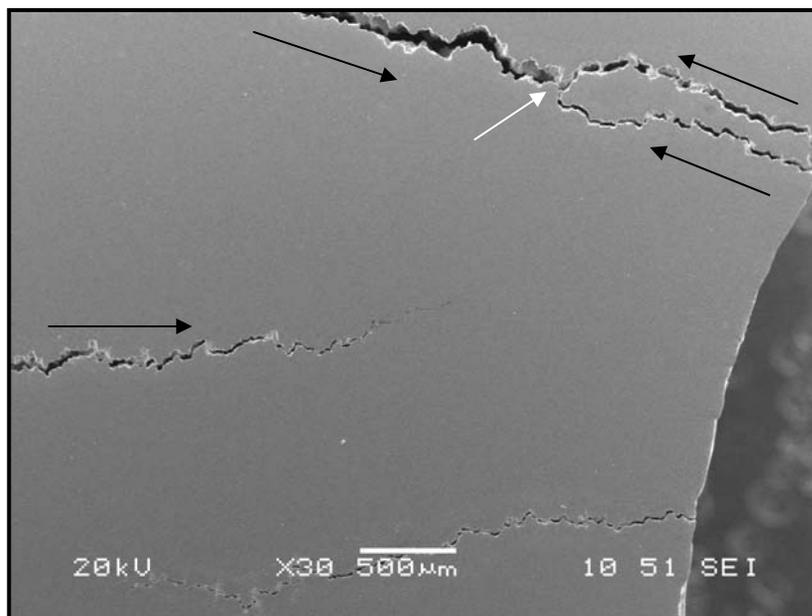


(b)

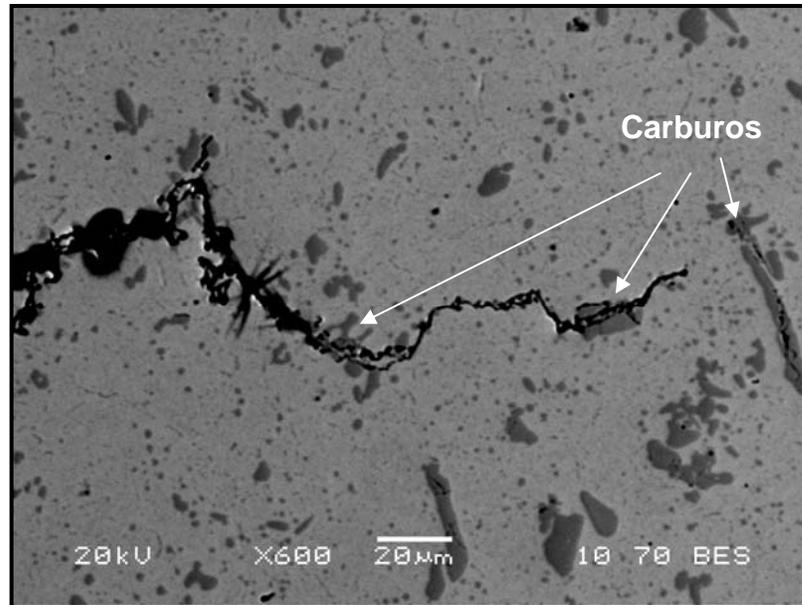
**Figura 6.22** En la imagen (a) se muestran los carburos en la microestructura del acero D2 ensayado con tratamiento térmico de endurecimiento (200x). (b) La misma imagen a 400x.

