



Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Mecánica
Departamento de Manufactura y Materiales

TRABAJO DE DIPLOMA

**Desarrollo de un método no destructivo para la detección y
seguimiento de grietas por fatiga a través de la deformación
plástica en probetas compactas de tracción.**

Fidel Román González García

Santiago de Cuba
- 2014 -



Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Mecánica
Departamento de Manufactura y Materiales

TRABAJO DE DIPLOMA

**Desarrollo de un método no destructivo para la detección y
seguimiento de grietas por fatiga a través de la deformación
plástica en probetas compactas de tracción.**

AUTOR

Fidel Román González García

TUTOR

Dr. Ing. Frank de los Reyes Rodríguez (PT)

**Santiago de Cuba
- 2014 -**

DEDICATORIA

1. A mis padres, especialmente a mi madre Noemí García Sánchez por siempre darme ese empujoncito que hace falta para lograr hasta lo imposible.

RESUMEN

En este trabajo, se realizó un estudio bibliográfico acerca de las generalidades del acero 12CrMoV, también se relacionó la dependencia que tiene la fatiga con la deformación plástica en la aparición de grietas en probetas compactas a tracción obtenidas de este material. Se aborda el tema de los ensayos no destructivos existentes y su aplicación en la detección de grietas

Seguido a esto se recomienda un método para el estudio de la incubación y seguimiento de grietas utilizando el ruido magnético de Barkhausen. Se da un acercamiento a las características de la probeta compacta a tracción y al equipo utilizado con las modificaciones pertinentes.

Con posterioridad, se desarrollan los ensayos de preagrietamiento por fatiga, para determinar la relación intrínseca que existe con el voltaje medio efectivo (RMB) y la longitud de grieta en las probetas compactas de tracción con distintos niveles de deformación plástica.

ABSTRACT

In this work, is carried out a bibliographical study about the generalities of the 12CrMoV steel, also was related the dependence that has the fatigue with the plastic deformation with the apparition of cracks in traction compact specimen samples obtained from this material. It approaches the topic of the non destructive testing and its application in the detection of cracks

Followed to this, a method for the study of the follow and incubation of cracks is recommended using the magnetic Barkhausen noise. An approach to the characteristics of the compact specimen samples is given and to the equipment used with the pertinent modifications.

Afterwards, is developed the pre-cracking tests to determine the intrinsic relationship between root mean square of voltage and crack length with different levels of plastic deformation.

INDICE

Lista de figuras	
Lista de tablas	
Introducción	1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
Introducción	4
1.1 Aceros empleados en la industria termoenergética	4
1.1.1 Características del acero de construcción utilizado en las líneas principales de vapor (12Cr1MoV)	6
1.2 Deformaciones elásticas y plásticas	7
1.3 Fatiga. Teoría, conceptos y definiciones	15
1.4 Generalidades de los ensayos no destructivos	15
1.4.1 Aplicaciones de los ensayos no destructivos	18
1.4.1.1 Mejoramiento en las técnicas de manufactura	18
1.4.1.2 Reducción de los costos de producción	18
1.4.1.3 Aumento en la confiabilidad	19
1.4.1.4 Evaluación de calidad	19
1.4.1.5 Evaluación de vida	20
1.4.2 Tipos de END y características más usuales	20
1.4.2.1 Ensayo radiográfico	21
1.4.2.2 Ensayos de partículas magnéticas	23
1.4.2.3 Ensayo de líquido penetrante	24
1.4.2.4 Ensayo de corriente inducida	26
1.4.2.5 Ensayo ultrasónico	27
1.5 Ruido magnético de Barkhausen	28
1.5.1 Espectroscopia y medición del RMB	29
1.5.2 Magnitudes fundamentales del RMB	31
1.5.3 Efectos de la deformación plástica en el RMB	34
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO 1	36
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS	37
Introducción	37
2.1 Preparación de la muestra	38
2.2 Ensayo de fatiga	39

2.3 Observación de la muestra	41
2.3.1 Desbaste	42
2.3.2 Pulido	42
2.3.3 Observaciones	42
2.4 Medición de ruido magnético Barkhausen.	43
2.5 Planificación experimental	47
2.6 Análisis de resultado	47
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO 2	48
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS	49
Introducción	49
3.1 Ensayo de preagrietamiento por fatiga	49
3.2 Medición de la deformación con el empleo del ruido magnético Barkhausen.	51
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO 3	61
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Fig.1.1 Deformación en dependencia de la tensión.	8
Fig. 1.2 Formas de curvas tensión-deformación.	10
Fig.1.3 Deslizamiento plástico de una red cristalina ideal.	12
Fig.1.4 Esquema de la dislocación de un desplazamiento plástico.	13
Fig. 1.5 Representación esquemática de un ensayo radiográfico.	22
Fig. 1.6 Espacio cercano de la superficie de la pieza.	24
Fig. 1.7 Etapas en un ensayo con LP.	25
Fig.1.8 Bobina por la que circula una corriente alterna.	26
Fig. 1.9 Características esquemáticas de un ensayo ultrasónico	27
Fig. 1.10 Esquemas de las configuraciones más usadas del sistema de excitación-medición del RMB.	30
Fig. 1.11 Parámetros básicos de un salto del RMB.	32
Fig. 1.12 Ejemplo de la parte positiva de una señal del RMB y su envolvente correspondiente	34

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1 Secuencia para el desarrollo de método magnético no destructivo para detectar y seguir grietas por fatiga a través de la deformación plástica en probetas compactas a tracción.	37
Fig. 2.2 Probeta compacta de tracción según ASTM-E 1457-00.	38
Fig. 2.3 Plano isométrico y dimensiones de la PCT para el ensayo de velocidad de propagación de grietas.	39
Fig. 2.4 Máquina universal de fatiga por impacto.	40
Fig. 2.5 Dispositivo para el preagrietamiento de probetas compactas de tracción.	40
Fig. 2.6 Mecanismo adaptado a la máquina universal de fatiga por impacto.	41
Fig. 2.7 Desbastadora METASINEX.	42
Fig. 2.8. Microscópio óptico marca NOVEL.	43
Fig. 2.9: Configuración esquemática del sistema de medición del RMB empleado.	44

Fig. 2.10 Dispositivo excitación-medición del RMB.	44
Fig. 2.11 Esquema general del dispositivo para la medición del RMB.	45
Fig. 2.12 Esquema general del dispositivo para la medición del RMB.	45
Fig. 2.13 Análisis de muestras con diferentes tamaños y geometrías en el dispositivo diseñado.	46
Fig. 2.14 a) Esquema general de medición del RMB.	46
Fig. 2.14 b) Sistema excitación medición durante la medición del RMB	46
Fig. 2.15 Curva de potencia para determinar el número de observaciones de V_{rms} .	47

CAPÍTULO 3

Fig. 3.1 a) Procedimiento de medición de la longitud de grieta en la PCT.	49
Fig.3.1 b) Grietas obtenidas durante el proceso de preagrietamiento.	49
Fig. 3.2 Dependencia del RMB (V_{rms}) con la deformación plástica en el acero 12Cr1MoV.	52
Fig. 3.3 Frecuencia de incubación de grietas por fatiga en los aceros 12Cr1MoV.	53
Fig. 3.4 Dependencia del RMB con la deformación plástica en los aceros 12Cr1MoV, enfatizando deformaciones inferiores al 1%: a) MVP y b) V_{rms}	54
Fig. 3.5 Dependencia de la densidad espectral del RMB con la frecuencia para diferentes niveles de deformación plástica en el acero: 12Cr1MoV.	55
Fig. 3.6 Dependencia de la envolvente del RMB con la deformación plástica para el acero: 12Cr1MoV	56
Fig. 3.7 Dependencia entre la deformación plástica y la longitud de grieta en muestras compactas de tracción en el acero 12Cr1MoV.	57

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Composición química en (%) y las propiedades mecánicas del acero 12Cr1MoV con cero horas de explotación.	7
Tabla 1.2 Aplicaciones fundamentales de los END.	17

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Composición química del acero 12Cr1MoV en (%) y sus propiedades mecánicas.	38
Tabla 2.2 Correspondencia entre la apreciación del ocular y la apreciación del milímetro internacional.	43

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Longitud de grieta obtenida para el material.	50
Tabla 3.2 Valores de V_{rms} para distintas longitudes de grieta por fatiga en muestras compactas de tracción.	58
Tabla 3.3 Valores de MVP para distintas longitudes de grieta por fatiga en muestras compactas de tracción.	60

INTRODUCCIÓN

Los aceros al CrMo y al CrMoV son empleados en gran cantidad de aplicaciones industriales, entre las que se destacan las tuberías para transportación de vapor, fabricación de elementos de sujeción y apoyo en calderas de plantas termoeléctricas, entre otras. De forma general, estos aceros contienen una estructura inicial de ferrita y perlita o ferrita y bainita, que se logra con el tratamiento térmico a temperaturas entre 550 °C y 700 °C por varias horas, el cual genera la precipitación de carburos aleados estables y compuestos intermetálicos, que interfieren en el progreso de las dislocaciones. Estos regímenes de calentamiento eventualmente determinan la estabilidad de las propiedades mecánicas de los aceros empleados en plantas térmicas; por ejemplo: la resistencia a la deformación por termofluencia y otras propiedades, así como el tiempo de vida remanente.

El vapor que se transporta en tuberías fabricadas de estos aceros posee temperaturas de entre 5 °C y 56 °C, y provoca en su interior presiones de entre 10 MPa y 15 MPa. Una vez transcurridos elevados tiempos de explotación a regímenes de termofluencia, la microestructura de estos aceros cambia, la perlita/bainita se descompone, y comienza la precipitación, crecimiento y migración de carburos hacia el límite de los granos de ferrita. Este cambio hacia una estructura termodinámicamente inestable provoca la formación de cavidades y el surgimiento de daños internos, lo cual conduce a la falla del material debido a la estrecha relación que existe entre los cambios microestructurales y el deterioro de sus propiedades mecánicas.

Estos aceros han recibido gran parte de la atención de la comunidad científica a nivel internacional, debido a la importancia económica y social que requiere el estudio de su durabilidad; por ello es que, entre los principales ensayos que se les desarrollan se encuentra el de velocidad de propagación de grietas a elevadas cargas y temperaturas, simulando las condiciones reales de explotación.

A fin de conocer con qué velocidad se propagan las grietas se emplean instalaciones especiales. Para el desarrollo de esta técnica se utilizan probetas compactas de tracción (PCT) que se someten a condiciones de cargas estáticas o casi estáticas; es decir, constantes en el tiempo. Los valores del tiempo y longitud de grieta son

extraídos del ensayo y procesados, para finalmente obtener la razón de propagación.

Para las PCT no existen requerimientos específicos acerca de su tamaño, parámetro que debe ser escogido en consideración a la geometría del sistema de cargas y horno de ensayo, de forma tal que tenga tamaño suficiente para hacer crecer la grieta y recoger información sobre su longitud.

Para llevar a cabo este experimento se utilizan diferentes normas, entre las que se destaca la ASTM E1457-00 Standard test method for measurement of creep crack growth rates in metals, la cual exige la presencia de una pregrieta por fatiga, previo el ensayo de velocidad de propagación de grietas a elevadas temperaturas.

Esta pregrieta se obtendrá variando cíclicamente la carga, desde un valor mínimo hasta un valor máximo, la cual será disminuida una vez incubada la grieta para evitar grandes tensiones plásticas por el frente de ésta y tener un mejor control de su crecimiento.

Una de las problemáticas del proceso de preagrietamiento es la dificultad de controlar la longitud de grieta; esta operación, por regla general, se lleva a cabo mediante el empleo de strength gages, o desmontando la muestra para su medición en microscopios ópticos; sin embargo, con estas técnicas no se puede conocer el momento justo de su incubación, se pierde tiempo en los procesos de remontaje posmedición y se afecta el equilibrio inicial de aplicación de cargas para un crecimiento balanceado de la grieta por ambas caras de la PCT.

Por tanto el **problema científico** de esta investigación radica en la carencia de un método no destructivo que permite detectar el momento de incubación y posterior seguimiento de la grieta por fatiga en probetas compactas de tracción.

El **objeto de estudio** son los procesos de preagrietamiento y el campo de acción la ciencia, ingeniería de materiales y los ensayos no destructivos.

El **objetivo** del trabajo consiste en desarrollar un método no destructivo para la detección y seguimiento de grietas por fatiga a través de la deformación plástica en probetas compactas de tracción.

Se defiende como **hipótesis** que si se desarrolla el método mencionado anteriormente, se podrá conocer el momento justo de incubación de la grieta, evitar la frecuencia de los procesos de remontaje y posmedición.

Para cumplimentar el objetivo propuesto, se proponen las siguientes tareas:

1. Estudio del estado del arte acerca de mecanismos de deformación plástica, preagrietamiento por fatiga y ensayos no destructivos.
2. Ensayos de preagrietamiento por fatiga en probetas compactas de tracción.
3. Ensayos del ruido magnético de Barkhausen en probetas compactas de tracción preagrietadas por fatiga.

Se utilizarán los **métodos científicos de investigación** siguientes:

- **Métodos teóricos:**

- Análisis y síntesis, en el procesamiento de la información para conformar el marco teórico de la investigación.
- Histórico-lógico, en el análisis histórico del comportamiento de las grietas por fatiga durante ensayos de preagrietamiento.

- **Métodos matemáticos y estadísticos:**

- Para la realización del diseño de experimentos a fin de determinar el número de muestras por ensayar, así como para el procesamiento de los datos y señales obtenidas.

- **Método sistémico estructural:**

- Para determinar la relación de los parámetros de la metodología.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Introducción

El presente capítulo está encaminado a brindar una panorámica sobre la revisión en la literatura especializada acerca de la temática que se investiga, la misma está enfocada en las características del acero 12Cr1MoV, la relación que tiene las deformaciones elasto-plásticas con la fatiga de la probeta a utilizar para determinar el momento de incubación y posterior seguimiento de grietas en probetas compactas a tracción, también presenta como enfoque el acercamiento a los principales métodos no destructivos desarrollado por el hombre y por último menciona algunos aspectos fundamentales del método no destructivo aplicado (método Barkhausen) en la probeta.

1.1 Aceros empleados en la industria termoenergética

En la actualidad, más del 80 % de todos los procesos industriales demandan del uso de elevadas temperaturas; de la misma forma, no se concibe el desarrollo de la humanidad sin la presencia de energía eléctrica, la cual, sea por un método u otro necesita de la generación de energía térmica, esta es considerada como medio acelerante de los procesos de falla de todos los materiales.

De forma general, se entiende por aleaciones termorresistentes (de aceros) aquellas que poseen elevadas propiedades mecánicas a altas temperaturas. Sin embargo, dentro de las instalaciones termoenergéticas existen un sinnúmero de elementos que trabajan a distintos regímenes de carga como de temperatura, por lo que las sollicitaciones de los materiales son dependientes de las condiciones de explotación. Se ha establecido que a temperaturas altas el metal se comporta en muchos sentidos de un modo diferente que a temperaturas normales, e incluso que a 300 – 350 °C, razón por la cual estos materiales se han convertido en los últimos años en medio de atención de la comunidad científica internacional, la que a venido

desarrollando métodos para elevar la durabilidad de los mismos ante similares regímenes de explotación.

El comportamiento de los aceros ante distintos rangos de temperatura ha propiciado su clasificación en grupos. Por ejemplo, por debajo de 300 °C tienen más resistencia los aceros de construcción simples, tratados para que tengan elevada resistencia. El fenómeno de la termofluencia no se observa por debajo de 300 – 350 °C de temperatura, de modo que si las temperaturas de trabajo son inferiores a 300 °C no es necesario utilizar aceros o aleaciones especiales resistentes a elevadas temperaturas [1].

Para trabajos en el intervalo de 350 – 500 °C son óptimos por sus cualidades los aceros relativamente poco aleados de las clases ferríticas y perlíticas. Cuando las temperaturas aumentan en el orden de los 550 -650 °C, la resistencia de los aceros de este tipo disminuye bruscamente, cediendo ante los aceros de clase austenítica, y en el rango de 650 – 900 °C los aceros de clase austenítica ceden el lugar a las aleaciones ricas a base de cobalto y níquel. Entre los aceros más empleados en la industria termoenergética se pueden mencionar, de acuerdo con la norma GOST, el 12MX, 12X2MΦCP, X5BΦ, 15X11MΦ, 12X1MΦ, etc., siendo este último parte componente del objeto de estudio de la presente investigación.

