



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN

“EVALUACIÓN DEL BASTIDOR DEL BOGUI DEL MATERIAL  
RODANTE MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS”

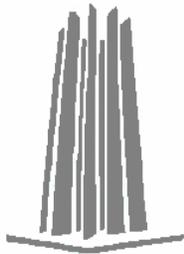
## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A  
MARTIN CASTILLO

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. JAVIER NAVA PÉREZ

MÉXICO.

2006.





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## Dedicatoria:

### A mis padres:

Por su amor y cariño que siempre me han demostrado, por brindarme la oportunidad de triunfar en la vida gracias a sus innumerables sacrificios y su infinito e incondicional apoyo.

### A mis hermanas:

Por su apoyo, cariño y comprensión que me han entregado, por su ayuda y fortaleza en todo momento.

### A mis Abuelos y Tíos:

Por sus sabios consejos, su confianza y sus impulsos a seguir siempre adelante.

### A mi Esposa:

Por la paciencia el amor que nos une

### A mis Primos:

Por la gran unidad que nos a caracterizado y que siempre hemos demostrado, por su apoyo y motivación a la constante superación... gracias hermanos.

## Agradecimientos:

A la  
Universidad Nacional Autónoma de Mexico  
Por brindarnos ser parte de su gente, su historia

A nuestros profesores  
Por sus enseñanzas, consejos y amistad  
que nos brindaron.

Al  
Sistema de Transporte Colectivo “Metro”  
Por permitirnos colaborar en sus investigaciones  
y presentar este trabajo de tesis.

# INTRODUCCIÓN

## CAPITULO I GENERALIDADES

- 1.1 Esfuerzos permisibles
- 1.2 Esfuerzos combinados
- 1.3 Esfuerzos principales
- 1.4 Esfuerzo efectivo de von mises
- 1.5 Criterios de fluencia y fractura
- 1.6 Fallas por fatiga
- 1.7 criterios de medición de las fallas por fatiga
- 1.8 factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

## CAPITULO 2 LIQUIDOS PENETRANTES Y PARTICULAS MAGNETICAS

- 2.1 Procedimiento general para la inspección con líquidos Penetrantes
  - 1. Fundamentos
  - 2. Clasificación de los Métodos y tipos de líquidos
  - 3. Requisitos generales
  - 4. Condiciones para la examinación
  - 5. Requisitos especiales
  - 6. Interpretación y evaluación de resultados
- 2.2 Procedimiento general para la inspección por Partículas Magnéticas
  - 1.0 Alcance y fundamentos
    - 1.1 Capa magnética como medio de inspección
    - 1.2 Posibilidades del método
    - 1.3 Materiales magnetizables
  - 2.0 Requerimientos generales
    - 2.1 Procedimiento
    - 2.2 Método de inspección
    - 2.3 Técnicas y materiales aprobados
    - 2.4 Preparación de la superficie
    - 2.5 Magnetización
    - 2.6 Medio de inspección
    - 2.7 Eficiencia del campo magnético
    - 2.8 Corriente rectificadora
    - 2.9 Desmagnetización
  - 3.0 Características generales de los equipos de inspección
    - 3.1 Equipos fijos
    - 3.2 Equipos portátiles
    - 3.3 Frecuencia de calibración
  - 4.0 Inspección
  - 5.0 Procedimiento de magnetización
    - 5.1 Técnica de puntas de contacto
    - 5.2 Espacio entre puntas
  - 6.0 Magnetización longitudinal
    - 6.1 Procedimiento de magnetización
    - 6.2 Potencia del campo magnético
    - 6.3 Técnica por Yugos
      - 1 Aplicación

- 2 Procedimiento de magnetización
- 3 Fuerza magnetizante del Yugo
  
- 7.0 Magnetización circular
  - 7.1 Técnica de contacto directo
  - 7.2 Técnica de conductor central
- 8.0 Magnetización Multidireccional
  - 8.1 Procedimiento de magnetización
  - 8.2 Potencia del campo magnético
- 9.0 Evaluación de las indicaciones
- 10.0 Reportes

## CAPITULO 3 ULTRASONIDO

- 3.1 Los ensayos no destructivos.**
- 3.2 Definición de los ensayos no destructivos (end).**
- 3.3 Diversas técnicas de inspección**
- 3.4 Ventajas de los ensayos no destructivos.**
- 3.5 Limitaciones de los ensayos no destructivos.**
  
- 3.6 Beneficios del empleo de los ensayos no destructivos.**
- 3.7 Selección del ensayo no destructivo adecuado.**

## CAPITULO 4 DESCRIPCION DEL MATERIAL RODANTE

- 4.1.-Descripción del material rodante**
- 4.2 Principio de rodamiento**
- 4.3Pilotaje automático**

## CAPITULO 5 ELABORACION DEL METODO

- 5.1 antecedentes
- 5.2 Contenido del procedimiento

CONCLUSIÓN  
BIBLIOGRAFÍA

## INTRODUCCION

Siendo el Sistema de Transporte Colectivo “metro” la columna vertebral del transporte publico en la Ciudad de México, y considerando que cualquier alteración al servio representa innumerables perdidas económicas tanto para los usuarios como para el propio Organismo, y considerando que los carros del metro sobre neumático tienen una antigüedad que va desde los siete años (NE-92) hasta los 30 años (estos últimos material MP- 68), siendo una de sus partes mas importantes el elemento denominado “bastidor del bogie”, puesto que es el componente que contiene el sistema de acoplamiento entre el chasis y la caja, y varios accesorios como son; las transversas, la timonería de freno, el freno de inmovilización, las escobillas, los motores, las ruedas de seguridad, la rueda portadora, la rueda guía, suspensión secundaria, dispositivo de estabilización transversal, entre otros.

Los carros con mas de treinta años de servicio como son los modelos NM73-A Y NM73-B, requieren ser remplazados o rehabilitados por razones económicas se opto por rehabilitarlos por lo cual se remplazarán de los mismos las partes inservibles y se reaprovecharán las que estén en buenas condiciones de operación una de estas partes es el bastidor del bogie o también llamada H.

El bastidor de bogui se constituye de una estructura en forma de H fabricada en placa de acero de bajo contenido de carbono de alta soldabilidad. En el bastidor del bogui los ensambles son efectuados por soldadura de arco eléctrico y su construcción es de tipo caja con elementos prefabricados por dobléz o por forja, al igual que las fijaciones y los soportes necesarios para que sobre el bastidor se ensamblen sus diversos accesorios.

Durante la revisión general de los trenes se ha detectado que el bastidor del bogui no es completamente hermético y permite la entrada y acumulación de agua, la cual genera un proceso de corrosión de la placa de acero en el interior del bastidor, produciendo al paso del tiempo una perdida de espesor en la misma, haciendo esta situación la necesidad de conocer el espesor de pared de la placa para establecer la confiabilidad del desempeño de este elemento.