### Análisis con microscopía electrónica de barrido (SEM).

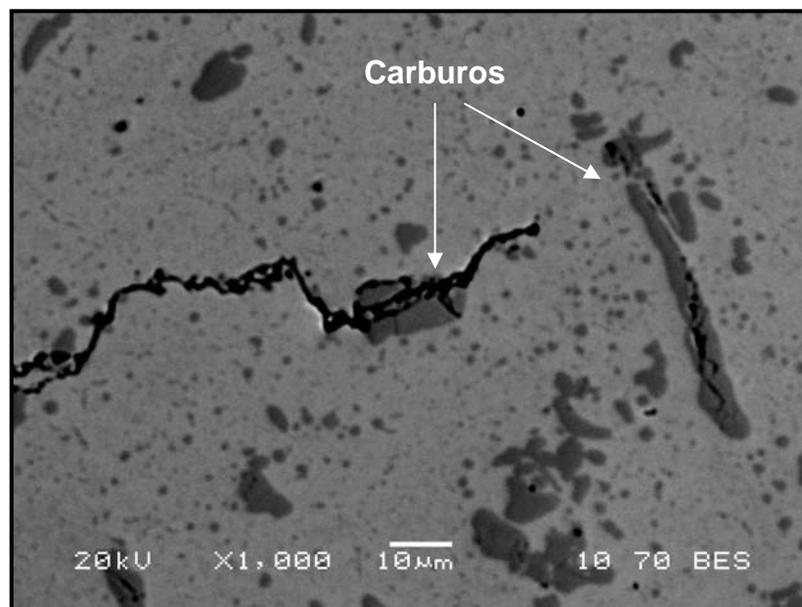
Se realizó un análisis mediante microscopía electrónica de barrido a 30, 600, 1000, y 1400x. Las probetas fueron examinadas en los modos de electrones retrodispersados y electrones secundarios, con la finalidad de observar detalles microestructurales y dimensiones en las grietas generadas. En esta serie de imágenes se observa como las grietas se originan y propagan a través de la probeta sometida a ciclos térmicos. Las grietas inician en la superficie del espécimen (Figura 6.23) y se propagan, cambiando de dirección, conforme se interceptan con la red de carburos (Figura 6.24 (a) y (b)). Las grietas frecuentemente inician en los carburos primarios creciendo alrededor y a través de estos como se muestra en las Figuras 6.25 a 6.28. Se aprecia claramente como los carburos más gruesos actúan como sitios de inicio preferencial de grietas térmicas (Figura 6.25), esto debido a su baja ductilidad así como también a la gran diferencia en el coeficiente de expansión térmica con respecto a la matriz.



**Figura 6.23** Las flechas oscuras indican la dirección de crecimiento de las grietas. En la parte superior derecha se aprecia la intersección de 3 grietas (flecha blanca), dos de ellas provenientes de la superficie interna de la muestra, mientras que la otra de la superficie externa. Magnificación de 30x en modo de haz de electrones secundarios (SEI).

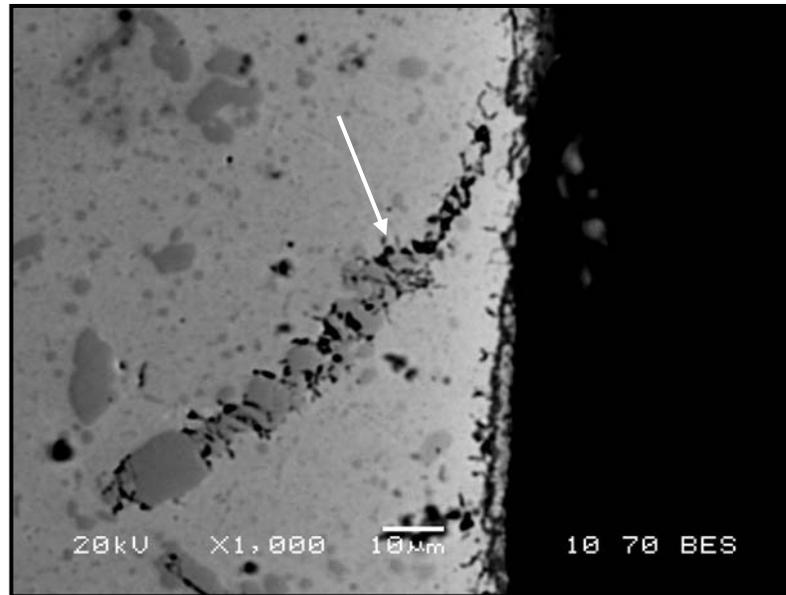


(a)