Dentro de las instalaciones termoenergéticas, se encuentran las conductoras de vapor, las cuales están construidas de acero 12X1MΦ [2]. Estas se hallan sometidas a temperaturas moderadamente altas (500– 600 °C) y a cargas mecánicas de larga duración; como resultado de estas condiciones de trabajo, en este acero es común que ocurran procesos de fluencia térmica, variación de la microestructura y propiedades mecánicas (a consecuencia del fenómeno de envejecimiento del material). Lo que se recomienda es que estos materiales sean de clase perlítica, martensítica, bainítica y ferrítica, para los cuales es común el tener como base, solución sólida α y como fase excesiva carburos de diversas estructuras.

El acero 12Cr1MoV se encuentra dentro del grupo de los aceros de clase ferrito-perlítica para los cuales es común el tener como fase matriz ferrita y como fase en exceso, carburos de diversas estructuras y composición [3]. Como la construcción de

estos agregados deben cumplir su designación de servicio durante un gran tiempo sin ser sustituidos y durante este tiempo no deben ocurrir deformaciones apreciables, su principal característica es el límite de fluencia del 1 % en un plazo de trabajo del orden de las 100 000-200 000 h.

La alta termorresistencia de este acero se debe a la presencia de los elementos de aleación, los cuales fortalecen la matriz y forman carburos de alta estabilidad. En los aceros de clase perlítica, la introducción de una pequeña cantidad de molibdeno eleva la temperatura de recrystalización de la ferrita y por esto aumenta su resistencia a altas temperaturas; de forma análoga, pero en menor medida, actúa el cromo. Los aceros del tipo perlítico con poco contenido de cromo no es recomendable a temperaturas mayores de 580 °C. Actualmente se toma como base para el cálculo de elementos que trabajan a altas temperaturas la relación entre la razón de deformación y las tensiones existentes a una temperatura dada, como ejemplo de estos elementos se pueden citar: tuberías de vapor que trabajan bajo presiones considerables, álabes de turbinas de vapor, etc., a los que luego de un estudio se les puede determinar su vida útil por medio de las cartas de termofluencia.

1.1.1 Características del acero de construcción utilizado en las líneas principales de vapor (12Cr1MoV)

El acero 12Cr1MoV posee buenas propiedades mecánicas, estas hacen de él un material de mucha aplicación [4], entre las cuales figura, como ya se mencionó, la construcción de las líneas principales de vapor de las centrales termoeléctricas de nuestro país, las que se encuentran sometidas a la acción de altas presiones y temperaturas, cargas mecánicas, corrosión y erosión [5] provocadas por el vapor que circula en su interior, sobre todo en los codos. Este acero se alía con distintos elementos para lograr diferentes propiedades, como son la resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas, y a la termofluencia, entre otras.

Con independencia de su aplicación para la fabricación de tuberías conductoras de vapor, el acero 12Cr1MoV se emplea en la fabricación de piezas de sujeción, recalentadores y otros agregados sometidos a cargas mecánicas de larga duración a

temperaturas moderadamente altas (<600 °C). En la tabla 1.1 se muestra la composición química de este acero y sus propiedades mecánicas con cero horas de explotación, según norma TY14-3-460-75.

Tabla 1.1 Composición química en (%) y las propiedades mecánicas del acero 12Cr1MoV con cero horas de explotación [6].

Composición química							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,12	0,23	0,54	< 0,015	< 0,019	1,1	0,26	0,17
Propiedades mecánicas							
R_t (Mpa)		R_{0,2} (Mpa)		√ (%)		Ψ (%)	
≥ 450		≥ 280		45		20	

1.2 Deformaciones elásticas y plásticas

Las tensiones aplicadas a un material provocan su deformación. Las deformaciones pueden ser elásticas, que desaparecen una vez que se quita la carga, y plásticas, que se conservan después de eliminar aquella. Por muy pequeña que sea la tensión aplicada, produce una deformación; las deformaciones iniciales son siempre elásticas y su magnitud es directamente proporcional a la tensión.

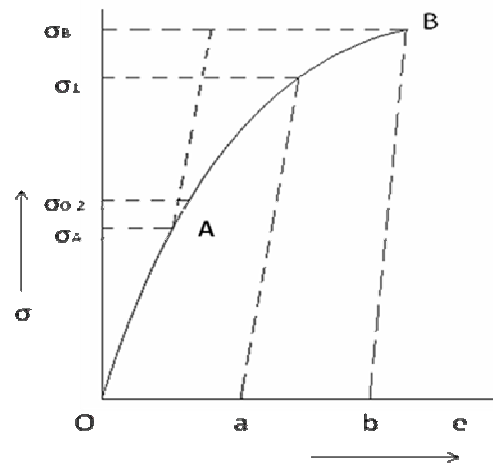


Fig.1.1 Deformación en dependencia de la tensión.

En la curva que se da en el diagrama de la figura 1.1, la deformación elástica está caracterizada por la línea OA y su prolongación. Por encima del punto A se altera la proporcionalidad entre la tensión y la deformación. La tensión produce ya no solo una deformación elástica, sino también una deformación remanente, plástica. Su magnitud es igual al segmento horizontal que va desde la línea de trazo hasta la curva. Entre las deformaciones existe una profunda diferencia física.

En la deformación elástica, por la acción de fuerzas externas varía la distancia que hay entre los átomos en la red cristalina. Cuando se quita la carga se elimina la causa que promovió la variación de la distancia interatómica, los átomos vuelven a ocupar los puestos que tenían y la deformación desaparece.

La deformación plástica es un proceso completamente distinto y mucho más complejo. En ella una parte del cristal se traslada con respecto a la otra. Si se le quita la carga, la parte desplazada del cristal no retorna a la posición inicial; la deformación se conserva. Estos desplazamientos se descubren en el análisis microestructural [7].

Además, la deformación plástica va acompañada de una división de los bloques del mosaico dentro de los granos, y si los grados de deformación son considerables, se observa también un cambio notable en la forma de los granos (y a veces dentro de ellos).

Existe una diferencia profunda entre la deformación elástica y la plástica. La dependencia OAB, representada en la (fig.1.2), entre la tensión (σ) aplicada desde

afuera y la deformación relativa (e) que produce, caracteriza las propiedades mecánicas de los metales: la inclinación de la recta OA indica la rigidez del metal o es característica de cómo la carga aplicada desde fuera hace que varíen las distancias interatómicas, que en primera aproximación caracteriza la fuerza de acción de los átomos. La tangente del ángulo de inclinación de la recta OA es proporcional al módulo de elasticidad (E), el cual es igual numéricamente al cociente de dividir la tensión por la deformación elástica relativa ($E = \sigma/e$); la tensión σ_a corresponde al instante en que aparece la deformación plástica. Cuanto más exacto sea el método de medida de la deformación, tanto más bajo se encontrará el punto A. En las mediciones técnicas se aceptan la característica llamada límite de fluencia $\sigma_{0,2}$ (carga que produce una deformación permanente igual al 0,2 % de la longitud de la probeta, objeto); la tensión máxima σ_B corresponde a la carga máxima alcanzada en el ensayo de tracción.

La magnitud de la deformación plástica que precede a la rotura se determina como la variación relativa de la longitud (o de la sección transversal)- llamada alargamiento relativo δ (o estricción relativa ψ)-, que caracteriza la plasticidad del metal; el área de la superficie que hay debajo de la curva OAB es proporcional al trabajo que hay que gastar para romper el metal. Este índice, determinado por diversos procedimientos (principalmente por golpes sobre una probeta con entalladuras), distingue la tenacidad del metal.

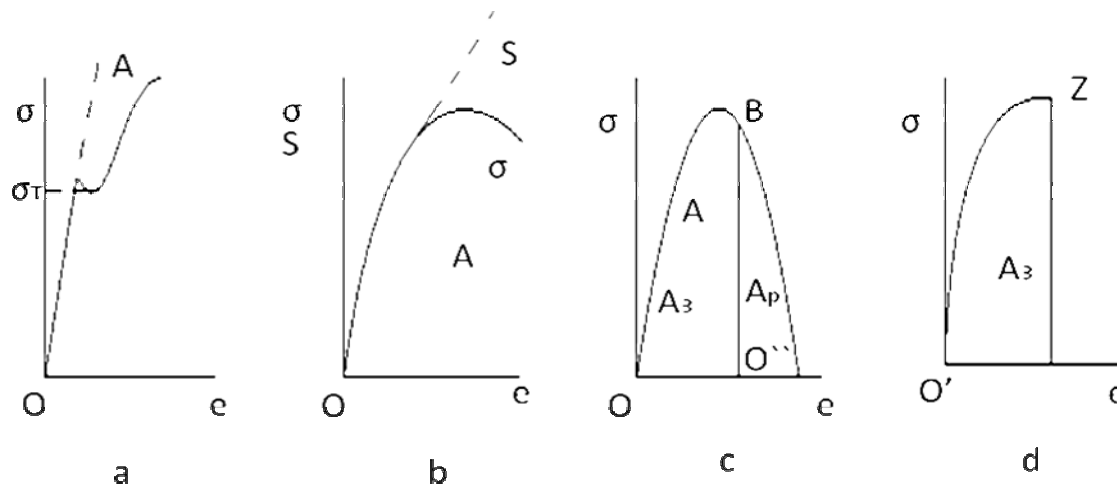


Fig. 1.2 Formas de curvas tensión-deformación.

Toda la curva se puede dividir en dos trozos por el punto B figura 1.2, c, el cual caracteriza el instante en que aparece una grieta capaz de desarrollarse, lo que conduce a la rotura. Como el área de la superficie que hay debajo de la curva OBO' es proporcional al trabajo de rotura, el área OBO'' es igual al trabajo necesario para que se forme la grieta (trabajo de formación de la grieta A_f^2) y el área O''BO' será igual al trabajo necesario para que se extienda la grieta a toda la sección (trabajo de propagación de la grieta A_p). Por lo tanto, el trabajo total gastado $A_{total} = A_f + A_p$.

En el comportamiento del metal después del punto B pueden ocurrir dos casos diferentes en principio. Si luego de formarse la grieta su propagación requiere cierto trabajo, la rotura se llama tenaz y se distingue por una forma determinada de fractura y porque A_p es mayor que cero (fig.1.2 c). Pero si en el punto B se observa que la curva se interrumpe, $A_p \approx 0$, esto caracteriza la rotura frágil figura 1.3 d. También es posible el caso intermedio: la rotura al principio es tenaz y después, frágil.

La deformación elástica es una variación de la distancia entre los átomos debido a la acción de la fuerza exteriores. Por esto la tensión es una variación de las distancias interatómicas y puede medirse por métodos radiográficos. Es evidente que si se eliminan las causas que produjeron el desplazamiento de los átomos, estos retornarán a sus posiciones. En otras palabras, la deformación elástica no provoca en el material ninguna consecuencia. Cuanto menor sea la deformación que

produzca la tensión, tanto más rígido será el material. Hay dos tipos de módulos de elasticidad: el módulo normal de elasticidad (o módulo de Young) y el módulo tangencial de elasticidad (o módulo de Hooke). En el primer caso, las fuerzas tienden a separar los átomos unos de otros; en el segundo, a desplazarlos. El módulo de Young (E) es 2,5-3 veces mayor que el de Hooke (G). En particular, para el hierro: $E=2 \cdot 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ y $G=0,8 \cdot 10^4 \text{ kgf/mm}^2$. El valor de los módulos de elasticidad está determinado por las fuerzas de la interacción entre los átomos y es una constante del material. Así por ejemplo el (E) para el aluminio es $0,8 \cdot 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ y para el hierro es $2 \cdot 10^4 \text{ kgf/mm}^2$. El material menos rígido es la goma con $E=0,00007 \cdot 10^4 \text{ kgf/mm}^2$, y el más rígido es el diamante con $E=12 \cdot 10^4 \text{ kgf/mm}^2$. Esta característica mecánica es insensible a la estructura, es decir, el tratamiento térmico u otros procedimientos de variación de la estructura del metal no cambian prácticamente el módulo de elasticidad. Al mismo tiempo, la elevación de la temperatura, que aumenta las distancias interatómicas, hace que disminuya el módulo de elasticidad.

Todas las características mecánicas, menos el módulo de elasticidad son sensibles a la estructura y varían en dependencia del tratamiento dentro de unos límites muy amplios.

El mecanismo del desplazamiento plástico transcurre como se muestra en la figura 1.3, es decir, que todos los átomos de la parte del cristal que se encuentran sobre el plano de desplazamiento AA se desplazan al mismo tiempo por la acción de la fuerza P y pasan sucesivamente de la posición (a) a las posiciones (b y c).

El esfuerzo (σ_{desp}) que hay que aplicar para efectuar este desplazamiento puede calcularse teóricamente por la fórmula del científico J. Frenkel:

$$\sigma_{\text{desp}} = a/b \cdot G/2\pi \quad (1.1)$$

donde: G es el módulo de deslizamiento (Hooke)

(a): es la distancia interatómica en la dirección de deslizamiento (AA en la fig. 1.3)

(b): es la distancia entre los planos.

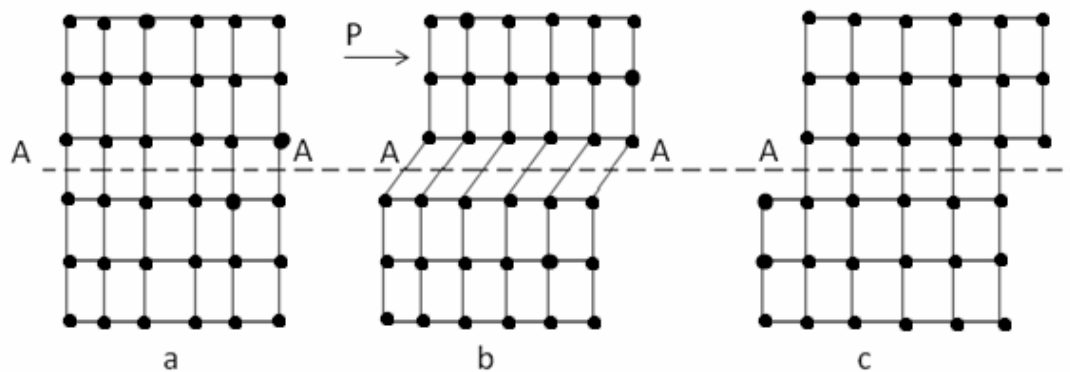


Fig.1.3 Deslizamiento plástico de una red cristalina ideal.

Para las redes metálicas densas, a/b se aproxima a la unidad. De aquí se deduce que el esfuerzo teórico (resistencia teórica) para efectuar el desplazamiento (deformación plástica) es aproximadamente 6 veces menor que el módulo de desplazamiento. Para el hierro el límite teórico de fluencia debe ser igual a $1\,300\text{ kgf/mm}^2$, mientras que en realidad para el hierro blando es igual aproximadamente a 15 kgf/mm^2 ; es decir, casi 100 veces menor.

Esta diferencia es tan considerable que al principio de la ecuación de Frenkel, lo mismo que la idea de la resistencia teórica, se consideraron erróneas. Para explicar esta discrepancia fue elaborada (por Taylor, y al mismo tiempo por Orovan y Polani) la teoría de las dislocaciones.

La teoría de las dislocaciones, que explica la causa de la poca resistencia de los metales reales, consiguió su reconocimiento total cuando se logró obtener cristales sin dislocaciones, llamados cristales filiformes whiskers. La resistencia de estos metales sin dislocaciones se aproxima a la teórica.

Otro mecanismo de deformación plástica es el de las dislocaciones. Este esquema simplificado del proceso de desplazamiento en que toma parte una dislocación se representa en la figura 1.4.

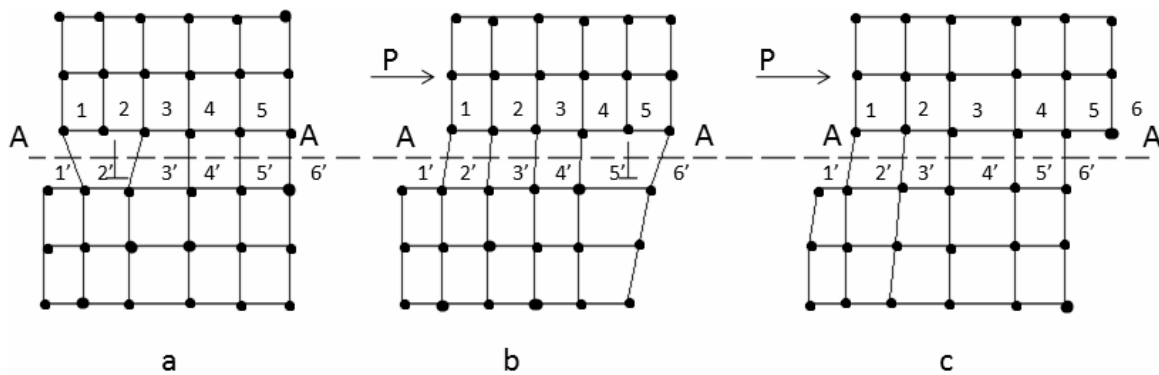


Fig.1.4 Esquema de la dislocación de un desplazamiento plástico.