Por ello es de vital importancia el conocer sus características para estar en posibilidades de presentar cualquier desviación.

El siguiente trabajo pretende ser una propuesta de solución al problema antes descrito.

Para lo cual el siguiente trabajo se estructura de la siguiente manera:

En el capítulo 1.- Se mencionan las características generales del Material Rodante dando énfasis finalmente a los neumáticos utilizados tanto para vías cubiertas como para las vías descubiertas.

En el capítulo 2.- Se da a conocer el Sistema de Vías del Sistema de Transporte Colectivo, lo que nos permite comprender el problema por esta causa.

En este capítulo 3- Se analizan las características del problema directamente involucradas.

En este capítulo 4.- Se realiza una propuesta de solución y los resultados a la problemática del patinaje y deslizamiento que se desarrolla en línea 2 del Metro de la Ciudad de México.

## 1.1 ESFUERZOS PERMISIBLES

Para garantizar la seguridad en un elemento mecánico, es necesario elegir un esfuerzo permisible que restrinja la carga aplicada a una que sea menor que aquella que el elemento o pieza pueden soportar plenamente. Por ejemplo, el esfuerzo para el cual se diseña un elemento o pieza puede ser diferente de los esfuerzos reales desarrollados sobre él.

Un método para especificar el esfuerzo permisible para el diseño o el análisis de un miembro es usar un número llamado "Factor de seguridad" ( $F_s$ ), el cual es una razón del esfuerzo teórico máximo o último que puede ser soportado por el elemento o pieza hasta que falle ( $S_{ult}$ ), dividido por un esfuerzo permisible o de trabajo ( $S_t$ ) que ha sido determinado por la experiencia o experimentalmente para que sea seguro, bajo condiciones similares de carga y de geometría, por lo que tenemos:

$$F_s = \frac{S_{ult}}{S_t} \quad (2.1)$$

El valor del Factor de seguridad depende de los materiales que se usen y del tipo de trabajo del elemento o pieza de estructura o máquina a diseñar, generalmente se elige un factor de seguridad mayor que 1, con el objeto de evitar una posible falla.

## 1.2 ESFUERZOS COMBINADOS

Cuando un elemento de estructura o máquina se encuentra sometido a diferentes tipos de cargas (fuerzas externas), se desarrollan en él diferentes esfuerzos, a esto se le llama una combinación de esfuerzos.

$$\begin{array}{l}
 \text{Esfuerzo Normal} \\
 \text{"}\sigma\text{"}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{ll}
 \text{Axiales} & \sigma_P = \frac{P}{A} \\
 \text{Por Flexión} & \sigma_M = \frac{Mc}{I}
 \end{array}
 \right.$$
  

$$\begin{array}{l}
 \text{Esfuerzo Cortante} \\
 \text{"}\tau\text{"}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{ll}
 \text{Simple} & \tau_F = \frac{F}{A} \\
 \text{Compuesto} & \tau_V = \frac{VQ}{Ib}
 \end{array}
 \right.$$

Si separamos un elemento de volumen cúbico del material donde se represente una combinación de esfuerzos se tendrá un estado de esfuerzos.

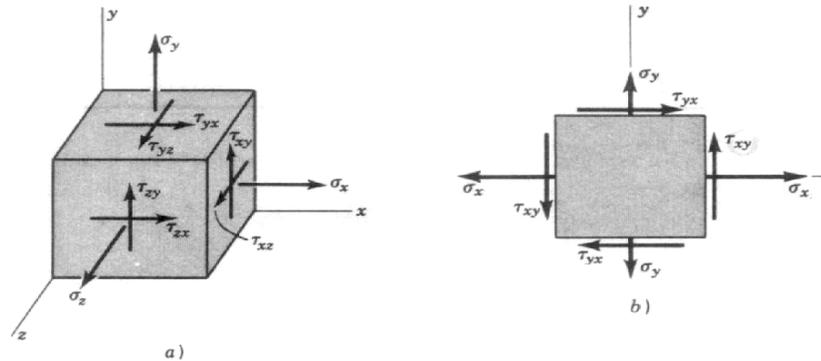


FIG. 1.1 ESTADO DE ESFUERZO TRIAXIAL (a) Y ESTADO DE ESFUERZO BIAXIAL (b).

### 1.3 ESFUERZOS PRINCIPALES

Si al elemento de la figura 2.1(b) se le corta con un plano inclinado, el cual tiene un ángulo  $\phi$  con respecto al eje  $x$ , (Fig. 2.2), aparecen los esfuerzos normales ( $\sigma'$ ) y cortantes ( $\tau'$ ), que actúan en ese plano.

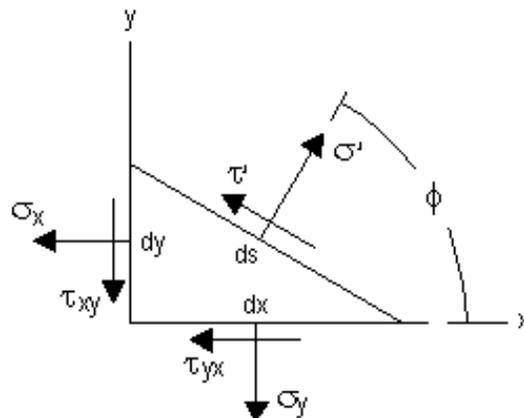


FIG. 2.2 ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL ESTADO DE ESFUERZOS DE UN PLANO INCLINADO.

Al sumar las fuerzas correspondientes a todas las componentes de esfuerzo e igualarlas a cero, los esfuerzos  $\sigma'$  y  $\tau'$  serán:

$$\sigma' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\phi + \tau_{xy} \operatorname{sen} 2\phi \quad (2.2)$$

$$\tau' = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \operatorname{sen} 2\phi + \tau_{xy} \cos 2\phi \quad (2.3)$$

Derivando la ecuación 2.2 con respecto a  $\phi$  e igualando a cero el resultado, se obtiene:

$$\tan 2\phi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (2.4)$$

La ecuación 2.4 determina dos valores particulares del ángulo  $2\phi$ , uno de los cuales define el esfuerzo normal máximo  $\sigma_1$  y el otro el esfuerzo normal mínimo  $\sigma_2$ ; a estos dos esfuerzos se les da el nombre de “esfuerzos principales” y a sus direcciones correspondientes se les llama direcciones principales.