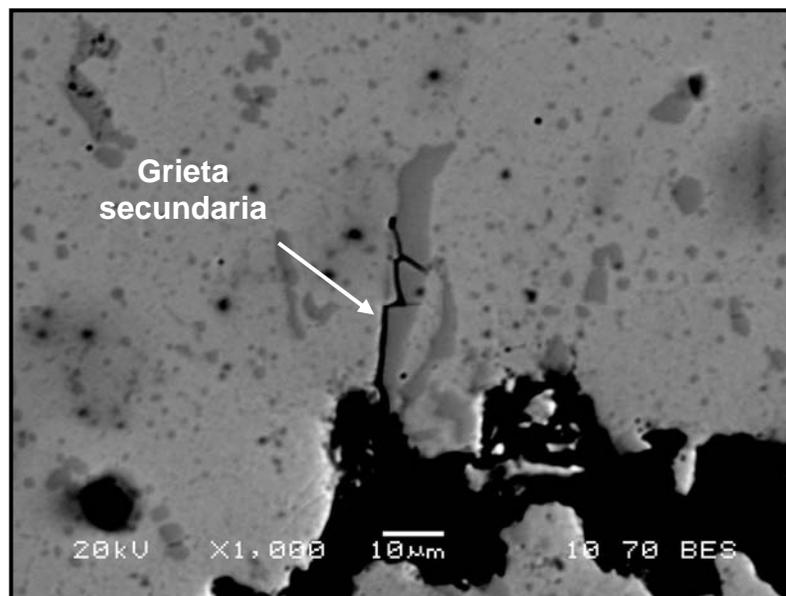


(b)

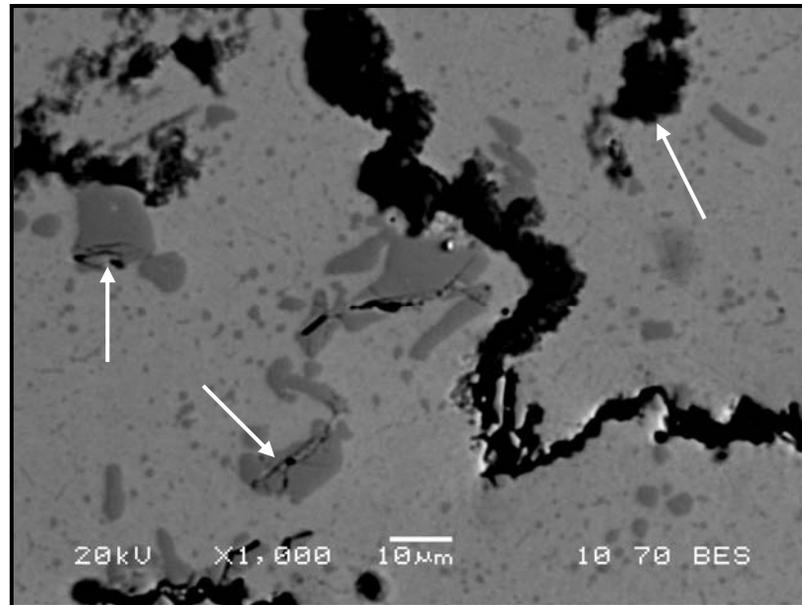
**Figura 6.24** (a) Se muestra la microestructura de acero D2 después de los ensayos a 600x, se aprecia claramente como la grieta sigue la dirección de los carburos. (b) Misma área a mayor magnificación (1000x). Estas imágenes se captaron mediante haz de electrones retro dispersados (BES).



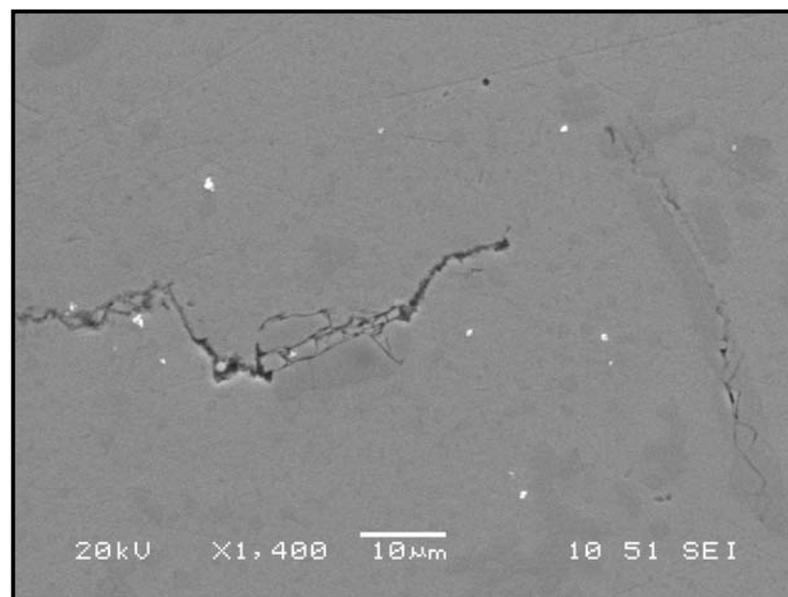
**Figura 6.25** En esta imagen se muestra como se fractura y desprenden partes de un carburo cercano a la superficie. Magnificación de 1000x en modo BES.