La dislocación (que se representa por el signo τ), bajo la acción de la fuerza P , se traslada hacia la derecha a consecuencia únicamente de que cambia la vecindad de los átomos por ambos lados del plano AA. En definitiva las dislocaciones salen a la superficie del cristal (límite del grano o del bloque de mosaico) y desaparecen, como se muestra en la figura 1.4 c. El proceso descrito se desarrolla con mucha facilidad, es decir, con una tensión mucho menor que el desplazamiento simultáneo de todos los átomos figura 1.3 y, en realidad, solo así se efectúa la deformación plástica.

Este esquema de la deformación plástica permite llegar a la conclusión de que el proceso de desplazamiento se efectuará en el cristal con una facilidad tanto mayor, cuanto más dislocación haya en el metal. En un metal que no haya dislocaciones, el desplazamiento solo es posible a expensas del desplazamiento simultáneo de todas las partes del cristal. En el caso de que las tensiones no originen dislocaciones, la resistencia del metal sin dislocaciones debe ser igual a la teórica [1].

En concreto, el proceso de deformación lleva al metal a un estado anormal; la energía potencial de sus átomos aumenta y, por tanto, los factores tiempo y temperatura no solo afectarán los fenómenos durante el proceso de deformación, sino los que se producen a consecuencia de la propia deformación. De forma general, durante el proceso de deformación del metal se pueden constatar los aspectos siguientes:

1. La condición de plasticidad del metal exige que la resistencia al deslizamiento de las partículas sea menor que la cohesión.
2. Cuando la carga aplicada ha rebasado el límite elástico del metal, los granos peor orientados empiezan a deformarse por deslizamientos cristalinos.
3. Independientemente de la deformación de los granos por deslizamiento transcristalino, se produce en el metal otra deformación intergranular por deslizamiento de los granos, unos con respecto a los otros.
4. La deformación transcristalina da lugar a una consolidación de los cristales, que aumentan su resistencia a la deformación y engendran acritud en el metal.
5. La consolidación de los cristales que se deforman en primer lugar, obliga a que la deformación se extienda a otros granos mejor orientados, y se generalice la deformación.
6. La deformación reduce la sección que soporta la carga; por tanto, si la resistencia del metal crece con la deformación, por otra parte la carga por unidad aumenta.
7. El ritmo de aumento de la acritud disminuye según avanza la deformación. (Mientras la acritud tenga efecto preponderante, la carga total que puede soportar el material crece con la deformación y esta es uniforme).
8. Cuando el efecto preponderante es el de reducción de sección, la carga total que puede soportar el material decrece con la deformación y esta se localiza dando lugar a la estricción.
9. La deformación produce microfisuras en los cristales, lo que disminuye su cohesión.
10. Cuando la deformación rebasa cierto límite, el efecto de las microfisuras predomina sobre la consolidación, y la cohesión disminuye.
11. Cuando la resistencia al deslizamiento se iguala a la cohesión, el metal se rompe. El esfuerzo que provoca la rotura multiplicado por la sección de rotura corresponde a la carga máxima que puede soportar el material.

1.3 Fatiga. Teoría, conceptos y definiciones

Para el estudio de la incubación y crecimiento de la grieta se utilizan probetas compactas de tracción, según ASTM E 1457-00 Standard test method for measurement of creep crack growth rates in metals [8], en las cuales se varían las cargas mecánicamente desde un valor mínimo distinto de cero hasta un máximo, o sea, básicamente sometiéndolas a ciclos de fatiga.

La fatiga se produce cuando la carga es de magnitud y sentido variables. En este caso la rotura puede producirse paulatinamente a tensiones menores que la tensión de rotura; la superficie sometida a las principales tensiones sufre microdeformaciones y posteriormente en la zona de acritud se forma la grieta que se irá propagando poco a poco. La parte de la sección dañada por la grieta, no soporta cargas, y la sección restante disminuye progresivamente hasta que no puede resistirlas y se ocasiona la rotura de manera instantánea.

Por tanto, la rotura por fatiga se caracteriza por una fractura que consta de dos zonas: la zona de fatiga y la zona de rotura instantánea.

Los ensayos clásicos de fatiga suelen hacerse con una probeta sometida a rotación, lisa o con entalla, a la cual se le aplica una carga que la cimbra constantemente. La carga de tracción-compresión varía sinusoidalmente o siguiendo otra ley. En el caso específico de este trabajo, las cargas se aplican según se describió con anterioridad.

1.4 Generalidades de los ensayos no destructivos

Para acceder al estudio de los fenómenos que aparecen en los metales, el hombre se dio a la tarea de crear métodos y dispositivos con el cual se puedan determinar las características de estos, que se dividen en dos grandes grupos:

Los ensayos destructivos, se mide una determinada característica del material al destruirlo, y a partir de los resultados se puede hacer una caracterización para saber cuál es la mejor utilización que se le debe dar.

Con los ensayos no destructivos no se alteran las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material, lo cual fortalece la posibilidad de ser

aplicados in situ y sin detener los regímenes de explotación donde prestan servicios, lo que tiene una importante connotación económica y social. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo, y los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no ocasione un daño considerable a la muestra examinada.

En general, los ensayos no destructivos proveen de datos menos exactos acerca del estado de la variable para medir que los ensayos destructivos. Sin embargo, suelen ser más baratos para el propietario de la pieza por examinar, pues no implican la destrucción de esta. En ocasiones, los ensayos no destructivos buscan únicamente verificar la homogeneidad y continuidad del material analizado, por lo que se complementan con los datos provenientes de los ensayos destructivos.

Los ensayos no destructivos se han practicado durante muchas décadas. Se tiene registro desde 1868, cuando se comenzó a trabajar con campos magnéticos. Uno de los métodos más utilizados fue la detección de grietas superficiales en ruedas y ejes de ferrocarril. Las piezas eran sumergidas en aceite, y después se limpiaban y se esparcían con polvo. Cuando una grieta estaba presente, el aceite que se había filtrado en la discontinuidad, mojaba el polvo esparcido, indicando que el componente estaba dañado. Esto condujo a formular nuevos aceites que serían empleando específicamente para realizar estas y otras inspecciones [9].

No obstante con el desarrollo de los procesos de producción, la detección de discontinuidades ya no era suficiente. Era necesario también contar con información cuantitativa sobre el tamaño de la discontinuidad, para utilizarla como fuente de información, con el fin de realizar cálculos matemáticos y poder predecir así la vida mecánica de un componente. Estas necesidades condujeron a la aparición de la Evaluación no destructiva (END) como nueva disciplina.

La amplia aplicación de los métodos de ensayos no destructivos (END) se encuentra resumida en los tres grupos siguientes:

- Defectología. Permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales; determinación de tensiones y detección de fugas.
- Caracterización. Evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales; propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas); transferencias de calor y trazado de isotermas.
- Metrología. Control de espesores; medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimiento; niveles de llenado.

Ante todo, es muy importante tener claro lo que queremos conocer o determinar, para luego seleccionar el mejor método de ensayo. La tabla 1.2 muestra las principales aplicaciones de estos métodos.

Tabla 1.2 Aplicaciones fundamentales de los END.

Método	Objetivo	Aplicable a	No aplicable a
RI	Defectos internos	Soldaduras, fundiciones	Fundiciones con espesores mayores a 400 mm
US	Defectos internos	Placas, tuberías, soldaduras, forjados	Materiales con gran atenuación
PM	Defectos superficiales y subsuperficiales	Materiales ferromagnéticos	Materiales no magnéticos y defectos internos
LP	Defectos superficiales	Materiales metálicos y no metálicos	Defectos internos, materiales

			porosos
CI	Defectos superficiales y subsuperficiales	Materiales conductores de geometría simple	Materiales con geometría complicada y defectos internos

1.4.1 Aplicaciones de los ensayos no destructivos

Independientemente de sus aplicaciones básicas descritas en tres grandes grupos con anterioridad, pueden ser aplicados para mejorar las técnicas de manufactura, reducir los costos de producción, aumentar la confiabilidad, evaluación de calidad y de vida. A continuación se detallan cada una de estas aplicaciones [10].

1.4.1.1 Mejoramiento en las técnicas de manufactura

Cuando se requiere hacer un producto con una calidad definida, de antemano se realiza una pieza y/o producto de prueba, usando una técnica de manufactura planificada, a fin de confirmar si esta es la apropiada. A continuación se aplica el END sobre el producto para juzgar si se obtiene la calidad deseada, y si fuera necesario, mejorar la técnica de fabricación. Finalmente, se puede confirmar la técnica de fabricación para obtener el producto con calidad predefinida.

1.4.1.2 Reducción de los costos de producción

Los costos de producción se pueden reducir por los procedimientos siguientes:

- a) Previamente decidimos las condiciones de manufacturación del producto para que tenga una definida calidad.
- b) Aplicamos los END apropiados al producto, cada vez que los procesos de manufactura puedan afectar la calidad de este.

- c) Controlamos el proceso de manufactura para confirmar la calidad del producto.

Con la aplicación de estos procedimientos es posible detectar, en las etapas intermedias del proceso, los errores de manufactura que llevarán a productos no aceptables, y poderlos destacar de con antelación. Se piensa que los END adicionarán más etapas y costos, pero estos últimos serán mayores si tuviéramos que reparar estructuras, pagar por roturas, paradas de producción y accidentes.

También se pueden reducir los costos de producción cuando se reparan estructuras durante el proceso, puesto que la reparación es más sencilla y no interfiere en el proceso de manufactura.

1.4.1.3 Aumento en la confiabilidad

La confiabilidad en los productos industriales usuales se puede considerar como la relación entre el período verdadero, durante el cual el producto ha estado operando y el período esperado durante el cual el producto operará en situaciones satisfactorias y sin ningún problema. La razón por la que no podemos usar el producto sin ningún inconveniente, es debido al diseño, material, manufacturación, la forma de uso de las piezas o componentes, y a desastres que no se puedan anticipar. Se tiene que reducir la probabilidad de que ocurran estos hechos antes mencionados, excepto por desastres.

Podemos usar los END como un buen método para reducir la probabilidad de problemas y son útiles en materiales de productos de acuerdo con normas apropiadas. Si nosotros reconocemos los problemas, podemos reparar, reforzar y/o cambiar los objetos, reduciendo así la posibilidad de rotura de los productos. También se pueden aplicar los END en aparatos y estructuras en servicio o reparado y así como por medio de la examinación de defectos internos y superficiales, evaluar su aptitud durante el servicio. Estos procedimientos llevan a un aumento de la confiabilidad, siempre y cuando los métodos de END sean los apropiados.

1.4.1.4 Evaluación de calidad

La inspección durante la manufactura de materiales, aparatos y estructuras se ejecuta con el fin evaluar la calidad de estos. Ello significa que el objetivo de la es confirmar si los productos están siendo manufacturados según las normas y/o especificaciones, y si satisfacen la calidad requerida. Los END son métodos útiles para alcanzar la calidad basada en un criterio de juzgamiento. El criterio da límites de control para el control de calidad, y debiera estar basado tanto en probadas teorías como en considerar que no habrá roturas accidentales si el producto está en servicio bajo condiciones de diseño.

1.4.1.5 Evaluación de vida

La inspección periódica que se ejecuta en productos en servicios es la que evalúa si la pieza es capaz de ser usada hasta la próxima revisión. Esto se realiza para determinar la vida del producto. El objetivo de la inspección de mantenimiento e inspección de servicios es el mismo que en la inspección periódica. En estas es necesario, determinar con anticipación el tiempo en que una fisura detectada propagará hasta la próxima inspección, considerando las clases, forma, dimensiones, localización de iniciación, magnitudes de tensiones, su dirección, y decidir la necesidad de reparación. La mecánica de factura se usa ampliamente para evaluar la vida del producto.

1.4.2 Tipos de END y características más usuales

En nuestros días los END más usuales son: ensayo visual, ensayo radiográfico, ensayo ultrasónico, ensayo magnético, ensayo con penetrantes, ensayos con corrientes inducidas y la medición de tensiones.

Cada método se basa en un fenómeno físico, y pueden ser clasificados en:

1. Métodos que usan principios de óptica y colores (ensayo visual y ensayo con líquidos penetrantes).
2. Métodos que usan principios de radiación (ensayos radiográficos y ensayos de radiografía computada).

3. Métodos que usan principios electromagnéticos (ensayos magnéticos y ensayos con corriente inducida).
4. Métodos que usan principios acústicos (ensayos ultrasónicos y ensayos de emisión acústica).
5. Métodos que usan principios térmicos (ensayos de termografía).
6. Métodos que usan principios de pérdida (ensayos de pérdida).

Otra clasificación de los END está basada en la localización de defectos:

1. Métodos para obtener información de la superficie o cerca de ella: ensayo visual, ensayo de penetrantes, ensayos magnéticos, ensayo de corrientes inducidas.
2. Métodos para obtener información en el interior de los objetos: ensayo radiográfico y ensayo ultrasónico.

1.4.2.1 Ensayo radiográfico

La radiografía es un método no destructivo para inspeccionar piezas u objetos, en búsqueda de discontinuidades o defectos especialmente internos. El método se basa en la mayor o menor transparencia de los rayos X o Gamma de los materiales, según su naturaleza y espesor. El objetivo es irradiar, la radiación atraviesa el material siendo absorbida parcialmente por él y emerge con distintas intensidades, las que son interceptadas por un film fotográfico. Luego del procesado de la película, se evalúa la imagen y los defectos. En el ensayo radiográfico se usan principalmente los rayos X que son ondas electromagnéticas que poseen casi las mismas propiedades físicas, pero difieren en su origen. Estos rayos X tienen la capacidad de penetrar los objetos, y su penetrabilidad depende del tipo de material, espesor, densidad del objeto, y de la existencia de defectos en la pieza.

El ensayo radiográfico es el método para examinar defectos y se basa en el cambio en la intensidad de los rayos X emergentes de la pieza usando como medio de registro un film o un sistema de TV de rayos X. La figura 1.5 muestra el esquema de un ensayo radiográfico.

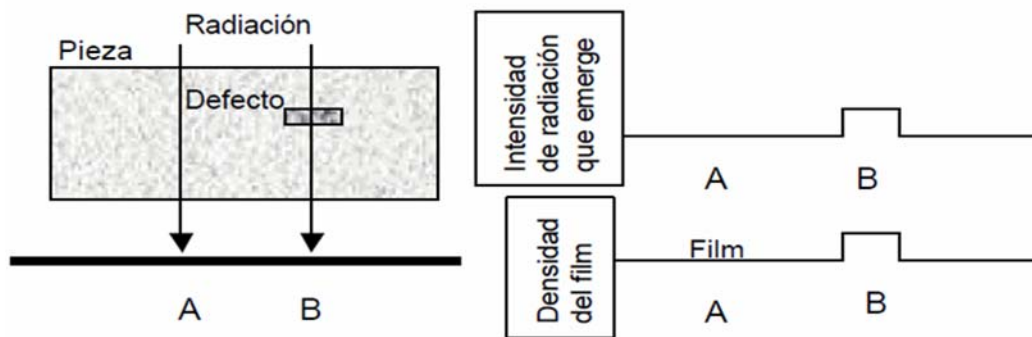


Fig. 1.5 Representación esquemática de un ensayo radiográfico.

$$I_A = I_0 \cdot e^{-\mu T}$$

$$I_B = I_0 \cdot e^{-\mu (T - \Delta T)}$$

$$I_A < I_B$$

donde:

I : Intensidad de radiación (I_A e I_B emergentes en A y B, respectivamente; I_0 : incidente).

μ : Coeficiente de absorción

T : espesor de la pieza

ΔT : Espesor del defecto

El coeficiente de absorción disminuye con la energía de los rayos X y se incrementa con el número de átomos del material del objeto, por lo que se deberá aumentar la energía del tubo a medida que los espesores de la pieza aumenten o los materiales sean más absorbentes. Otro factor importante en el ensayo radiográfico es la dispersión RX. La dispersión depende del voltaje del tubo. Cuando este es alto la

diferencia entre la dirección de los RX dispersados con respecto a los incidentes disminuye con el voltaje del tubo.