La formula de los esfuerzos principales se puede obtener sustituyendo el ángulo  $2\phi$  de la ecuación 2.4 en la ecuación 2.2, obteniendo:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.5)$$

de la misma manera, si derivamos la ecuación 2.3 con respecto a  $\phi$  e igualando a cero el resultado se obtiene:

$$\tan 2\phi = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \quad (2.6)$$

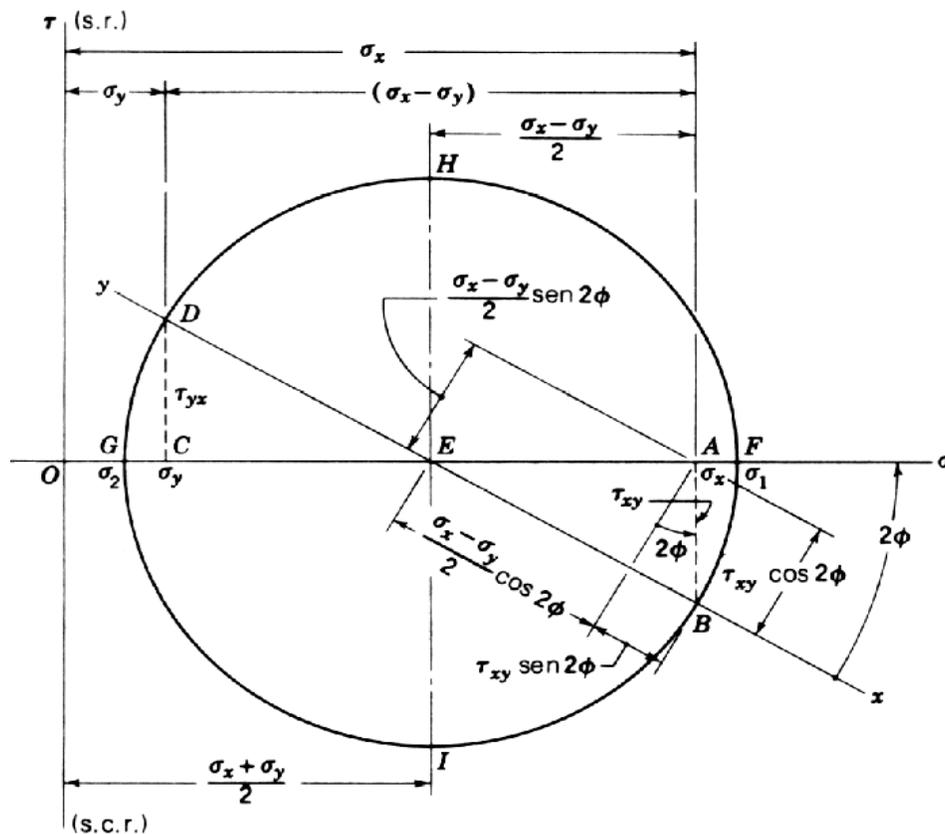
La formula de los esfuerzos cortantes máximos se puede obtener sustituyendo el ángulo  $2\phi$  de la ecuación 2.6 en la ecuación 2.3, obteniendo:

$$\tau_1, \tau_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.7)$$

### 1.3.1 CIRCULO DE MOHR

Un método gráfico para visualizar el estado de esfuerzos en un punto y tener en cuenta la dirección de los diversos componentes asociados al esfuerzo plano y poder determinar los esfuerzos principales de un elemento, es el llamado "Diagrama del círculo de mohr",

Se establece un sistema de coordenadas, en el que los esfuerzos normales se presentan como abscisas y los cortantes como ordenadas. En el eje de las abscisas, los esfuerzos normales de tensión se marcan a la derecha del origen O y los esfuerzos normales de compresión a la izquierda. En el eje de las ordenadas los esfuerzos cortantes en el sentido del reloj, se trazan hacia arriba y los esfuerzos cortantes en sentido contrario al reloj, se trazan



hacia abajo.

### FIG. 2.3 DIAGRAMA DEL CIRCULO DE MOHR.

Utilizando el estado de esfuerzo de la Fig. 2.1b, se traza el círculo de Mohr (Fig. 2.3) marcando  $\sigma_x$  como OA,  $\tau_{xy}$  como AB,  $\sigma_y$  como OC y  $\tau_{yx}$  como CD. La recta DEB es el diámetro del círculo de Mohr como centro en E sobre el eje  $\sigma$ . El punto B representa las coordenadas de esfuerzo  $\sigma_x$   $\tau_{xy}$  en las caras x, y el punto D, las coordenadas de esfuerzo  $\sigma_y$   $\tau_{yx}$  en las caras y. Por lo tanto, EB corresponde al eje x y ED, al eje y. El ángulo  $2\phi$ , que se mide en sentido contrario al del reloj desde EB hasta ED, es igual a  $180^\circ$ , que corresponde a  $\phi=90^\circ$  y se mide en sentido contrario al del reloj desde x hasta y, sobre el elemento de esfuerzo de la Fig. 2.1b. El esfuerzo normal principal máximo  $\sigma_1$  se tiene en F, y el normal principal mínimo  $\sigma_2$  en G. Los dos esfuerzos cortantes de valor extremo, uno en el sentido del reloj y otro en sentido contrario, se presentan en H e I respectivamente.

## 1.4 ESFUERZO EFECTIVO DE VON MISES

En situaciones que impliquen esfuerzos combinados a tensión y a cortante sobre un mismo punto, suele ser práctico definir un esfuerzo efectivo que pueda aplicarse para representar dicha combinación de esfuerzos.

El esfuerzo efectivo de Von Mises se define como aquel esfuerzo a tensión uniaxial que generaría la misma energía de distorsión que la que se produciría por la combinación real de los esfuerzos aplicados. Este procedimiento nos permite tratar esfuerzos combinados multiaxiales de tensión y cortante como si se tratara de cargas a tensión pura.

El esfuerzo efectivo de Von Mises  $\sigma'$  para el caso tridimensional se determina:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (2.8)$$

estos también se pueden expresar en función de los esfuerzos aplicados:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (2.9)$$

y para el caso en dos dimensiones:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (2.10)$$

y si se expresa en función de esfuerzos aplicados:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.11)$$

## 1.5 CRITERIOS DE FLUENCIA Y FRACTURA

Es importante que se establezcan límites en los esfuerzos que definen la falla en un material; si este es dúctil, la falla por lo general se manifiesta por el inicio de la cedencia, mientras que si es frágil, se manifiesta por la fractura.

Existen teorías que se utilizan en la práctica de la ingeniería para predecir la falla de un material sometido a un estado de esfuerzo multiaxial, estas teorías se pueden aplicar en cualquier momento al material, porque como se sabe, un material se puede comportar de manera dúctil o frágil según la temperatura, la velocidad de carga, el entorno químico, o la manera en que el material se moldea o forma.

### 1.5.1 TEORÍA DEL ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO

La teoría del esfuerzo cortante máximo establece que la cedencia de un material dúctil comienza cuando el esfuerzo cortante máximo absoluto en este, alcanza el esfuerzo cortante que provoca que ceda cuando se somete solo a tensión axial.