**Figura 6.26** Se indica una grieta secundaria en un carburo adyacente a la grieta primaria. Se aprecia como la grieta rodea inicialmente al carburo y lo atraviesa posteriormente. Magnificación de 1000x en modo BES.



**Figura 6.27** Se muestran, en otra área alrededor de la grieta primaria, carburos fracturados así como carburos desprendidos. Magnificación de 1000x en modo BES.



**Figura 6.28** Imagen tomada en la misma área mostrada en la Figura 6.24, pero en modo de haz de electrones secundarios (SEI) a 1400x. En esta modalidad es posible apreciar la dimensión de la grieta.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES

### 7.1 Banco de pruebas.

- La ejecución de las pruebas de factibilidad con la máquina prototipo permitió obtener lineamientos básicos que facilitaron el desarrollo del diseño y construcción de la máquina de ensayos de fatiga térmica en su versión final.
- Se desarrolló una nueva metodología a nivel laboratorio que permite simular la fatiga/choque térmico en especímenes metálicos. El nuevo banco de pruebas es capaz de provocar el agrietamiento por fatiga/choque térmico de una manera consistente y reproducible.

- La puesta en marcha y validación del banco de pruebas fue realizada usando un espécimen de acero D2 grado herramienta sujeta a ciclos térmicos bajo condiciones experimentales diversas, tales como la restricción al cambio volumétrico y el tratamiento térmico de endurecimiento de la probeta. De esta manera se obtuvieron resultados variables al modificar las condiciones de experimentación, concluyéndose por lo tanto que el banco de pruebas es capaz de diferenciar entre materiales con diferentes tratamientos térmicos, así mismo con y sin la aplicación del marco externo de restricción mecánica.
- La metodología desarrollada en este trabajo de investigación se aproxima a las condiciones que se presentan en aquellos procesos en los que se manifiesta el fenómeno de fatiga/choque térmico. Esto debido a que las condiciones tales como las temperaturas de calentamiento y enfriamiento alcanzadas, la razón de calentamiento y el gradiente térmico fueron reproducido durante los experimentos realizados. Por lo tanto se considera que los resultados obtenidos son aplicables en el diseño, selección y clasificación de materiales expuestos al fenómeno de fatiga térmica.
- La versatilidad de la máquina de ensayos de fatiga térmica permite obtener una gran variedad de condiciones experimentales tales como temperatura de calentamiento, temperatura de enfriamiento, sostenimiento de temperaturas, control de tiempo en ambas etapas, variabilidad en flujo y presión de agua en enfriamiento así como la restricción o libertad al cambio volumétrico, entre otras que pueden ser adoptadas para esta metodología según sea el caso de estudio.
- Este equipo experimental puede ser considerado como una valiosa herramienta para entender a profundidad el mecanismo de falla de fatiga/choque térmico en metales. Esto permite iniciar con una nueva línea de investigación y continuar la exploración en distintos materiales metálicos con resultados de alto valor científico y tecnológico.

## 7.2 Pruebas experimentales.

- Durante las pruebas de factibilidad no se llegó a promover la falla de agrietamiento por fatiga/choque térmico sobre la probeta, debido a que el modo de calentamiento generaba un estado estable en la misma (temperatura uniforme) y el modo de enfriamiento fue ineficiente para realizar una rápida reducción en la temperatura.
- En las pruebas de validación experimental con la MEFT, la alta dureza (60 HRC) y baja tenacidad presente en las probetas de ensayo fue un factor fundamental que promovió el agrietamiento durante los ciclos térmicos.
- Los patrones de agrietamientos térmicos generados dependió de la presencia o ausencia de la restricción al cambio volumétrico en la probeta, aplicado por el amordazamiento mecánico del sistema de sujeción.
- Debido a que la falla por agrietamiento térmico se produjo en los primeros ciclos, se puede concluir que el mecanismo que se presentó principalmente fue de choque térmico.
- Es importante obtener un balance óptimo entre la dureza máxima y la tenacidad del material para incrementar la resistencia al fenómeno de fatiga/choque térmico.