En el ensayo radiográfico se debe obtener un film con alta calidad de imagen. Esto se controla radiografiando la pieza con un indicador de calidad de imagen (ICI), como una medida de calidad radiográfica. Un tipo de ICI tiene 7 hilos de diferentes diámetros que cambian en proporción geométrica. La sensibilidad del ICI se obtiene dividiendo el diámetro del alambre visible más pequeño con respecto al espesor del objeto.

En un ensayo radiográfico se puede obtener en la película la proyección del defecto y así evaluar el tipo y dimensiones de este. El ensayo radiográfico tiene la capacidad de detectar defectos tridimensionales que tengan un volumen superior al 3 % respecto al espesor del objeto, en la dirección de los rayos incidentes. En el caso de la fisuras, que son el tipo de defectos más perjudicial para un producto, es posible detectarlas si están ubicadas aproximadamente paralela a la dirección de los rayos incidentes, pero se vuelve dificultoso si la fisura presentan más de 15° en la dirección de los rayos incidentes.

1.4.2.2 Ensayos de partículas magnéticas

Los materiales magnéticos desarrollan, cuando son magnetizados, un flujo magnético mucho mayor que los materiales no magnéticos. Si existe un defecto cerca de la superficie se produce un escape de ese flujo, llamado campo de fuga, en el espacio cercano a la superficie de la pieza, como se muestra en la figura 1.6. Así, este método puede localizar defectos superficiales y/o subsuperficiales por la detección del campo de fuga. Para visualizar los campos de fuga se utilizan comúnmente partículas magnetizables y en algunos casos sensores magnéticos tales como un generador de efecto Hall o cintas magnéticas. El campo de fuga que produce los defectos depende de la orientación de magnetización de la pieza y de las dimensiones del defecto.

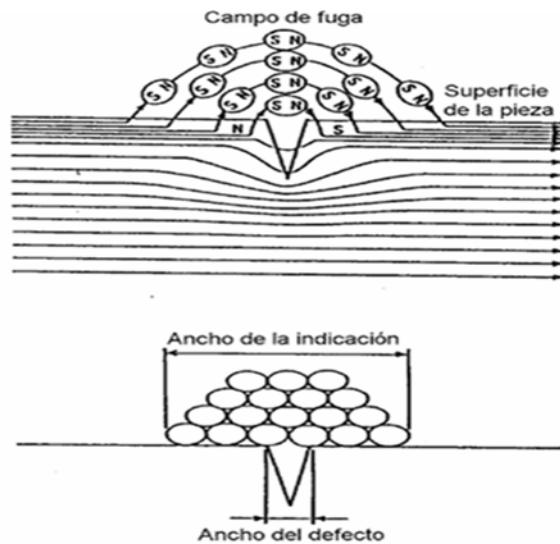


Fig. 1.6 Espacio cercano a la superficie de la pieza.

El ensayo por partículas magnéticas es el método más útil de inspección para determinar si hay defectos superficiales y/o subsuperficiales en el objeto. Es posible detectar con bastante seguridad discontinuidades en un mm de longitud, por lo que ha sido ampliamente utilizado en aceros. Desafortunadamente, no es posible estimar la profundidad de las indicaciones que es la información más importante cuando se quiere evaluar la vida del producto. Se puede obtener información cuantitativa usando ensayos de escape del campo magnético, pero esta aplicación está confinada a piezas de geometría simple.

1.4.2.3 Ensayo de líquido penetrante

En el ensayo por líquido penetrante (LP) las indicaciones se magnifican debido a la capacidad de absorción del revelador (pequeñas partículas que se aplican sobre la superficie de la pieza) que actúa sobre el penetrante que ha quedado retenido en las discontinuidades y lo extrae a la superficie.

Las 5 etapas siguientes que se ejecutan en el ensayo por LP:

1. Limpieza inicial: Se remueve la suciedad de la superficie de la pieza y del interior de los defectos.

2. Penetración: Se aplica un penetrante (líquido con alta capilaridad) sobre la pieza a ser examinada y se le deja penetrar dentro de los defectos.
3. Limpieza intermedia: Se remueve el exceso de penetrante de la superficie de la pieza.
4. Revelado: Se aplica un revelado blanco a la superficie de la pieza, que extrae el penetrante de los defectos.
5. Observación: Se observan las indicaciones de los defectos bajo la luz natural en el caso de los penetrantes coloreados o usando luz negra en caso de los penetrantes fluorescentes.

La figura 1.7 muestra un ejemplo de la detección de un defecto abierto a la superficie.

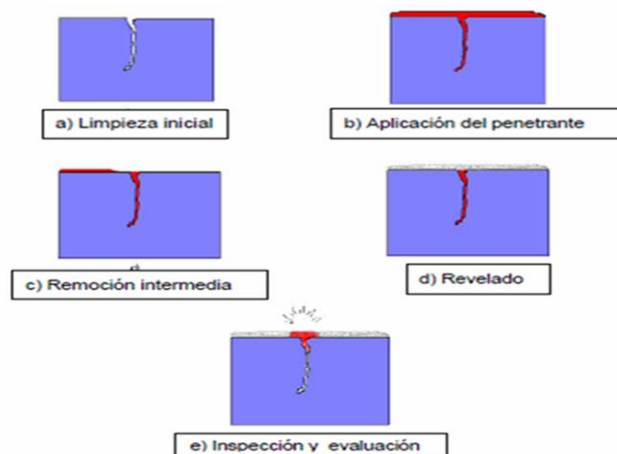


Fig. 1.7 Etapas en un ensayo con LP.

El ensayo por LP solo detecta discontinuidades abiertas a la superficie. La detección de un defecto con esta técnica es algo inferior a la del ensayo por partículas magnetizables. El ensayo por LP puede ser aplicado en cualquier tipo de material, metálicos o no metálicos, salvo en aquellos materiales porosos o con alta rugosidad. El tamaño mínimo de un defecto detectable es aproximadamente de 1 mm de longitud, 20 μm y 1 μm de ancho en dependencia de la técnica y la calidad de los productos utilizados.

1.4.2.4 Ensayo de corriente inducida

Como se muestra en la figura 1.8, en el interior de una bobina por la que circula una corriente alterna se producirá un campo magnético alterno. Si colocamos la bobina cerca de un metal plano se inducirá una corriente dentro de la placa metálica, que tenderá a contrarrestar al campo magnético de la bobina.

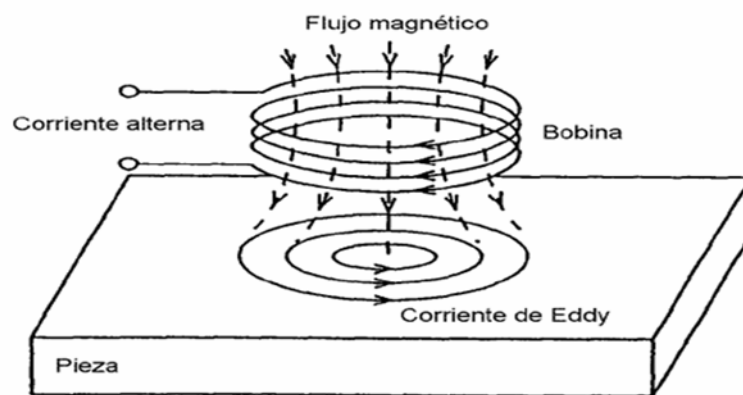


Fig.1.8 Bobina por la que circula una corriente alterna.

La distribución y magnitud de la corriente inducida dependen de la frecuencia de la corriente alterna, conductibilidad y permeabilidad de la pieza, geometría y dimensiones del espécimen, y existencia de defecto. Así, se puede obtener información de la calidad del material, y determinar si hay algún defecto como también su geometría y sus dimensiones.

En el ensayo por corriente inducida la velocidad de ensayo es alta, debido a que podemos ejecutar el ensayo sin tocar la pieza y directamente obtener los resultados como salida eléctrica. Este método es apropiado para detectar defectos sobre y cercanos a la superficie del objeto en geometría simple, tales como cables, barras y tuberías. Es posible también medir el espesor de una película no conductora sobre el metal, y el espesor de películas metálicas no magnéticas en materiales ferromagnéticos.

1.4.2.5 Ensayo ultrasónico

Se puede usualmente escuchar el sonido entre 20 y 20,000 Hz, y se llaman ondas ultrasónicas a aquellas que tienen mayor frecuencia. Las ondas ultrasónicas presentan la propiedad de propagarse en la pieza y ser reflejadas parcial o totalmente por un reflector. Así se puede detectar no destructivamente discontinuidades por medio de este ensayo. Por lo común las ondas ultrasónicas utilizadas tienen frecuencia entre 0,5 y 25 MHz, y pueden detectar discontinuidades con un tamaño mayor a la mitad de la longitud de onda [11]. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, por lo que es posible detectar defectos más pequeños si se usan las ondas ultrasónicas de mayor frecuencia.

$$\lambda = C/f \quad (1.1)$$

λ : longitud de onda

C velocidad de la luz;

f: frecuencia.

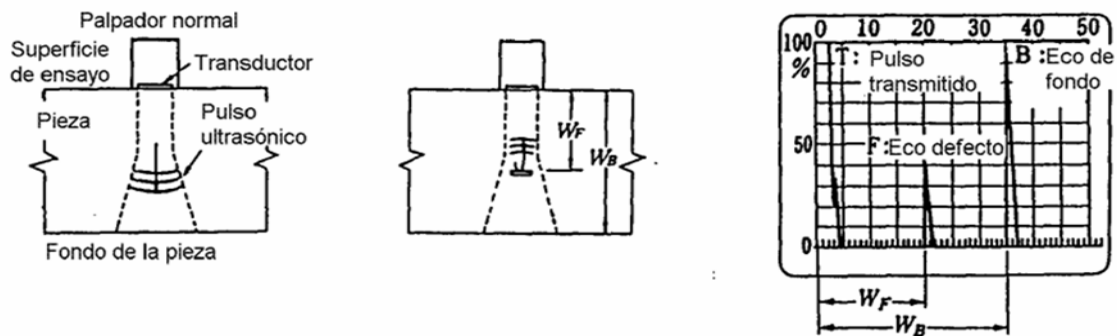


Fig. 1.9 Características esquemáticas de un ensayo ultrasónico.

Un pulso de voltaje generado en el controlador ultrasónico se aplica al palpador, el que produce un pulso de onda ultrasónica que se propaga en el objeto. La parte de la onda que se refleja vuelve al palpador y es mostrada en un TRC (Tubo de Rayo Catódico) como un eco. Se evalúa el defecto por la localización y la amplitud del eco.

Se usan bloques de calibración y/o de referencia para calibrar el equipo y la sensibilidad de trabajo.

Dado que la transmisibilidad de onda ultrasónica es buena cuando el tamaño de los granos cristalinos del metal en ensayo es pequeño, es posible aplicar ultrasonido (US) para detectar pequeños defectos en forjados de algunos metros de diámetro. Cuando el tamaño de grano es más grande, la onda ultrasónica es dispersada por los bordes de granos y así atenuada. En algunos casos, debido a que las ondas dispersas producen ecos de fondo, no es posible la detección. En buenas condiciones se puede determinar defectos cercanos a la longitud de onda; por ejemplo, de 1,5 mm (aproximado 3 mm la longitud) cuando se usan frecuencias de 2 MHz en aceros.

La detección de un defecto depende mayormente de su forma y orientación. Esto significa que puede obtenerse un eco de gran amplitud cuando la onda incide en un defecto plano y en forma perpendicular a la superficie. Por el contrario, se obtienen ecos pequeños cuando el defecto es esférico, tal como un blowhole, debido a que la onda ultrasónica es dispersada por su superficie en muchas direcciones.

Las condiciones de contacto entre el palpador y la superficie de la pieza de ensayo, la rugosidad de la superficie y el acoplante afectan también la amplitud del eco, y esto constituye uno de los puntos más débiles del ensayo ultrasónico. El US es usado principalmente para detectar defectos internos, pero los principios son diferentes a los de los ensayos radiográficos. Sin embargo, la determinación de qué tipo de defecto se está observando depende de la habilidad y experiencia del operador.

1.5 Ruido magnético de Barkhausen

Independientemente de las técnicas de ensayos no destructivos analizadas con anterioridad, existen otras técnicas de caracterización magnética como el ruido

magnético de Barkhausen (RMB) con el cual se puede obtener información, más allá de lo que un ensayo no destructivo común puede brindar.

En su teoría sobre el ferromagnetismo, Weiss & Foey [12] propusieron la existencia de un fuerte campo molecular entre los dipolos magnéticos de los materiales ferromagnéticos. Con posterioridad, se demostró [13] que el cambio de la magnetización se producía de manera discreta, mientras que Landau y Lifshitz [14] postularon que el material ferromagnético está dividido en pequeñas regiones llamadas dominios magnéticos, en los cuales los momentos magnéticos están orientados en la misma dirección. Pero los momentos magnéticos de los dominios se orientaban aleatoriamente y, como resultado, la magnetización total resultaba cero cuando no hay campo magnético aplicado; estos dominios están separados por una región de transición llamada pared de dominio (PD) [15].

Cuando se aplica un campo magnético, la estructura de dominios se modifica para minimizar la energía total del sistema. Se ha demostrado que uno de los efectos fundamentales es el desplazamiento de las PD con el aumento de la intensidad del campo magnético [16].

1.5.1 Espectroscopia y medición del RMB

El proceso de medición del RMB en una muestra ferromagnética consta de dos partes fundamentales: la primera es la magnetización de la muestra mediante un campo magnético de intensidad variable aplicado sobre ésta y conocido también como excitación del RMB, y la segunda es la medición de la variación del flujo magnético en la muestra.

Para llevar a cabo la excitación del RMB, en la literatura se reportan dos tipos fundamentales de esquemas de magnetización: uno que utiliza electroimanes con núcleos en forma de “U”, en los que la región del campo utilizable queda entre los polos del núcleo y la otra variante es con el empleo de solenoides [17]. El primer esquema es el preferido porque facilita la aplicación en un gran número de muestras con diversas formas y tamaños.

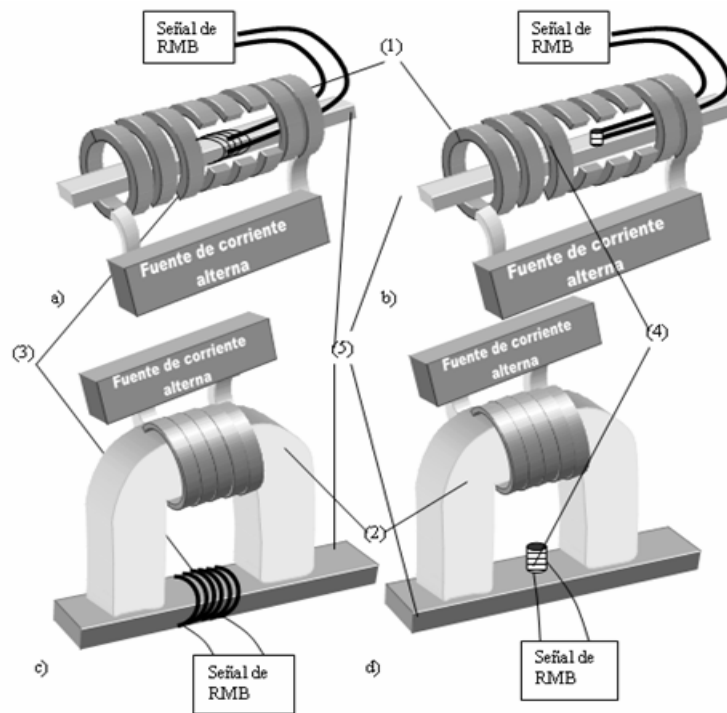


Fig. 1.10 Esquemas de las configuraciones más usadas del sistema de excitación-medición del RMB.

La medición de la variación del flujo magnético en la muestra se basa en la ley de Faraday de la inducción electromagnética. De acuerdo con esta ley, la variación del flujo magnético en el tiempo en el interior de la bobina genera una fem inducida:

$$\varepsilon = -N d\phi / dt. \quad (1.2)$$

Donde ε es la fem inducida, ϕ el flujo magnético en el interior de la bobina y N el número de espiras de la bobina. Esta puede estar colocada alrededor de la muestra, o estar cerca de su superficie para medir la componente tangencial o la componente normal de la velocidad de cambio de flujo $d\phi/dt$ [18].