Para evitar la falla, la teoría del esfuerzo cortante máximo requiere que  $\sigma_{abs}$  en el material sea menor que o igual a  $\sigma_y / 2$ , donde  $\sigma_y$  es el esfuerzo de cedencia del material y se determina mediante una prueba de tensión simple.

La teoría del esfuerzo cortante máximo para esfuerzo plano se puede expresar para dos esfuerzos principales en el plano cualesquiera como  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  mediante los siguientes criterios:

$$\left. \begin{array}{l} |\sigma_1| = \sigma_y \\ |\sigma_2| = \sigma_y \end{array} \right\} \sigma_1 y \sigma_2, \text{ tienen el mismo signo.}$$

$$\left. \begin{array}{l} |\sigma_1 - \sigma_2| = \sigma_y \end{array} \right\} \sigma_1 y \sigma_2, \text{ tienen signos opuestos.}$$

En la figura 2.4 se representa la gráfica de estas ecuaciones, se observa que, si cualquier punto del material se somete a esfuerzo plano y sus esfuerzos principales en el plano se representan con una coordenada  $(\sigma_1, \sigma_2)$  marcada sobre los límites o fuera del área hexagonal mostrada, el material cederá en el punto y se dice que ocurre la falla.

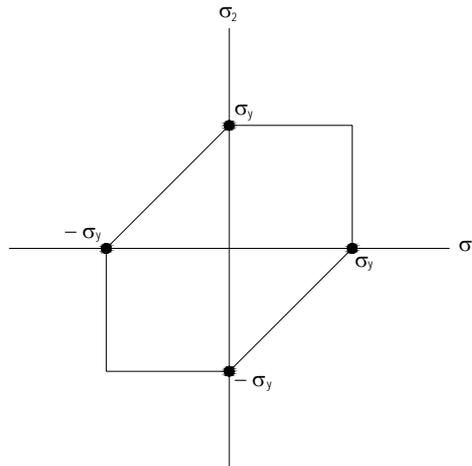


FIG. 2.4 TEORIA DEL ESFUERZO CORTANTE MAXIMO

### 1.5.2 TEORÍA DE LA ENERGÍA DE DISTORSIÓN MÁXIMA

Esta teoría establece que la cedencia de un material dúctil ocurre cuando la energía de distorsión por unidad de volumen unitario del material es igual o superior a la energía de distorsión por unidad de volumen unitario del mismo material cuando este se somete a cedencia en una prueba de tensión simple.

Cuando un material se deforma por una carga externa, tiende a almacenar energía internamente en todo su volumen. La energía por volumen unitario de material se llama densidad de energía de deformación. Si el material se somete a un esfuerzo uniaxial  $\sigma$ , la densidad de la energía de deformación queda definida por:

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (2.12)$$

Donde,  $\varepsilon$  es la deformación unitaria nominal del material.

Esta densidad de energía de deformación se puede considerar como la suma de dos partes, una que representa la energía necesaria para provocar

un cambio de volumen del elemento sin cambio de forma y la otra, que representa la energía necesaria para distorsionar el elemento.

Como la teoría de la energía de distorsión máxima requiere que  $u_d = (u_d)_y$ , entonces con los esfuerzos principales y en caso de esfuerzo plano o biaxial, se tiene:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_y^2 \quad (2.13)$$

Esta ecuación representa una curva elíptica como se muestra en la figura 2.5; si un punto del material se somete a esfuerzo de modo que las coordenadas del esfuerzo ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ) queden sobre él límite o fuera del área elíptica, se dice que el material falla.

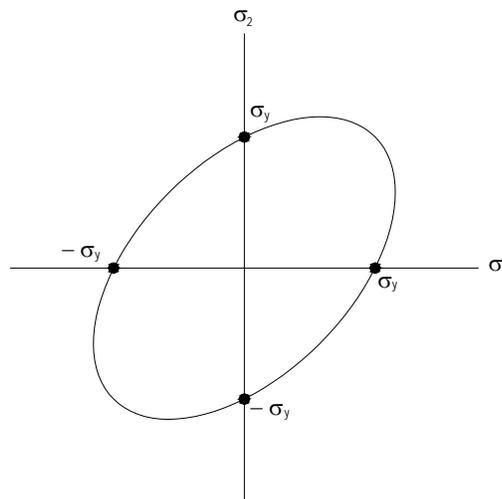


FIG. 2.5 TEORIA DE LA ENERGIA DE DISTORSIÓN MAXIMA

### 1.5.3 TEORÍA DEL ESFUERZO NORMAL MÁXIMO

La teoría del esfuerzo normal máximo establece que un material frágil fallara cuando el esfuerzo principal máximo  $\sigma_1$  en el material alcanza un valor limite igual al esfuerzo normal ultimo que el material puede soportar cuando se somete a tensión simple.

Si el material se somete a esfuerzo plano, es necesario que:

$$|\sigma_1| = \sigma_{ult}$$

$$|\sigma_2| = \sigma_{ult}$$

En la figura 2.6 se muestran gráficamente estas ecuaciones, en donde se observa que, si las coordenadas de esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ) en un punto del material, quedan sobre los límites o fuera del área rectangular, se dice que el material se fractura.

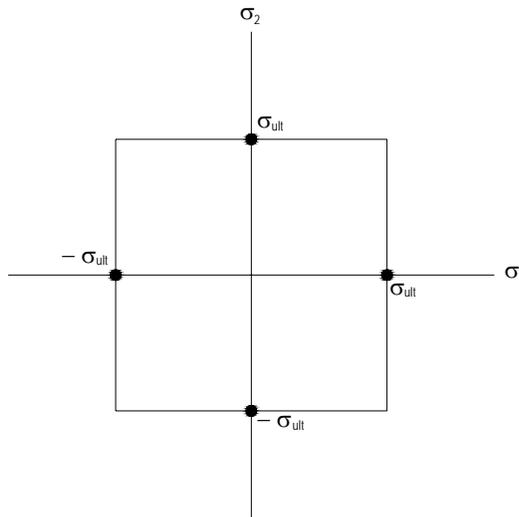


FIG. 2.6 TEORIA DEL ESFUERZO NORMAL MAXIMO

#### 1.5.4 CRITERIO DE FALLA DE MOHR

Algunos materiales frágiles se comportan diferente a tensión y a compresión, para predecir la falla en estos materiales se puede utilizar un criterio basado en el uso del círculo de Mohr.

Este criterio se puede representar mediante una gráfica de esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  (Fig. 2.7) en esta se observa que la falla ocurre cuando el valor absoluto de cualquiera de los esfuerzos principales alcanza un valor igual o mayor que  $\sigma_{ult}$  a tensión o  $\sigma_{ult}$  a compresión, o, en general, si el estado de

esfuerzo en un punto esta definido por la coordenada de esfuerzo principal ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) la cual se marca sobre los limites o fuera del área establecida.