## **CAPÍTULO 8**

# **RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

En el presente proyecto de tesis se diseñó y construyó una máquina de ensayos de fatiga térmica a nivel laboratorio. Además se realizaron los correspondientes experimentos de validación propuestos dentro del alcance del trabajo. Con la finalidad de realizar otras investigaciones a futuro sobre el mecanismo de falla por fatiga térmica, se recomienda lo siguiente:

- Disponer del nuevo equipo adquirido, sistema de calentamiento de inducción y bomba de flujo del sistema de enfriamiento. Se recomienda llevar a cabo la instalación de dicho equipo y verificar su funcionamiento.

- Incorporar un sistema de control automatizado y adquisición de datos en la máquina de ensayos de fatiga térmica para realizar los ensayos con mayor control y precisión.
- Implementar en la MEFT, además de los dos modos de control con los que ya se cuenta (*control-temperatura, control-tiempo*), un tercer modo de operación *control-deformación*. De esta manera, las pruebas pueden ser controladas en función de la cantidad de deformación.
- Obtener valores de deformación a altas temperaturas durante los ciclos térmicos a través de transductores electrónicos para posteriormente adquirir, mediante cálculos numéricos, los esfuerzos generados.
- Estimar los esfuerzos y deformaciones en la probeta por medio de una simulación de elemento finito para obtener información mas acertada y realizar una analogía y análisis con los resultados arrojados por el banco de pruebas.
- Realizar un mayor número de ciclos térmicos sobre probetas que posean menor dureza para estudiar la fenomenología del mecanismo de falla.
- Llevar a cabo una experimentación con especímenes idénticos: propiedades mecánicas, tratamiento térmico y dimensiones geométricas equivalentes, pero bajo distintas condiciones de experimentales.
- Otra experimentación propuesta es trabajar bajo las mismas condiciones de ensayo y con un número de probetas que difieran en su tratamiento térmico.
- Para cada caso, realizar un análisis a profundidad donde se evaluará la densidad, profundidad y ancho de grietas, el lugar de origen en la microestructura, así como los esfuerzos generados por medio de la medición de la deformación. Esta

evaluación será en función de las temperaturas, ciclos térmicos así como propiedades y tratamiento térmico de la muestra.

- Diseñar experimentos que permitan comparar resultados de dispositivos de evaluación de fatiga térmica de otras instituciones o grupos de trabajo.

## Lista de Figuras

Figura	Descripción	Página
2.1	Temperaturas transitorias.	11
2.2	Cuerpo cilíndrico expuesto a calentamiento.	12
2.3	Esquema de una barra calentada.	14
2.4	Ciclo de histéresis para una barra empotrada calentada y enfriada.	15
2.5	Ciclo de histéresis para el modelo de barra.	17
4.1	Análisis de un sistema técnico.	47
4.2	Sistema técnico dividido en ensambles y componentes.	47
4.3	Categorías de pruebas.	51
5.1	Prototipo de Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica.	58
5.2	Imágenes del desplazamiento del espécimen.	60
5.3	Detalle de la etapa de calentamiento.	61
5.4	Detalle de la etapa de enfriamiento.	62
5.5	Dibujo de la vista general del soporte inferior.	64
5.6	Esquema de la vista superior y frontal del soporte inferior.	64
5.7	Dibujo de la vista general del soporte superior.	65
5.8	Esquema de la vista superior y frontal del soporte superior.	65
5.9	Dibujo de la vista general del subsistema de estructura ensamblado.	66
5.10	Esquema de la vista frontal y lateral del ensamble final.	66
5.11	Calentamiento superficial y profundidad de calentamiento.	67

5.12	Componentes del equipo de calentamiento por inducción.	68
5.13	Componentes del equipo de calentamiento por inducción utilizado.	69
5.14	Pirómetro MiniRT con pirómetro Modline 5G.	70
5.15	Esquema del patrón de aspersión de impacto de las boquillas.	74
5.16	Patrón de aspersión de la boquilla tipo “ <i>oval spray</i> ”.	75
5.17	Dibujo e imagen de la boquilla tipo “ <i>oval spray</i> ”.	75
5.18	Características del patrón de aspersión.	76
5.19	Datos y esquemas utilizados.	77
5.20	Datos y esquemas utilizados.	77
5.21	Esquema del patrón de aspersión de impacto elíptico.	78
5.22	Esquema del patrón de aspersión en 3D.	79
5.23	Esquema de la vista general de la cámara de enfriamiento.	80
5.24	Imágenes de la cámara de enfriamiento.	80
5.25	Imagen de la bomba Siemens tipo Jet.	81
5.26	Componentes del subsistema de sujeción de la probeta.	83
5.27	El esquema de las partes que componen al subsistema de sujeción	83
5.28	Imágenes del subsistema de sujeción.	84
5.29	Imagen y esquema de la extensión del vástago del pistón.	85
5.30	Imagen de la MEFT durante la etapa de calentamiento.	88
5.31	Imagen de la MEFT durante la etapa de enfriamiento.	88
5.32	Esquema de la máquina de ensayos de fatiga térmica.	89
5.33	Caras pulidas de la probeta sin tratamiento térmico.	93