Los componentes necesarios para la excitación y la medición del RMB usualmente se unen en una pieza (sistema de excitación-medición). La figura 1.10 muestra los esquemas de las configuraciones más usadas del sistema excitación-medición del RMB: el inciso a) muestra la magnetización con bobina y medición con bobina

enrollada en la probeta; el b), una bobina magnetizadora y medición con cabezal; el c), la magnetización con núcleo en “U” y medición con bobina enrollada en la probeta, y el d), la magnetización con núcleo en “U” y medición usando cabezal. Con números consecutivos del 1 al 5 se indican la bobina de magnetización, el núcleo ferromagnético, la bobina de medición, el cabezal de medición y la muestra, respectivamente. El esquema d) es el más empleado de acuerdo con la literatura [19]. Reportes estadísticos demuestran que el 90 % de las instalaciones Barkhausen utilizan sistemas de captación de cabezales ferríticos tipo pick up coil, el otro 10 % corresponde a sistemas de bobinas enrolladas en la muestra. El cabezal magnético es fijado al núcleo ferromagnético mediante una sustancia fijadora y aislante, como la silicona. La fuente de corriente alterna normalmente está compuesta por una fuente bipolar a la cual se conecta un generador de ondas.

La técnica del RMB no es tecnológicamente complicada, la mayor dificultad radica sobre todo en la interpretación de la señal del RMB medida, lo cual se debe a la gran cantidad de defectos microestructurales que influyen en ella [20]. Sin embargo, hay elementos que es necesario tomar en cuenta para lograr la reproducción necesaria que permita llegar a conclusiones consistentes. Uno de estos elementos es mantener siempre la misma posición entre el excitador y el sensor de medición. Para ello, el procedimiento más empleado es utilizar un sistema excitación-medición como el mostrado en la figura 1.10 d), en el cual el sensor está fijo en la posición centro-inferior del excitador.

1.5.2 Magnitudes fundamentales del RMB

Existen tres magnitudes físicas básicas que permiten describir una señal Barkhausen: el tiempo de duración, el área y la energía de un salto del RMB. La figura 1.11 muestra los parámetros básicos de un salto del RMB.

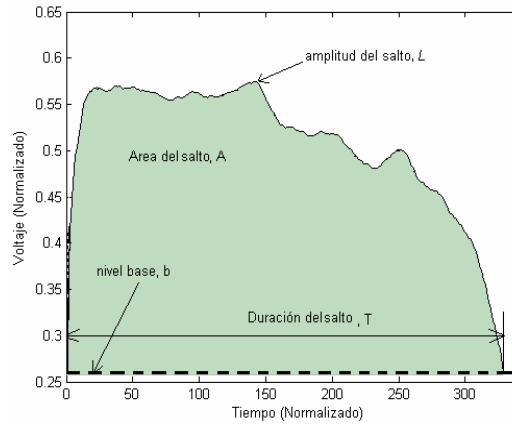


Fig. 1.11 Parámetros básicos de un salto del RMB.

Para definir estas magnitudes se denota la señal del RMB por $F(t)$ como una función del tiempo t con las características siguientes:

1. La duración del salto del RMB está dada por el intervalo de tiempo entre el primer instante de tiempo t_1 , en el cual la señal alcanza determinado nivel (nivel base), y el instante de tiempo cuando la señal vuelve a tomar este valor, t_2 . La duración se da en unidades de $\tau = 1/f_s$, donde f_s es la frecuencia de muestreo.
2. El área del salto es la definida entre la señal y el nivel base b (casi siempre se toma el nivel de ruido de fondo), entonces el área puede ser escrita como:

$$A = \int [F(t) - b] dt \quad (1.3)$$

la cual es proporcional a la ordenada de la forma discreta de la función $F(t) - b$. Físicamente, el área del salto es proporcional al cambio de la magnetización ocurrido en la muestra durante un salto del RMB.

3. Por último, la energía del salto E_n es proporcional a la integral:

$$E_n \propto \int [F(t) - b]^2 dt \quad (1.4)$$

A partir de estas magnitudes se definen otras más complejas, como son:

las funciones de distribución del número de saltos con duración T, área A o energía E_n : $P(T)$, $P(A)$ y $P(E_n)$ en correspondencia con las tres magnitudes definidas con posterioridad, la raíz cuadrada media de la señal y la amplitud máxima de la señal, también conocida como el máximo voltaje de pico (V_{rms} y MVP, respectivamente), las cuales se definen de la forma siguiente:

$$V_{rms} = \sqrt{\left(\left(\sum_i V_i^2 \right) / n \right)} \quad (1.5)$$

$$MVP = \max |V_i| \quad (1.6)$$

donde V_i es el máximo de cada salto de la señal y n es la cantidad de saltos del RMB. El V_{rms} caracteriza lo que se suele denominar como “actividad de Barkhausen”. Si el V_{rms} es alto, entonces la actividad de Barkhausen es alta.

Otra magnitud que se usa para estudiar la contribución de las diferentes frecuencias de la señal a la energía de la señal del RMB es la densidad espectral, DE, la cual se da por la expresión:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j\pi f\tau} d\tau \quad (1.7)$$

donde $R(\tau)$ es la función de autocorrelación temporal de la señal del RMB.

El análisis de la envolvente de la señal del RMB es otro aspecto que aporta mucha información sobre el comportamiento temporal del RMB. La figura 1.12 muestra la parte positiva de una señal del RMB del acero 12Cr1MoV y su envolvente correspondiente.

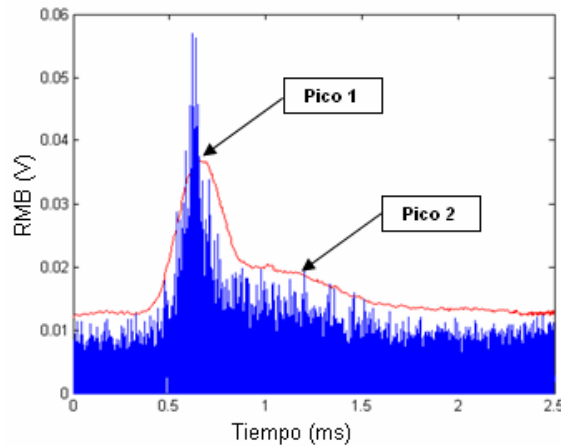


Fig. 1.12 Ejemplo de la parte positiva de una señal del RMB y su envolvente correspondiente.

En el caso de estas dos últimas magnitudes (la densidad espectral y la envolvente), muchos software profesionales contienen funciones que permiten obtenerlas de manera rápida.

En ciertos casos es común encontrarse en la envolvente más de un pico, los cuales pueden estar más o menos definidos en función de las características microestructurales del material analizado y de las peculiaridades del sistema de medición. Estos picos se suelen atribuir a las contribuciones de sitios de anclaje de distinta naturaleza.

1.5.3 Efectos de la deformación plástica en el RMB

Las dislocaciones en la estructura cristalina se producen, en lo fundamental, por la deformación plástica. Estas dislocaciones interactúan con las paredes de los dominios. Al mismo tiempo, estas interactúan con otras dislocaciones cuando son numerosas, formando complejas redes o entramado de dislocaciones.

La interacción entre una pared de dominio y las dislocaciones se produce mayormente debido a las tensiones locales que generan estas dislocaciones. Esta interacción depende del tipo de PD. Las PD tipo II o de 180° son aquellas que separan dominios cuyas magnetizaciones son antiparalelas una con relación a la

otra. En este caso, a causa de que la tensión por magnetostricción es independiente del sentido de la magnetización, no existe diferencia en la tensión de un dominio con respecto a otro. Para otros ángulos entre los dominios, el movimiento de las PD provocará el cambio en la energía local en virtud de las tensiones. Las PD de este tipo son conocidas como paredes de Tipo-I. Esta es la causa por la cual las paredes de Tipo-I interactúan más con los campos de tensión en el material que las paredes de Tipo-II. El estado de tensiones locales determinará tanto la posición como la energía de la pared Tipo-I, pero la posición de la pared Tipo-II permanecerá sin cambios. Las interacciones de largo alcance de las paredes de Tipo-I con el campo de tensiones las hace menos móviles y, por tanto, se requiere un campo magnético mayor para su movimiento. Como resultado de esto, el cambio de la magnetización para campos magnéticos bajos ocurre sobre todo debido al movimiento de paredes de Tipo-II.

La influencia de las deformaciones plásticas en la señal de RMB ha sido uno de los aspectos del RMB más estudiados en los últimos dos años. Estos análisis han demostrado que con el incremento de la deformación plástica uniaxial, la señal de RMB en general disminuye. Se ha encontrado una disminución en la amplitud de la envolvente y un ensanchamiento del pico de la envolvente. No obstante, todavía existen muchos aspectos por investigar sobre la influencia de la deformación en el RMB, como la diferencia de deformación con la profundidad de las muestras, la influencia de los entramados de dislocaciones en la dinámica de las paredes, la forma de la envolvente de RMB para pequeños valores de deformación, la dependencia angular de RMB con la deformación, etcétera.

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO 1

Una vez desarrollado el presente capítulo, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

1. La composición química y las propiedades mecánicas del acero 12CrMoV lo convierte en uno de los de mayor aplicación en la industria termoenergética para el uso y transporte del vapor.
2. Durante la explotación de materiales termoenergéticos sometidos a la acción de elevadas cargas y temperaturas se producen grietas y microgrietas las cuales se propagan debido a campos de deformación plástica en el frente de la grieta.
3. Para la detección y seguimiento de grietas, ya sean superficiales o internas, se pueden emplear, en lo fundamental, métodos radiográficos, partículas magnéticas, líquido penetrante y/o el método de corriente inducida.
4. El ruido magnético Barkhausen independientemente de ser un método de caracterización de materiales, pueden ser empleado (por su sensibilidad y posibilidad de ser aplicado in situ) para la detección y seguimiento de grietas.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo detallar los materiales y métodos seguidos para el desarrollo de cada una de las etapas experimentales del trabajo.

Para una mejor comprensión de la estructura del mismo, en la figura 2.1 se muestra un diagrama en bloques con la secuencia de los pasos a seguir para desarrollar un método magnético no destructivo, con el propósito de detectar y darle seguimiento a grietas logradas por fatiga, en probetas compactas a tracción.

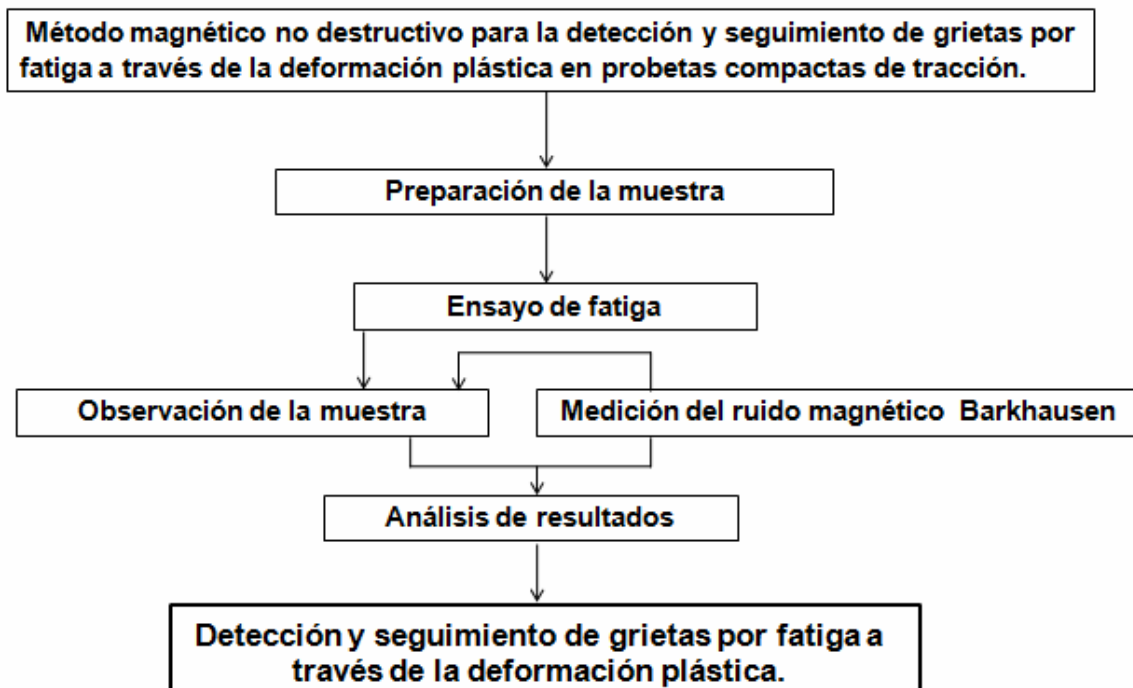


Fig. 2.1 Secuencia para el desarrollo de método magnético no destructivo para detectar y seguir grietas por fatiga a través de la deformación plástica en probetas compactas a tracción.

2.1 Preparación de la muestra

La probeta empleada, es del tipo compacta de tracción (PCT). Sus dimensiones dependen de W , que según la norma ASTM E1457-00 es la longitud entre el centro de los agujeros y el borde posterior de la muestra figura 2.2, que dependa de las características geométricas del horno para llevar a cabo los ensayos de velocidad de propagación de grietas.

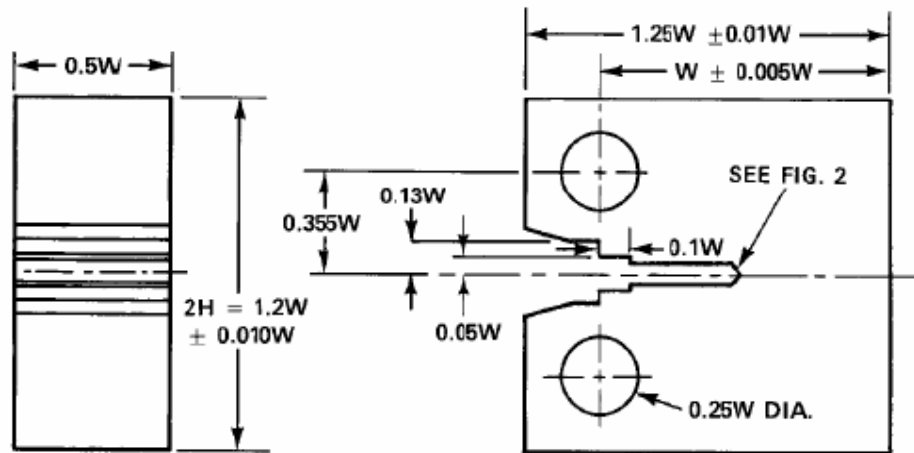


Fig. 2.2 Probeta compacta de tracción según ASTM-E 1457-00.

Para su fabricación se utiliza acero 12Cr1MoV, que es empleado en la industria termoenergética para el transporte de vapor sobrecalentado; la composición química y propiedades mecánicas de este material se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química del acero 12Cr1MoV en (%) y sus propiedades mecánicas.

Composición química							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,12	0,23	0,54	< 0,015	< 0,019	1,1	0,26	0,17
Propiedades mecánicas							
R_t (Mpa)	$R_{0,2}$ (Mpa)		$\sqrt{}$ (%)		Ψ (%)		
≥ 450	≥ 280		45		20		

Asumiendo $W=17.5$ mm, las dimensiones de la muestra quedan como muestra la figura. 2.3.

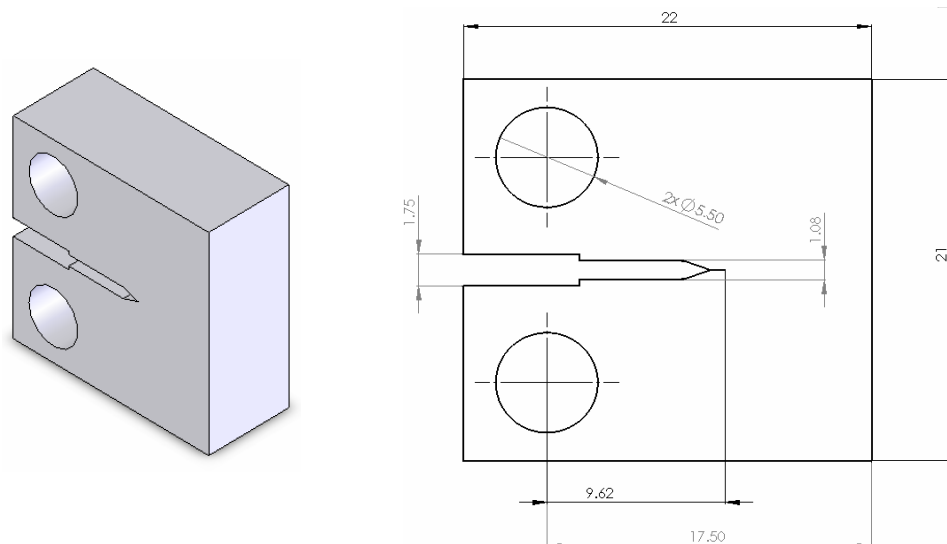


Fig. 2.3 Plano isométrico y dimensiones de la PCT para el ensayo de velocidad de propagación de grietas.