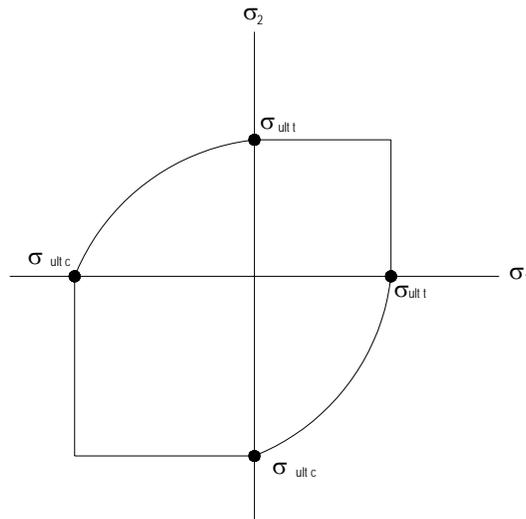


FIG. 2.7 CRITERIO DE FALLA DE MOHR

## 1.6 FALLAS POR FATIGA

Las Fallas por Fatiga siempre empiezan en una grieta. La grieta pudiera haber estado presente en el material desde su manufactura o haberse presentado a lo largo del tiempo, por causa de las deformaciones cíclicas cerca de las concentraciones de esfuerzos. Hay tres etapas de fallas por fatiga, la iniciación de la grieta, la propagación de la grieta y la fractura súbita causada por el crecimiento inestable de la grieta. La primera etapa puede ser de corta duración, la segunda etapa implica la mayor parte de la vida de la pieza y la tercera etapa es instantánea.

### 1.6.1 INICIACIÓN DE LA GRIETA

A escala microscópica los materiales no son homogéneos ni isotrópicos. Los huecos o inclusiones preexistentes servirán como elevadores de esfuerzo para la iniciación de la grieta.

Los materiales menos dúctiles no tienen la misma capacidad de fluencia plástica que los dúctiles por lo que tenderán a generar grietas con mayor rapidez. Los materiales frágiles (especialmente los fundidos) que no tienen fluencia pueden pasar por alto esta etapa inicial y llegar directamente a la propagación de grietas, en sitios de los huecos o inclusiones existentes, que sirven como micro grietas.

### 1.6.2 PROPAGACIÓN DE LAS GRIETAS

Una vez establecida una micro grieta (o si está presente desde el inicio), ésta crea concentraciones de esfuerzos lo que provoca una zona plástica en el extremo de la grieta cada vez que un esfuerzo a tensión la abre, lo que achata su extremo y reduce la concentración efectiva esfuerzo. La grieta crece un poco. Cuando el esfuerzo se alterna desde una régimen de esfuerzo a compresión hasta cero o hasta un esfuerzo a tensión lo bastante inferior la grieta se cierra la fluencia plástica cesa momentáneamente y de nuevo la grieta se vuelve aguda aunque con una dimensión mayor. Este proceso continúa en tanto el esfuerzo local en la punta de la grieta esté alternando desde por debajo del punto de fluencia a tensión, hasta por encima. Por lo que el crecimiento de la grieta se debe a esfuerzos a tensión, y la grieta crece a lo largo de planos normales al esfuerzo máximo a tensión es por esta razón que las fallas por fatiga se consideran causadas por esfuerzos a tensión.

### 1.6.3 FRACTURA

La grieta continuará en tanto estén presentes esfuerzos cíclicos lo que trae como consecuencia una falla súbita catastrófica sin advertencia. El examen a simple vista de las piezas falladas a la carga por fatiga muestra un patrón característico, de acuerdo a la siguiente figura. Hay una región que emana del sitio de la micro grieta original, que aparece como bruñida, y otra región aparte, que aparece mate y áspera con la apariencia de una fractura frágil. La región bruñida era la grieta, con marcas de playa, que así se llaman. Algunas veces de haber ocurrido mucho frotamiento entre las superficies de la grieta, las marcas de playa habrán sido borras, la zona frágil de falla es la porción que falló de manera súbita, cuando la grieta alcanzó su tamaño límite.

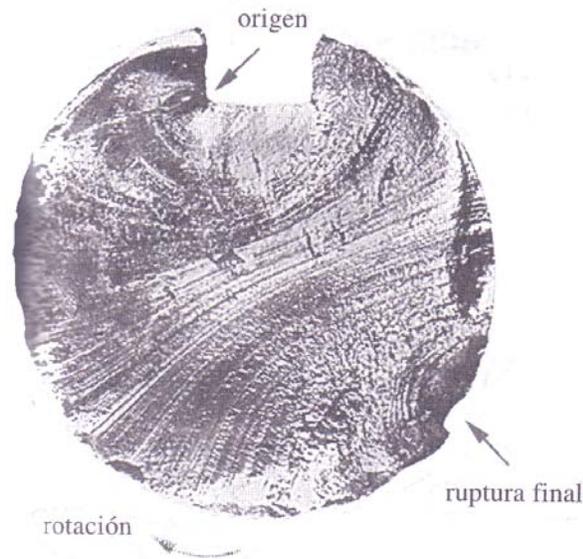


FIG. 2.8 PIEZA FALLADA A LA FATIGA..

## 1.7 CRITERIOS DE MEDICIÓN DE LAS FALLAS POR FATIGA

Existen diversas técnicas para medir la respuesta de los materiales a esfuerzos y deformaciones que varían con el tiempo. La mayor parte de la información fatiga-resistencia disponible corresponde a una viga giratoria a flexión totalmente alternante. En algunos casos no hay información sobre resistencia a la fatiga para el material deseado, entonces necesitamos algún medio de estimar el valor partiendo de los datos disponibles de resistencia estática.

### 1.7.1 PRUEBA DE LA VIGA ROTATIVA

La gran mayoría de los datos disponibles proviene de la prueba de la viga rotativa de R. R. Moore, en la cual una probeta de 0.3 pulgadas de diámetro se monta en un dispositivo que permite la aplicación de un momento a flexión pura de magnitud constante, al mismo tiempo que se hace girar a 1,725 R.P.M. Esto genera un esfuerzo a tensión totalmente alternante en cualquier punto de la circunferencia de la prueba. La prueba se efectúa hasta que ocurra la falla, quedando registrados los ciclos hasta la falla, así como el nivel de esfuerzo aplicado. Los datos que se obtiene se trazan entonces (por lo general

en coordenadas log-log) como una resistencia a la falla en función del número de ciclos  $N$ , para obtener un diagrama S-N.