5.34	Imágenes de la microestructura del acero D2 a 200x y 400x.	94
5.35	Imagen de una sección de barra de acero D2.	96
5.36	Imágenes de la microestructura del acero D2 a 200x y 400x.	97
5.37	Imágenes de la microestructuras a 200x y 400x.	98
5.38	Se muestran las curvas de enfriamiento y calentamiento.	100
6.1	Prototipo de Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica.	107
6.2	Etapas de enfriamiento de ProMEFT.	109
6.3	Imagen de la probeta de acero D2 después de 500 ciclos térmicos.	110
6.4	Imagen de la Máquina de Ensayos de Fatiga Térmica en operación.	112
6.5	Imágenes de la MEFT en operación.	114
6.6	Se muestra el choque de aspersion cónica de impacto elíptico.	116
6.7	Imagen de la MEFT en su etapa de calentamiento.	117
6.8	Se observa la parte superior de la cámara de enfriamiento.	118
6.9	Máquina de ensayos de fatiga térmica en operación, tercera etapa.	119
6.10	Imagen del monitoreo de temperaturas.	120
6.11	Imagen de la etapa de enfriamiento.	121
6.12	Esquema del flujo de agua después del choque sobre la muestra.	122
6.13	Se muestra la superficie extendida de la probeta 1.	124
6.14	Se muestra la superficie extendida de la probeta 2.	124
6.15	Se muestra el patrón de agrietamiento producido sobre la probeta 6.	125
6.16	Se observa la superficie de la muestra 7 después de dos ciclos.	126
6.17	Se muestra el corte transversal de la muestra.	127

6.18	Sección inferior de probeta ensayada.	128
6.19	Sección superior de probeta ensayada.	129
6.20	Imagen de sección superior e inferior.	130
6.21	Huella de un ensayo de micro dureza Vickers.	131
6.22	Se muestran los carburos en la microestructura.	132
6.23	Se indica la dirección de crecimiento de las grietas.	133
6.24	Se muestra la microestructura de acero D2 después de los ensayos.	134
6.25	Se muestra como se fractura y desprenden partes de un carburo.	135
6.26	Se indica una grieta secundaria en un carburo.	135
6.27	Se muestran carburos fracturados así como carburos desprendidos.	136
6.28	Imagen tomada en modo de haz de electrones secundarios.	136

## Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Página
3.1	Condiciones y características de técnicas.	30
5.1	Resultados obtenidos analíticamente.	73
5.2	Características de los tipos de boquillas contempladas.	74
5.3	Medición experimental del gasto.	82
5.4	Composición química nominal del acero D2.	91
5.5	Características de los cuatro tipos de probetas.	91
5.6	Durezas obtenidas en probeta sin tratamiento térmico.	92
5.7	Microdurezas obtenidas en probeta sin tratamiento térmico.	92
5.8	Tratamiento térmico de endurecimiento.	95
5.9	Condiciones experimentales de los ensayos de validación.	99
6.1	Resumen de las condiciones experimentales de las pruebas.	123
6.2	Durezas obtenidas sobre la sección inferior de la probeta.	128
6.3	Durezas obtenidas sobre la sección superior de la probeta.	129
6.4	Microdurezas Vickers obtenidas en cara de corte de acero D2.	131

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Miguel Angel Quiñones Salinas

Candidato para el Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica  
con Especialidad en Materiales.

Tesis: “Desarrollo de una metodología para ensayos de fatiga térmica”

Miguel Angel Quiñones Salinas nació el 15 de abril de 1980 en la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Hijo del Sr. Miguel Quiñones Fuentes y la Sra. Sandra Neida Salinas González.

Curso sus estudios profesionales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, obteniendo el título de Ingeniero Mecánico en el año 2003.

En Agosto del año 2003 inicia sus estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales, becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), dentro del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales (PDIM) de esta misma facultad.