Para la realización de la probeta intervinieron varios procesos tecnológicos, a continuación se da paso a mencionar las acciones realizadas: primeramente se seleccionó el material en bruto (12Cr1MoV), luego se utilizó la fresadora universal Rechermann con una fresa de vástago para desbastar las superficies y llevarlo a las dimensiones requeridas, con posterioridad, usando una fresa de disco, se realizó la ranura de la entalla hasta la profundidad la cual no incluye el vértice de la grieta.

Se preparó una cuchilla de forma con las dimensiones del vértice de la pregrieta, para elaborar por copiado el mismo.

2.2 Ensayo de fatiga

Para la aplicación de las cargas cíclicas se emplea un dispositivo que se adapta a la máquina universal de fatiga por impacto mostrada en la figura 2.4, las numerosas combinaciones de ensayos que se hacen en dicha máquina permiten construir el diagrama de Woehler en función de las propiedades mecánicas del material y su comportamiento a fatiga.



Fig. 2.4 Máquina universal de fatiga por impacto.

Esta máquina posee una biela con rodillos mediante los cuales se regula la carga que ofrece la máquina para la realización de los ensayos de fatiga por impacto y controlando la altura o el recorrido que va a tener el martillo se varía la fuerza que el martillo ejerce sobre la probeta y viceversa.

En investigaciones anteriores se han llevado a cabo modificaciones del diseño en la cual se ha sustituido el martillo de impacto por un mecanismo pistón-biela-manivela que acoplado a un muelle pueda brindar cargas cíclicas desde un valor mínimo hasta un máximo, a un dispositivo que fija la probeta compacta de tracción.

Durante la adaptación del dispositivo a la máquina se tuvo en cuenta desde su geometría hasta su régimen de trabajo. En la figura 2.5 se muestra una imagen isométrica del diseño general del dispositivo.

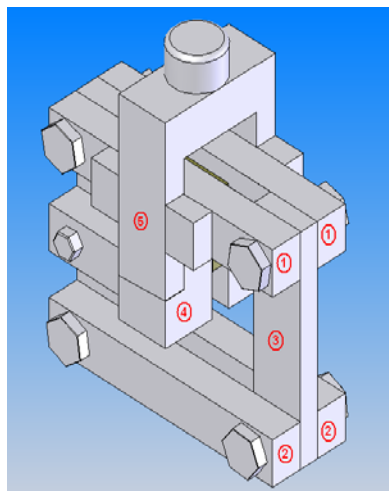


Fig. 2.5 Dispositivo para el preagrietamiento de probetas compactas de tracción.

El dispositivo diseñado cuenta con dos barras superiores para el soporte de la probeta (1), dos barras para el soporte con la base (2), dos barras de unión (3), así como los aplicadores de carga, constituidos por dos barras de tracción (4) y el elemento de unión con la máquina universal de fatiga por impacto (5); la probeta se fija en las barras superiores (1) y se tracciona por medio de las barras de tracción (4). El valor de la fuerza máxima de preagrietamiento corresponde a 150 kgf; no obstante, solamente se empleó este valor hasta el momento en que surge la grieta, disminuyendo entonces la carga a un valor de 120 kgf, para tener un mejor control del crecimiento de la misma y evitar la presencia de deformaciones plásticas por el frente de la grieta.

Por tal razón, se realizó un análisis de cargas dinámicas de la máquina, con el cual se determinó que el desplazamiento del elemento de transferencia de carga debe ser 13,5 mm y 10,8 mm para las cargas de 150 kgf y 120 kgf, respectivamente, en función de la constante elástica del muelle empleado. El dispositivo final construido se muestra en la figura 2.6.



Fig. 2.6 Mecanismo adaptado a la máquina universal de fatiga por impacto.

2.3 Observación de la muestra

Posterior al ensayo de fatiga se requiere una preparación minuciosa de las superficies de la muestra compacta a tracción para controlar el exacto crecimiento

de la muestra, empujando el equipamiento disponible en el laboratorio de metalografía de la Universidad de Oriente.

2.3.1 Desbaste

El desbaste se realiza de forma mecánica con una devastadora METASINEX, de procedencia de RDA, empleando papeles abrasivos con granulometrías desde 220 hasta 1 200, cambiando el sentido de pulido 90° y lavando con abundante agua durante los procesos de intercambio de papeles abrasivos para eliminar los restos de material excedentes. En la figura 2.7 se muestra la desbastadora empleada.



Fig. 2.7 Desbastadora METASINEX.

2.3.2 Pulido

El pulido se realiza de forma manual, empleando para ello óxido de cromo hasta dejar la zona a observar pulida en forma espejo.

2.3.3 Observaciones

Para la observación metalográfica se utiliza un microscopio óptico marca NOVEL, modelo NJF – 120 A, de procedencia china con fecha de fabricación 2007 acoplado con una video cámara de captura de imagen, modelo VCE INTSC 358, utilizándose combinaciones de objetivo y ocular de 10 y 40 x, con la cual se obtienen aumentos de 100 y 400x respectivamente.



Fig. 2.8. Microscópio óptico marca NOVEL.

Para La medición del crecimiento de la grieta se calibra la escala del ocular con el milímetro internacional de forma tal que se pueda cuantificar cada división del ocular longitudinalmente, las relaciones empleadas se muestran en La tabla 2.2.

Tabla 2.2 Correspondencia entre la apreciación del ocular y la apreciación del milímetro internacional.

Aumento	Número de divisiones de la escala del ocular	Equivalencia longitudinal (mm)	Apreciación de la escala del ocular (U)
100x	100	1	0,01
400x	20	0.05	0,0025

2.4 Medición de ruido magnético Barkhausen

En la figura 2.9 se muestra la instalación experimental utilizada para desarrollar las mediciones de los parámetros del ruido magnético Barkhausen. Esta emplea una computadora que proporciona ondas sinusoidales de 10 Hz, las cuales son amplificadas por una fuente bipolar que alimenta un circuito con un yoke magnético que magnetiza la muestra. Las emisiones magnéticas de Barkhausen son detectadas con una bobina de 10 mm de diámetro y 1 200 vueltas de alambre de cobre, calibre 44, la cual presenta una sensibilidad de 10 mV. Posteriormente se

amplifica la señal y se filtra con un Buttherworth de 4to orden con una banda de frecuencia de entre 2-150 kHz. Concluido este proceso, se visualizan con ayuda de un osciloscopio digital y se capturan empleando una tarjeta de adquisición de datos con frecuencia de muestreo de 300 MHz.

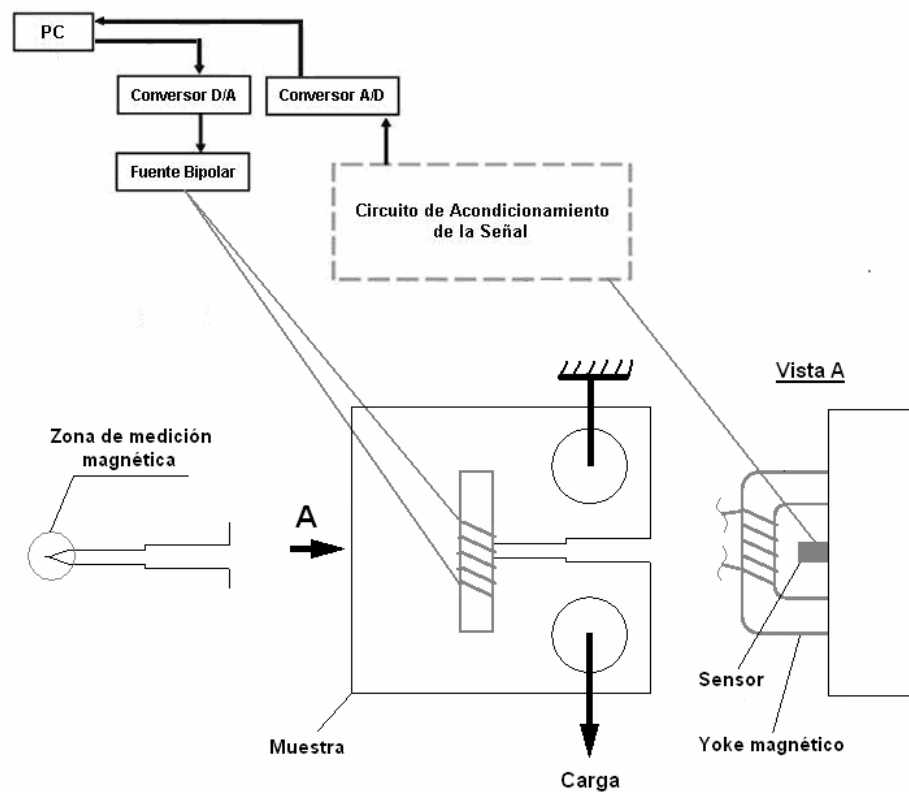


Fig. 2.9: Configuración esquemática del sistema de medición del RMB empleado.

En el 90 % de las instalaciones para el desarrollo de mediciones Barkhausen emplean cabezales magnéticos ferríticos tipos pick up coil y el otro 10 % emplean bobinas arrolladas a la muestra, con la adaptación de un cabezal ferrítico de reproductoras magnéticas profesionales, tiene ventajas significativas con respecto a los dos sistemas mencionados.



Fig. 2.10 Dispositivo excitación-medición del RMB.

El dispositivo cuenta con una base (1), sistemas de sujeción de muestras y expansores polares (2 y 2'), cabezal magnético (3), núcleo magnético (4) y sistema de corrección de ángulo zenit y azimut (5).

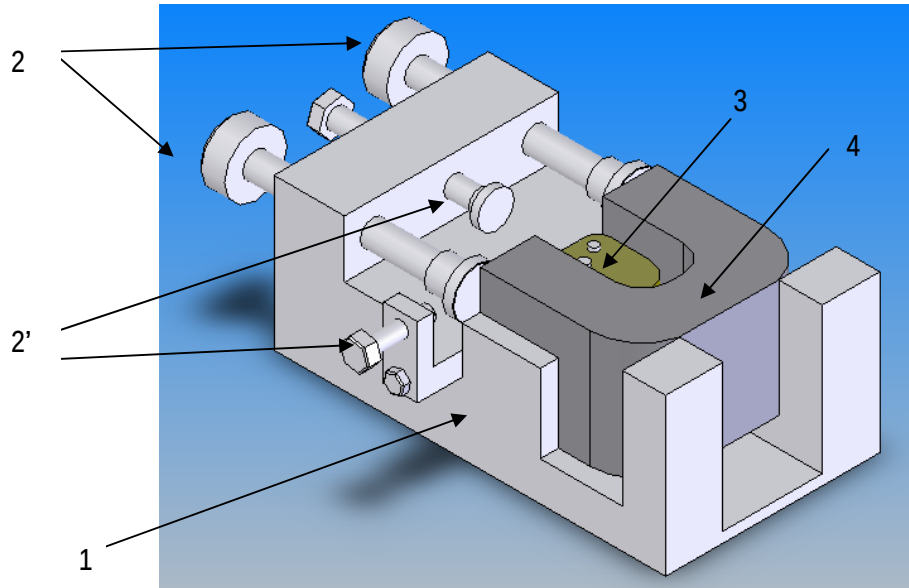


Fig. 2.11 Esquema general del dispositivo para la medición del RMB.

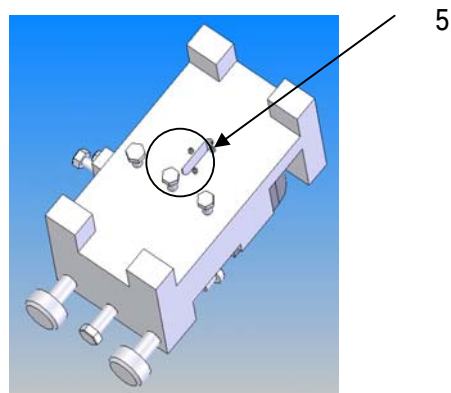


Fig. 2.12 Esquema general del dispositivo para la medición del RMB.

El dispositivo fue diseñado para una amplia gama de muestras, con diferentes tamaños y formas geométricas, entre las cuales se pueden citar: las de tracción previamente deformadas para el análisis de la influencia de las deformaciones plásticas y estado tensional en el RMB; probetas rectangulares para el estudio de las

deformaciones por flexión y el RMB; probetas de dimensiones pequeñas para estudio de la correlación entre RMB y microestructura, etcétera.

Para lograr el análisis de una amplia gama de muestras en el dispositivo, se adaptaron expansores polares contruïdos a partir de núcleos laminados del mismo material del núcleo magnético y, por tanto, con similares valores de frecuencia, los cuales son acoplados empleando entonces el sistema de sujeción de las muestras de mayor longitud y los sistemas de sujeción 2' que garantizan la sujeción entre los sistemas expansores polares-muestra y muestra-cabezal magnético.

Para el estudio del RMB en el desarrollo de este trabajo, se emplearon las muestras que se exponen en la figura 2.13.

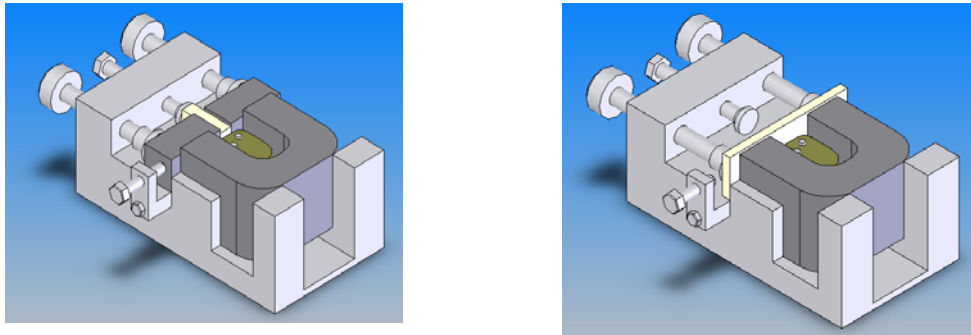


Fig. 2.13 Análisis de muestras con diferentes tamaños y geometrías en el dispositivo diseñado.

En el caso que nos ocupa, se emplea el dispositivo para evaluar el crecimiento de grietas por fatiga a través de la deformación plástica, el mismo se muestra en las figuras 2.14 a y b.



Fig. 2.14 a) Esquema general de medición del RMB.

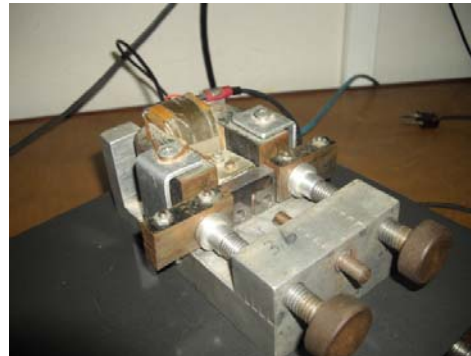


Fig. 2.14 b) Sistema excitación medición durante la medición del RMB

2.5 Planificación experimental

Con el objetivo de determinar el número óptimo de observaciones para la medición del RMB se tomarán los valores de la media verdadera de la distribución normal del voltaje medio cuadrado para deformaciones plásticas del 1% 1,35V. En este caso, según criterios de Dixon-Massey [38] se utilizará como valor de la desviación típica el 25% de la media, en este caso 0.34V, con un error de 0.30 V que depende, en lo fundamental, de las condiciones a las cuales se desarrollan las mediciones.

En la figura 2.15 se muestra la curva de potencia, que arroja 8 como el número óptimo de observaciones.