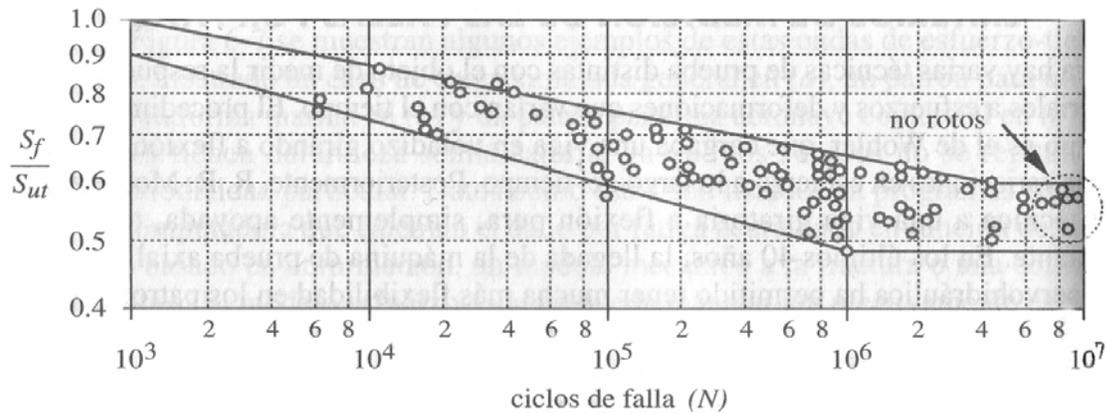


FIG. 2.9 GRÁFICA LOG-LOG DE CURVAS COMPUESTAS S-N PARA ACEROS FORJADOS.

En la gráfica se observa que la resistencia a la fatiga “S” se reduce uniformemente y de manera lineal como una función de  $N$  hasta llegar a un codo. Este codo define un límite de resistencia a la fatiga “ $Se'$ ” para el material, que es el nivel de esfuerzo por debajo del cual es posible alternar de manera infinita sin falla. El límite de resistencia a la fatiga se emplea sólo para representar la resistencia de vida infinita de aquellos materiales que sí la tienen.

Charles R. Mischke ha analizado muchos datos de pruebas reales provenientes de varias fuentes y concluyó que el límite de resistencia a la fatiga, o de fatiga, puede estar relacionado en realidad con la resistencia a la tensión. En el caso de aceros, la relación es

$$Se' = \begin{cases} 0.504 Sut & Sut \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 0.504 \text{ Kpsi} & Sut \geq 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & Sut \geq 1400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Donde “ $S_{ut}$ ” es la resistencia ultima a la tensión. La marca de prima en  $S_e'$  en esta ecuación indica probeta de viga rotatoria porque el símbolo “ $S_e$ ” se reservará para el límite de fatiga de un elemento de máquina particular sujeto a cualquier clase de carga.

### 1.7.2 ESFUERZOS FLUCTUANTES

En muchas ocasiones, los esfuerzos fluctúan sin pasar por cero. La figura 2.10 muestra algunas de las diversas relaciones esfuerzo-tiempo que se pueden presentar.

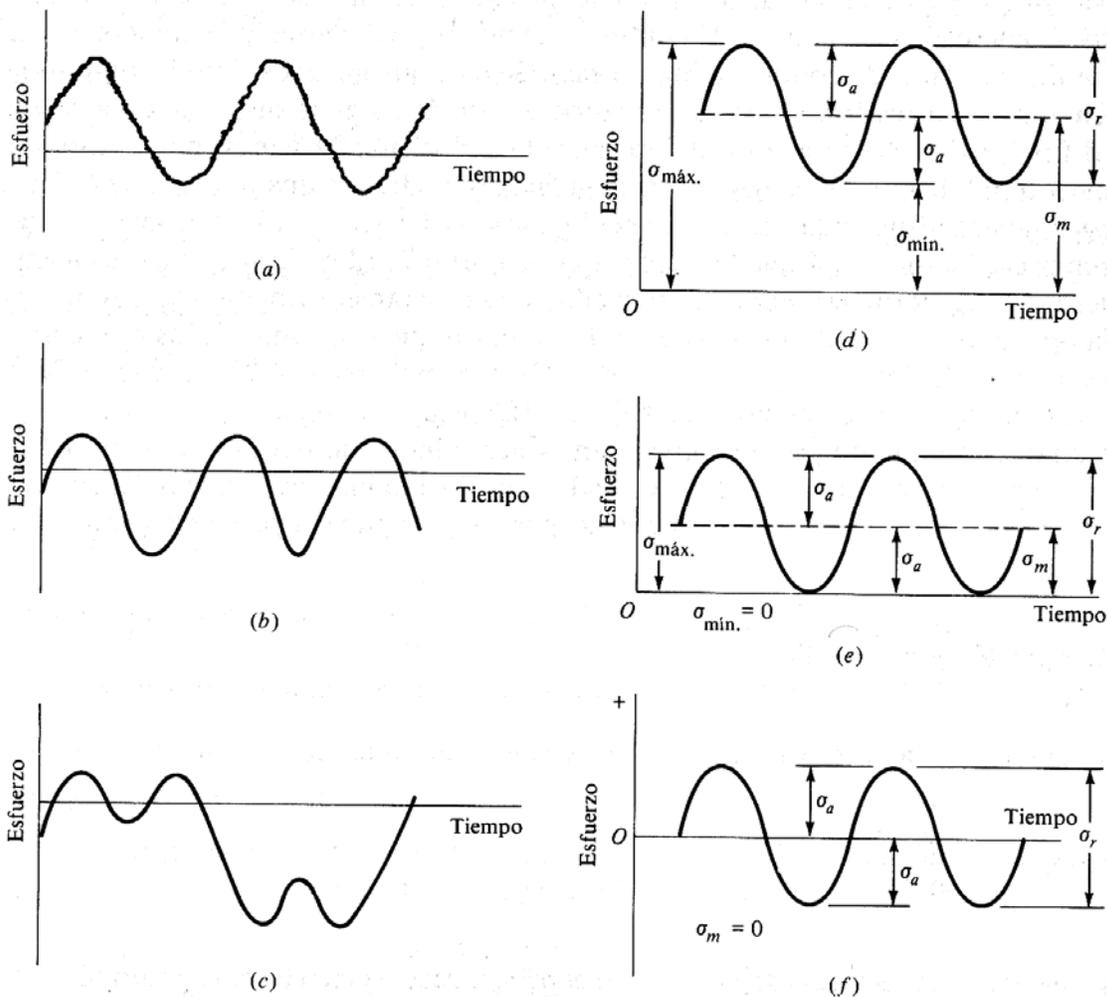


FIG. 2.10 ALGUNAS RELACIONES ESFUERZO-TIEMPO: A) ESFUERZO FLUCTUANTE CON FLUCTUACIONES CON PULSACIONES DE ALTA FRECUENCIA; B) Y C) ESFUERZO FLUCTUANTE NO SENOIDAL; D) ESFUERZO FLUCTUANTE SENOIDAL; E) ESFUERZO REPETIDO; ESFUERZO ALTERNANTE SENOIDAL CON INVERSIÓN COMPLETA.