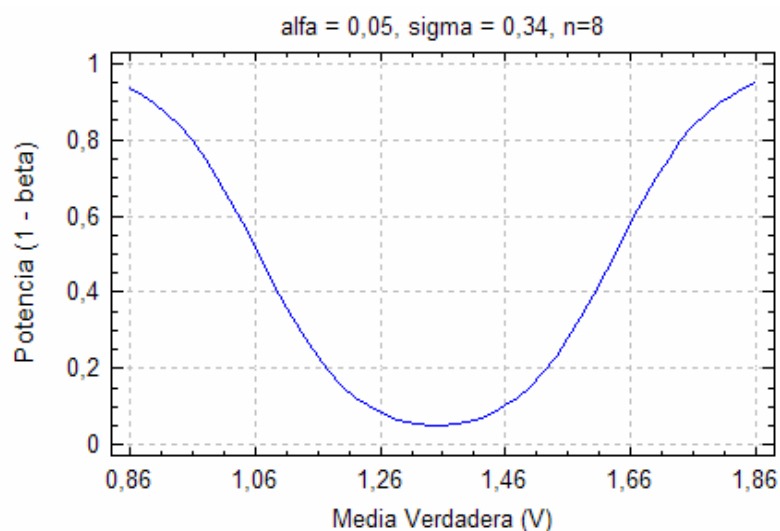


Fig. 2.15 Curva de potencia para determinar el número de observaciones de Vrms.

2.6 Análisis de resultado

Para el análisis de los resultados se utilizan los siguientes softwares profesionales:

1. Matlab V9.0 Para el procesamiento de las señales
2. Statgraphics V15 Para la obtención de los modelos de regresión

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO 2

1. Para la deformación plástica de la grieta se utilizó un dispositivo especial que se adapta a la máquina universal de fatiga por impacto el cual aplica cargas a la muestra en el orden de 120 – 150 kgf.
2. Para la medición del RMB se requiere de un sistema de excitación con Yoke magnético de pequeñas dimensiones que permita el cierre del campo magnético en la muestra compacta a tracción como la utilizada.
3. Para excitar el movimiento de las paredes de dominio en la muestra compacta de tracción se requieren frecuencias en el orden de 20 – 50 Hz.
4. Para las mediciones del voltaje medio cuadrado como variable de salida del ensayo no destructivo se requieren 8 observaciones como valor óptimo.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados referentes al proceso de preagrietamiento y de las mediciones del RMB para su aplicación al método propuesto en el objetivo de este trabajo.

3.1 Ensayo de preagrietamiento por fatiga

En las figuras 3.1 a y b, se muestran el procedimiento de medición de la grieta en el microscopio óptico y las imágenes obtenidas de éstas en algunas de las muestras analizadas.

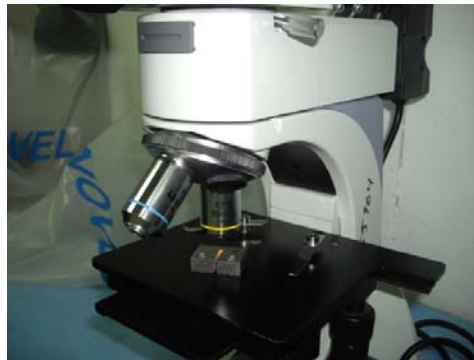


Fig. 3.1 a) Procedimiento de medición de la longitud de grieta en la PCT.

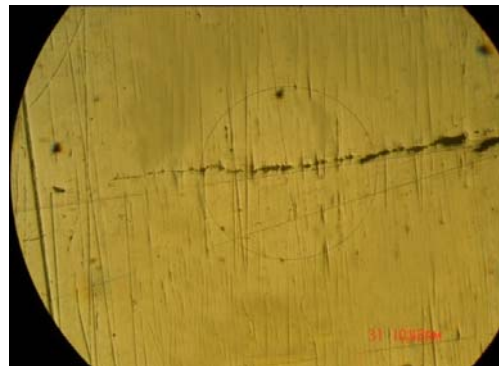


Fig.3.1 b) Grietas obtenidas durante el proceso de preagrietamiento.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados de la incubación y crecimiento de grietas en función del número de ciclos de fatiga para ambas caras de las muestras, los

valores de alcance de longitud de grietas se corresponden a las dimensiones de la muestra analizada, descrita en el capítulo 2.

Tabla 3.1 Longitud de grieta obtenida para el material.

	Longitud de grieta (m)				Longitud de grieta (m)			
	CARA A				CARA B			
No. de ciclos	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
10 000	-	-	-	-	-	-	-	-
20 000	-	-	-	-	-	-	-	-
30 000	-	-	-	-	-	-	-	-
40 000	0,00071	0,00077	0,00069	0,00069	0,00073	0,00075	0,00072	0,00075
50 000	0,00084	0,00086	0,00075	0,00084	0,00079	0,00081	0,00081	0,00080
60 000	0,00099	0,00094	0,00093	0,00092	0,00099	0,00094	0,00097	0,00095
70 000	0,00115	0,00109	0,00109	0,00108	0,00111	0,00111	0,00106	0,00113
80 000	0,00121	0,00127	0,00119	0,00125	0,00119	0,00122	0,00126	0,00121
90 000	0,00134	0,00139	0,00136	0,00137	0,00139	0,00135	0,00135	0,00139
100 000	0,00159	0,00154	0,00151	0,00155	0,00151	0,00154	0,00147	0,00153
110 000	0,00162	0,00161	0,00168	0,00163	0,00164	0,00168	0,00164	0,00168
115 400	0,00174	0,00173	0,00179	0,00173	0,00175	0,00176	0,00170	0,00175
	Longitud de grieta (m)				Longitud de grieta (m)			
	CARA A				CARA B			
No de ciclos	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8
10 000	-	-	-	-	-	-	-	-
20 000	-	-	-	-	-	-	-	-
30 000	-	-	-	-	-	-	-	-
40 000	0,00069	0,00076	0,00078	0,00078	0,00072	0,00079	0,00078	0,00077

50 000	0,00075	0,00082	0,00083	0,00081	0,00079	0,00077	0,00087	0,00085
60 000	0,00094	0,00094	0,00097	0,00099	0,00097	0,00094	0,00104	0,00102
70 000	0,00107	0,00114	0,00113	0,00112	0,00109	0,00107	0,00117	0,00117
80 000	0,00122	0,00122	0,00122	0,00121	0,00122	0,00122	0,00132	0,00129
90 000	0,00133	0,00139	0,00134	0,00133	0,00135	0,00137	0,00144	0,00139
100 000	0,00151	0,00156	0,00155	0,00157	0,00148	0,00145	0,00161	0,00158
110 000	0,00169	0,00161	0,00162	0,00161	0,00161	0,00165	0,00171	0,00163
115 400	0,00176	0,00175	0,00173	0,00174	0,00173	0,00174	0,00176	0,00176

3.2 Medición de la deformación con el empleo del ruido magnético Barkhausen

Como se apuntó en el capítulo 1, existe una relación directa entre la deformación plástica que sufre la muestra compacta de tracción y su longitud de grieta; luego, al obtener una correlación entre los parámetros del RMB y la deformación plástica, se puede lograr, en consecuencia, la correlación entre dichos parámetros y la longitud de la grieta por fatiga que tiene lugar en la muestra analizada.

Todo ello requiere realizar un estudio minucioso de los parámetros del RMB con la deformación plástica de la muestra compacta de tracción. Con este propósito, se evaluaron los parámetros magnéticos para distintos porcentajes de deformación plástica de la entalla de la muestra, y se analizaron los resultados obtenidos, tanto para grandes como para pequeños porcentajes de deformación plástica, lo cual permite, en el primer caso, conocer las longitudes de grieta por fatiga, y en el segundo, el momento en que ésta se incubaba.

Varios trabajos sobre el ruido magnético de Barkhausen han demostrado que la tensión aplicada dentro del régimen elástico del material produce efectos en la señal del RMB, que difieren de los que provoca la tensión, más allá del límite elástico, o sea, en el régimen plástico [22].

La deformación plástica en los aceros, de manera general, produce una disminución de la actividad del RMB [23]. Para deformaciones plásticas muy pequeñas, se

corroboró un pequeño incremento de la actividad del RMB, lo que coincide con los resultados obtenidos por [24]. Sobre esta base, en este trabajo se logran resultados acerca del comportamiento de parámetros del RMB con diferentes niveles de deformación plástica de las PCT, que son empleados para evaluar la longitud de la grieta por obtener. En la zona de medición magnética de las muestras, con el aumento de la deformación plástica se altera el comportamiento magnético debido a los efectos microestructurales que varían con la deformación plástica, los cuales se pueden resumir de la forma siguiente:

- Incremento del número de sitios de anclaje en forma de entramados de dislocaciones, los cuales representan obstáculos al movimiento de las paredes de dominio.
- Desarrollo de una textura cristalográfica que altera la dirección del eje de fácil magnetización.
- La aparición de tensiones residuales locales localizadas en los bordes de grano y alrededor de las dislocaciones.

Basado en esto, en la figura 3.2 se muestra la dependencia entre el voltaje medio cuadrado (V_{rms}) del RMB y la deformación plástica hasta valores del 8 %, que es el límite necesario, en las muestras compactas empleadas, para hacer crecer la grieta hasta el rango de longitud estandarizada entre 1,74 mm y 1,76 mm, previo el ensayo de velocidad de propagación de grietas a elevadas temperaturas, según norma ASTM E1457-00 [8].

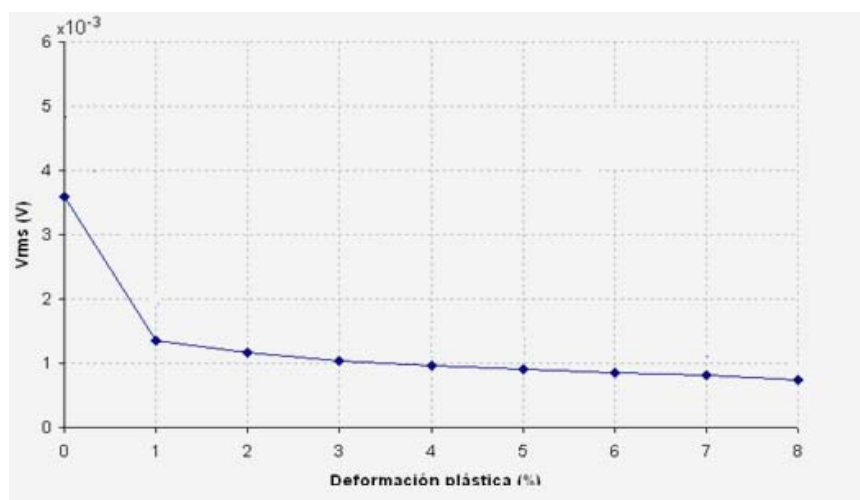


Fig. 3.2 Dependencia del RMB (V_{rms}) con la deformación plástica en el acero 12Cr1MoV.

En esta gráfica se muestra el comportamiento de V_{rms} vs DP de forma general, obviando lo que sucede con deformaciones plásticas inferiores al 1 %. En esta figura se puede apreciar, en el rango de deformaciones estudiado, que el V_{rms} decrece con el incremento de la deformación plástica. Este proceso se atribuye, principalmente, al incremento del número de dislocaciones y a la formación de mallas de éstas [25], las cuales, representan grandes obstáculos para el desplazamiento de las paredes de dominio, lo cual impide su movimiento. Este resultado concuerda con los obtenidos por Stupakov [26], quien demuestra que para mayores niveles de deformación, el material no llega a saturarse por completo, incluso para altas intensidades de campos magnéticos aplicados, lo cual evidencia que las paredes de dominio están fuertemente ancladas, e impiden que se sature el material.

Seguidamente se cuantificó el número de muestras en las que se incuban grietas con los valores de deformación plástica analizados; en la figura 3.3 se puede observar la frecuencia de incubación de grietas en función de los valores de deformación plástica.

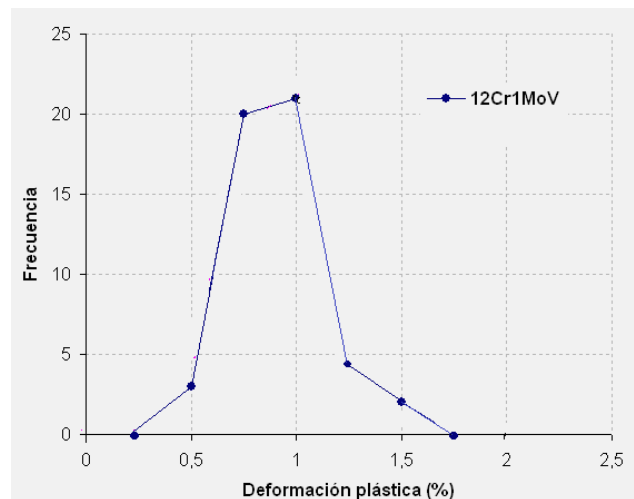


Fig. 3.3 Frecuencia de incubación de grietas por fatiga en los aceros 12Cr1MoV.

Consecutivamente se han llevado a cabo estudios de la correlación de los parámetros del RMB para pequeñas deformaciones plásticas, donde se perciben comportamientos diferentes por la ocurrencia de otros fenómenos más complejos, lo que ha sido objeto de estudio por otros investigadores [27].

El análisis fundamental de la figura 3. 2, obliga al estudio de los parámetros del RMB para pequeñas deformaciones plásticas, con el objetivo de conocer in situ en qué momento se incubaba la grieta sin necesidad de desmontar la muestra del dispositivo de preagrietamiento.

Para tal propósito, se obtuvo nuevamente la dependencia del V_{rms} y del máximo voltaje de pico del RMB con la deformación plástica, enfatizando en el comportamiento para deformaciones plásticas inferiores al 1 %. Estas dependencias se muestran en las figuras 3.4 a) y 3.4 b):

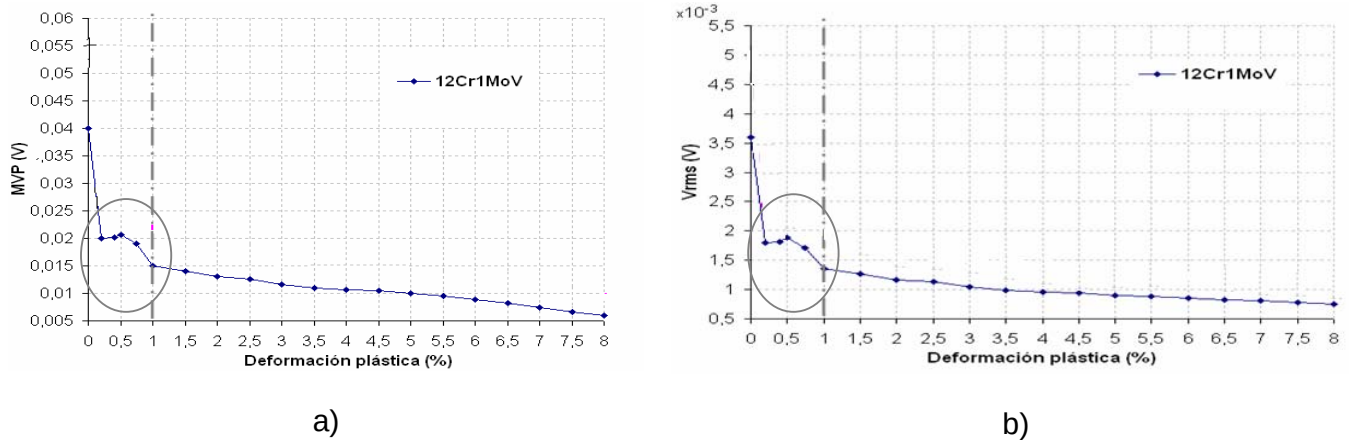


Fig. 3.4 Dependencia del RMB con la deformación plástica en los aceros 12Cr1MoV, enfatizando deformaciones inferiores al 1%: a) MVP y b) V_{rms}

En estas figuras se puede apreciar que la señal del RMB, igualmente decrece para estos niveles de deformación; sin embargo, para deformaciones menores que 1 % ocurre un incremento de la señal. Este fenómeno puede atribuirse al surgimiento ocasional de tensiones residuales en los bordes de granos, las cuales favorecen (en lugar de entorpecer) el movimiento de los dominios de 90° , que son muy sensibles a la tensión [27]. Por otra parte, con el incremento de la densidad de las dislocaciones, la estructura de dominios se refina y se forman numerosas paredes de 90° , las cuales, por igual, son muy sensibles a la tensión. Por tanto, cuando existen tensiones residuales en el material, los dominios magnéticos presentan gran movilidad y, debido a que su número es elevado, se produce un incremento de la señal del RMB. Este proceso desaparece posteriormente ya que el gran número de dislocaciones que surgen ocasionadas por la continuidad de la deformación plástica, impiden el movimiento de las paredes de 90° .

Para estudiar con mayor profundidad la complejidad de la variación de la señal del RMB con pequeñas deformaciones plásticas y, en consecuencia, poder conocer el momento más cercano a la incubación de la grieta, se desarrolla el análisis de la densidad espectral (DE) de la señal del RMB para valores de deformación plástica entre 0 % y 4 % figura 3.5.

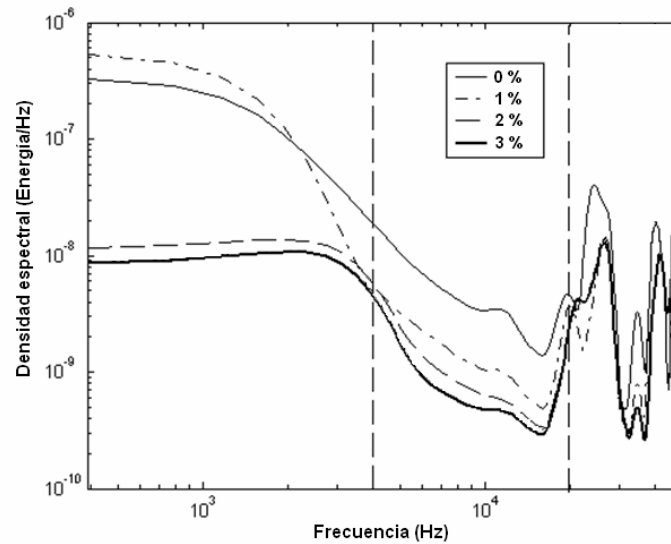


Fig. 3.5 Dependencia de la densidad espectral del RMB con la frecuencia para diferentes niveles de deformación plástica en el acero: 12Cr1MoV.

Estas figuras muestran que para bajas y altas frecuencias no hay una dependencia entre la DE y la deformación plástica. Sin embargo, para valores medios de la frecuencia existe una correlación lógica evidente entre ambas. Este fenómeno podría atribuirse a que cuando una muestra de acero es sometida a una deformación plástica uniaxial (como es el caso), la tensión presente en la superficie de la muestra difiere de la tensión en el volumen interior, lo cual resulta en una tensión residual en las capas superficiales, y al existir una correlación entre la frecuencia de la señal del RMB y la profundidad desde donde es emitida [38, 39], mientras mayor es la frecuencia de la señal, más cercana a la superficie ocurren las emisiones del RMB. Las frecuencias muy altas medidas en la DE están influidas por elementos superficiales como la rugosidad, por eso no presentan una dependencia evidente con la deformación. La región intermedia representa la superficie inmediata inferior donde existe una correlación clara de la señal del RMB con la deformación: la señal del RMB decrece con la deformación plástica, y para menores frecuencias se obtiene información de todo el material, pues las bajas frecuencias proceden

tanto de la superficie como del volumen interior. Esta parte de la DE, por tanto, contiene información de varias regiones cuyas correlaciones con la deformación son distintas, lo cual da como resultado que la correlación del RMB con la deformación para bajas frecuencias no sea evidente, estos resultados coinciden con los obtenidos por diferentes investigadores [22].

Por otra parte, se llevó a cabo el análisis de las envolventes de la señal para DP de hasta el 3 %, las cuales se muestran en la figura 3.6 para el acero 12Cr1MoV.

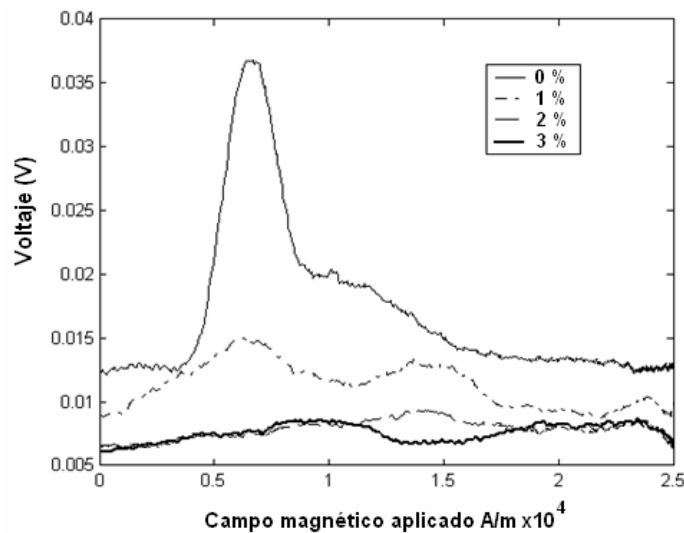


Fig. 3.6 Dependencia de la envolvente del RMB con la deformación plástica para el acero: 12Cr1MoV

En esta figura se puede apreciar que la envolvente del RMB para estos niveles de deformación plástica sufre las siguientes modificaciones con el incremento de la deformación:

- a) La amplitud de la envolvente disminuye con la deformación plástica.
- b) El ancho de la envolvente crece con la deformación plástica.
- c) La envolvente tiende a dividirse en dos picos, los cuales van disminuyendo de amplitud hasta que prácticamente desaparecen.

Este último se puede atribuir de nuevo a los efectos microestructurales que varían con la deformación plástica, los cuales se manifiestan como un incremento en la cantidad de dislocaciones y tensiones residuales, el incremento de las dislocaciones impide el movimiento tanto de las paredes de 180° , como el de las paredes de 90° ,

éstas se encuentran tan fuertemente ancladas que se dificulta su movimiento y ello provoca que los picos desaparezcan.

En la figura 3.7 se muestra la correlación existente entre la deformación plástica de la entalla de la muestra compacta de tracción y las longitudes de grieta que crecen como resultado de la aplicación de cargas cíclicas.

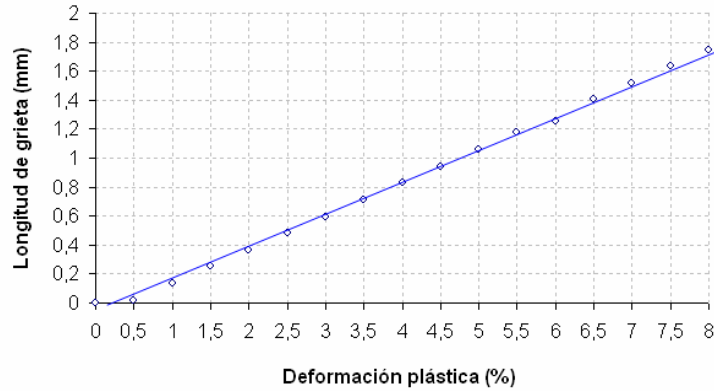


Fig. 3.7 Dependencia entre la deformación plástica y la longitud de grieta en muestras compactas de tracción en el acero 12Cr1MoV.

Como se comentó anteriormente, se conoce que la grieta, de forma general en los aceros estudiados, se incuba con deformaciones plásticas entre 0,75 % y 1 %, por tanto, para evaluar el crecimiento de la grieta con los parámetros del RMB, se obtienen las ecuaciones del modelo de deformación plástica (DP) y longitud de grieta (Lg), mostrado en la figura 3.7, y los de deformación plástica y MVP, y Vrms respectivamente, mostrados en las figuras 3.4 a) y 3.4 b), los cuales han sido contruidos a partir de los valores del rango de deformación plástica entre el 1 % y el 8 %, que son las deformaciones plásticas necesarias para hacer crecer la grieta por fatiga hasta su longitud estandarizada. Dichos modelos se muestran a continuación:

$$Lg = 0,23DP - 0,0951 \quad (1)$$

Para el acero 12Cr1MoV:

$$Vrms = 0,0014 - 0,00029 \ln(DP) \quad (2)$$

Despejando DP de las ecuaciones (1), (2) e igualando este término, se obtiene:

Para el acero 12Cr1MoV:

$$Lg = 0,23 \left(e^{\frac{0,0014 - V_{rms}}{0,00029}} \right) - 0,0951 \quad (3)$$

Para el caso del máximo voltaje de pico, se desarrolla el mismo procedimiento:

Para el acero 12Cr1MoV:

$$MVP = 0,016 - 0,0012(DP) \quad (4)$$

$$MVP = e^{(-3,78 - 0,105 DP)}$$

Despejando DP de las ecuaciones (1), (4) e igualando este término, se obtiene:

Para el acero 12Cr1MoV:

$$Lg = \frac{0,2301(0,016 - MVP)}{0,0012} - 0,0951 \quad (5)$$

Las expresiones (4), (5), cuyos coeficientes de correlación de Pearson superan en todos los casos 0,98, se emplean para obtener, a partir del V_{rms} y MVP, las longitudes de grieta por fatiga, en muestras compactas de tracción fabricadas de acero 12Cr1MoV.

En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran, a partir de las ecuaciones obtenidas, los valores del V_{rms} y MVP para distintas longitudes de grieta por fatiga en muestras compactas de tracción, el acero 12Cr1MoV:

Tabla 3.2 Valores de V_{rms} para distintas longitudes de grieta por fatiga en muestras compactas de tracción.

Acero 12Cr1MoV								
Vrms (V)		Lg (mm)			Vrms (V)		Lg (mm)	
0,0015		0,0678			0,001		0,8185	
0,00145		0,0985			0,00095		0,9904	
0,0014		0,1349			0,0009		1,1946	

0,00135	0,1782		0,00085	1,4373
0,0013	0,2296		0,00084	1,4910
0,00125	0,2907		0,00083	1,5467
0,0012	0,3633		0,00082	1,6043
0,00115	0,4495		0,00081	1,6639
0,0011	0,5520		0,0008	1,7256
0,00105	0,6738		0,000795	1,7573

NOTA: La descripción estadística de toda la data experimental obtenida en el presente capítulo se encuentra referida en los anexos del trabajo.

Tabla 3.3 Valores de MVP para distintas longitudes de grieta por fatiga en muestras compactas de tracción.

Acero 12Cr1MoV				
MVP (V)	Lg (mm)		MVP (V)	Lg (mm)
0,015	0,0967		0,009	1,2472
0,014	0,2884		0,0085	1,3430
0,013	0,4802		0,008	1,4389
0,012	0,6719		0,0075	1,5348
0,011	0,8637		0,007	1,6307
0,01	1,0554		0,0065	1,7265
0,0095	1,1513		0,0064	1,7457

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO 3

1. Se llevaron a cabo en los ensayos de preagrietamiento por fatiga constatando que la grieta se incubaba alrededor de los 40 000 ciclos y llega a la longitud estandarizada 1,75 mm en el orden de los 115 000 ciclos para ambas caras de la muestra.
2. Las mediciones de RMB revelan una disminución del voltaje medio cuadrado con el incremento de las deformaciones plástica hasta el 8 %.
3. Las mediciones del voltaje medio cuadrado y del máximo voltaje pico de la señal Barkhausen para deformaciones plásticas hasta el 1 % revelan un comportamiento anómalo que se atribuye al surgimiento ocasional de tensiones residuales por el borde de los granos.
4. Los valores de densidad espectral para distintos desniveles de deformación tienen comportamientos secuenciales para frecuencia en el orden de los 10^4 Hz.
5. La envolvente de la señal Barkhausen tiende a decrecer con el incremento de la deformación plástica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una valoración de los parámetros de la señal del RMB que varían con distintos niveles de deformación plástica y, en consecuencia, con las longitudes de grieta en muestras compactas de tracción preagrietadas por fatiga, fabricadas de acero 12Cr1MoV empleado en la industria termoenergética nacional, con el que se logra un método para la detección y seguimiento de grietas en probetas compactas de tracción. También se ha demostrado que en estas muestras, las grietas se incuban, por regla general, con DP entre 0.75 % y 1 %, y que los valores medios de la señal del RMB (V_{rms}) y el máximo voltaje de pico (MVP) decrecen con el incremento de la deformación plástica de la entalla de la grieta.

Se obtienen los modelos de correlación entre MVP, V_{rms} y DP, y Lg y DP, los cuales son combinados para obtener la relación entre longitud de grieta y parámetros del RMB, lo que posibilita evaluar in situ la longitud de la grieta de las PCT.

Por otra parte, a fin de chequear el momento más próximo de incubación de la grieta, se evalúan en conjunto las densidades espectrales para frecuencias en el orden de 10^4 Hz, la forma de la envolvente de la señal y que los valores de V_{rms} y MVP estén próximos a 16.55 mV y 15.5 mV en el material 12Cr1MoV.

A raíz de lo antes descrito se puede perfeccionar, en aras de ganar tiempo, el proceso de preagrietamiento previo el ensayo de velocidad de propagación de grietas en muestras compactas de tracción.

RECOMENDACIONES

1. Encaminar acciones que permitan, desarrollar la infraestructura necesaria para llevar a cabo la medición de longitud de grieta a partir de la deformación plástica en probetas compactas a tracción a escala de laboratorio, así como extrapolar el método desarrollado a aplicaciones industriales debido a que el RMB puede desarrollar sensibilidad superior a la técnica del ultrasonido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GULIAEV, A.P: Metalografía, Tomos II, 2da. ed., MIR, Moscú, URSS,1983.
2. GORDON, C.J, Metales para instalaciones termoenergéticas, 1ra. ed. Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana Cuba, 1987.
3. _____, *ARCHIVOS DEPARTAMENTO TÉCNICO, CTE "Antonio Maceo"*, RENTÉ Santiago de Cuba, 2012. Vol I
4. _____, *ARCHIVOS DEPARTAMENTO TÉCNICO, CTE "Antonio Maceo"*, RENTÉ Santiago de Cuba ,2012. Vol II
5. STÜDEMANN, H: Ensayo de materiales y control de defectos en la industria del metal, Urmo, 1979.
6. De los Reyes Rodríguez, Frank. Influencia del grado de envejecimiento en la velocidad de propagación de grietas de las LPV, Tesis doctoral, CUBA, 2013
7. GULIAEV, A.P: Metalografía, Tomos I, 2da. ed., MIR, Moscú, URSS,1983
8. _____, *ASTM E 1457-00 "Standard test method for measurement of creep crack growth rates in metals"*, 2000.
9. W.A. Theiner, I. Altpeter and R. Kern: Nondestructive Characterization of materials II (J.F. Bussiere, Plenum Press, New York, 1986).
10. Gómez García, F. Ensayos no destructivos, Ed INTA, 1997, España
11. Gómez García, F. Aplicaciones de la técnica de ultrasonido, Ed INTA, 1987, España.
12. Weiss, p., Foey G.: *Le Magnetisme*, Armand Colin, Paris,1926.
13. L. Clapham, T.W. Krause, H. Olsen, B. Ma, D.L. Atherton, P. Clark, and T. Holden: Nondestructive Testing and Evaluation Int. 28 (1995) 73.
14. LANDAU, L., LIFSHITZ, E., *Physik*, Vol. 8, 1935: Sowjetunion, p.153.
15. STUPAKOV, O.: "System for controllable magnetic measurement with direct field determination", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012. **324**(4): p. 636.
16. PÉREZ BENÍTEZ, J.A.: "Estudio del ruido magnético de Barkhausen en aceros al carbono", Tesis Doctoral en Física Aplicada, Universidad de Oriente, Cuba 2007.
17. STUPAKOV, O.: "System for controllable magnetic measurement with direct field determination", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012. **324**(4): p. 636.

18. JACKSON, J.D.: *Classical Electrodynamics*, Wiley, New York, 1962.
19. MUGHAL, A. et al.: "Effect of Dipolar Interactions for Domain-Wall Dynamics in Magnetic Thin Films", IEEE Transactions on Magnetics, 2010, **46**(2): pp. 228-230.
20. TINAGUMA, H. SAKAMOTO, AND M. HASEGAWA: "Microstructure dependence of Barkhausen voltage pulse width in steel", Journal of Applied Physics, 2012, **111**: p. 063903(1)-063903(9)
21. BARKHAUSEN, H., *Physik*, 1919, p. 401.
22. KOSTIN, K.V., et al., *Measurement of the hysteresis characteristics of pipe steels under elastic and plastic tensile strain*, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, **47**(9): pp. 593-602.
23. PIOTROWSKI, L., et al., *Possibility of Application of Magnetoacoustic Emission for the Assessment of Plastic Deformation Level in Ferrous Materials*, IEEE Transactions on Magnetics, 2011, **47**(8): p. 2092.
24. FOOKES, A.J., SMITH, D. J., *The influence of plasticity in creep crack growth in steels*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 8/2003, **80**(7-8): pp. 453-463.
25. CALLISTER, W.: *Materials Science and Engineering*, EE.UU, 1998.
26. STUPAKOV, O., *System for controllable magnetic measurement with direct field determination*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, **324**(4): p. 636.
27. WANG, Z.D., GU, Y., AND WANG, Y.S., *A review of three magnetic NDT technologies*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, **324**(4): pp. 382-388.