El esfuerzo estacionario o estático no es igual al esfuerzo medio. De hecho, puede tener cualquier valor entre  $\sigma_{\min}$  y  $\sigma_{\max}$ . Los subíndices de estas componentes se aplican tanto a esfuerzos normales como a cortantes. La relación que existe entre estos dos esfuerzos da origen a los llamados esfuerzos medios “ $\sigma_m$ ” y esfuerzos alternantes “ $\sigma_a$ ”.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\min} + \sigma_{\max}}{2} \quad (2.14)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\min} - \sigma_{\max}}{2} \quad (2.15)$$

## 1.8 FACTORES QUE MODIFICAN EL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA

No es realista esperar que el límite de fatiga de un elemento mecánico o estructural resulte igual a uno de los valores obtenidos en el laboratorio. Por lo que se ha propuesto una clasificación de algunos de los factores que modifican el límite de fatiga.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e' \quad (2.16)$$

Donde

$S_e$  = Límite de resistencia a la fatiga del elemento mecánico.

$S_e'$  = Límite de resistencia a la fatiga de la muestra de viga rotatoria.

$k_a$  = Factor de superficie.

$k_b$  = Factor de tamaño.

$k_c$  = Factor de carga.

$k_d$  = Factor de temperatura.

$K_e$  = Factor de efectos diversos.

### 1.8.1 FACTOR DE SUPERFICIE $K_a$

La superficie de la probeta de la viga rotatoria está perfectamente pulida y recibe un pulimiento final en dirección axial para eliminar cualesquiera rayaduras circunferenciales. Los factores de modificación dependen de la calidad del acabado y de la resistencia a la tensión.

$$K_a = aSut^b \quad (2.17)$$

La tabla 2.1 muestra los diferentes valores que pueden tomar las variables de la ecuación 2.17 la cual determina el valor del factor de superficie.

ACABADO DE SUPERFICIE	FACTOR a		EXPONENTE b
	Kpsi	Mpsi	
Esmerilado (rectificado)	1,34	1,58	-0,085
Maquinado o estirado en frío	2,70	4,51	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Forjado	39,9	272	-0,995

TABLA 2.1 FACTORES DE ACABADOS DE SUPERFICIES

### 1.8.2 FACTOR DE TAMAÑO $K_b$

El factor utilizado es para piezas circulares

$$K_b = \begin{cases} \frac{d^{0.1133}}{0.3} \text{ in} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ \frac{d^{0.1133}}{7.62} \text{ mm} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ mm} \end{cases}$$

Cuando se utiliza una sección no circular se necesita utilizar un área efectiva  $d_e$  obtenida al igualar el volumen del material sometido a un nivel de esfuerzo igual a o superior al 95 % del esfuerzo máximo con el mismo volumen de probeta de viga rotatoria. Lo que da por resultado que las longitudes se cancelen y necesitan considerarse únicamente las áreas.

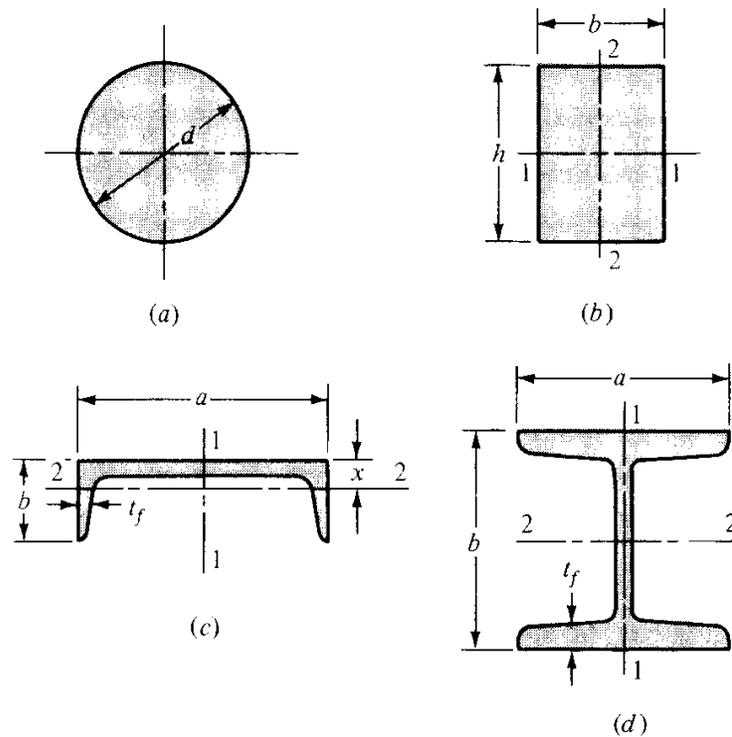


FIG. 2.11 A) BARRA REDONDA MACIZA; B) BARRA DE SECCIÓN RECTANGULAR; C) CANAL; D) VIGA I DE PATÍN ANCHO.

La figura 2.11 muestra una barra redonda maciza, una barra de sección rectangular junto con un perfil de canal y una viga de patín ancho.

El área del 95% de esfuerzo de la viga I de patín ancho es

$$K_c = \begin{cases} 0.10 a f_r & \text{eje 1-1} \\ 0.05 b a & \text{eje 2-2} \end{cases}$$

### 1.8.3 FACTOR DE CARGA $K_c$

El factor de carga está dado por la ecuación

$$K_c = \begin{cases} 0.923 & \text{carga axial} & S_{ut} \leq 220 \text{ kpsi (1520 MPa)} \\ 1 & \text{carga axial} & S_{ut} > 220 \text{ kpsi (1520 MPa)} \\ 1 & \text{flexión} & \\ 0.577 & \text{torsión y cortante} & \end{cases}$$

### 1.8.4 FACTOR DE TEMPERATURA $K_d$

Si se conoce el límite de resistencia a la fatiga a la temperatura del lugar de trabajo se utiliza la fórmula

$$K_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (2.18)$$

TEMPERATURA, °C	$S_T/S_{RT}$	TEMPERATURA, °F	$S_T/S_{RT}$
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.927	700	0.927
400	0.922	800	0.872
450	0.840	900	0.797
500	0.766	1000	0.698
550	0.670	1100	0.567
600	0.546		

TABLA 2.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN SOBRE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN DEL ACERO. ( $S_T$  = RESISTENCIA A LA TENSIÓN A LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN;  $S_{RT}$  = RESISTENCIA A LA TENSIÓN A LA TEMPERATURA DEL LUGAR DE TRABAJO).

#### 1.8.5 FACTOR DE EFECTOS DIVERSOS $K_e$

Las fallas por fatiga resultan fallas por tensión, por lo que, todo lo que lo reduzca también disminuirá la posibilidad de una falla por fatiga. Hay operaciones como graneado (o picadura) con perdigones, martillado y laminado en frío, las cuales originan esfuerzos de compresión en la superficie de una pieza y ayudan en gran medida a mejorar el límite de resistencia a la fatiga.

Corrosión. Es de esperar que, en piezas que funcionan en ambientes corrosivos, ocurra una disminución en su resistencia a la fatiga. Esto sucede, y se debe al ataque o picadura de la superficie a causa del material corrosivo.

Recubrimiento electrolítico. Los recubrimientos metálicos, como los de los procesos de cromado, niquelado o cadmizado, reducen el límite de resistencia a la fatiga hasta en 50%. El galvanizado (o revestimiento con zinc) no afecta la resistencia a la fatiga.

Corrosión por apriete. Este fenómeno es el resultado del movimiento microscópico en la superficie de piezas mecánicas o estructuras estrechamente ajustadas. Lo anterior ocurre en juntas atornilladas, cojinetes, cubos de ruedas y en todo conjunto de piezas de montaje apretado.

#### 1.9 RESISTENCIA A LA FATIGA EN EL CASO DE ESFUERZOS FLUCTUANTES

Ya definidas las diversas componentes de esfuerzo relacionadas con el trabajo de un elemento sometido a esfuerzo fluctuante, conviene variar el



FIG. 2.12 DIAGRAMA DE GOODMAN MODIFICADO QUE MUESTRA TODAS LAS RESISTENCIAS Y LOS VALORES LIMITES DE LAS COMPONENTES DE ESFUERZO PARA UN ESFUERZO MEDIO PARTICULAR.

La gráfica de fallas para esfuerzos medios muestra otra manera de presentar los resultados de un ensayo. Aquí la abscisa representa la relación de la resistencia media a la resistencia última, mientras que la tensión se indica a la derecha y la compresión a la izquierda del origen. La ordenada es la relación de la resistencia alterna al límite de resistencia a la fatiga. Entonces la recta  $BC$  representa el criterio de Goodman modificado para los casos de falla (figura 2.13).

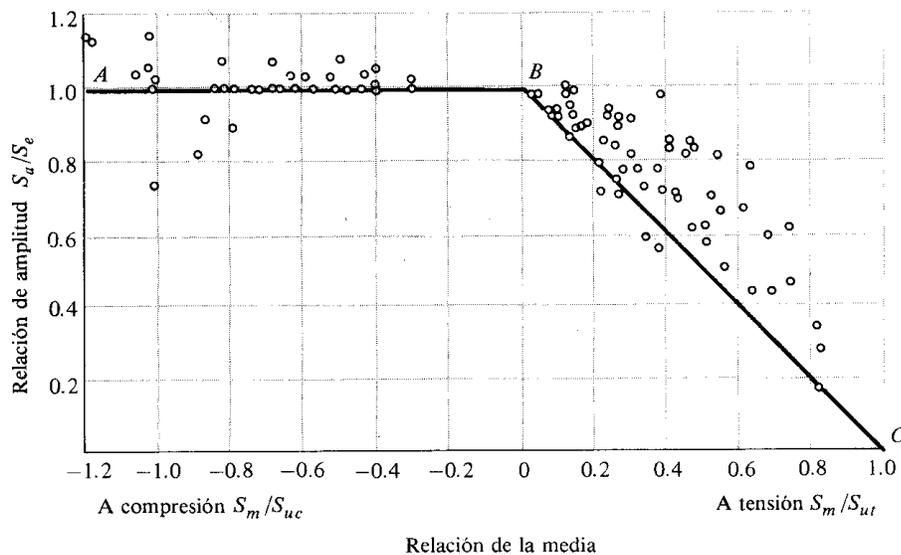


FIG. 2.13 GRÁFICA DE FALLAS POR FATIGA PARA ESFUERZOS MEDIOS EN LAS EN LAS REGIONES DE TENSIÓN Y COMPRESIÓN.

En la figura 2.14 se presentan cuatro criterios de falla: la línea de Soderberg, la línea de Goodman modificada, la línea de Gerber y la línea de fluencia o cedencia, esta vez utilizando como puntos limites las resistencias en vez de relaciones de resistencias, en donde el eje de las ordenadas se representan los límites de fatiga ya corregidos.

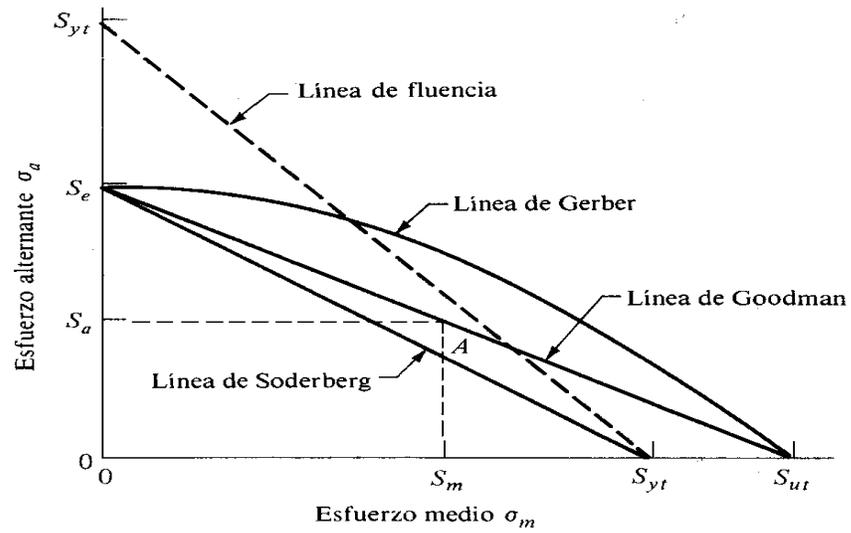


FIG. 2.14 DIAGRAMA DE FATIGA QUE REPRESENTA DIVERSOS CRITERIOS DE FALLA. PARA CADA CRITERIO, LOS PUNTOS SOBRE Y FUERA DE LA LÍNEA RESPECTIVA INDICAN FALLA.

## **2.1 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA INSPECCIÓN CON LÍQUIDOS PENETRANTES.**

I. El siguiente procedimiento describe los métodos y tipos inspección por líquidos penetrantes. De acuerdo a las normas NOM-B-133B, ASTM E-165-95, ASME SE-165, Inspección por Líquidos Penetrantes.

II. Este procedimiento es aplicable sólo para la detección de discontinuidades abiertas a la superficie tales como grietas, costuras, traslapes, traslapes en frío, laminaciones, fugas, faltas de fusión, poros, inclusiones no metálicas, etc.

### **1. Fundamentos**

#### **Capilaridad y tensión superficial**

La penetración por capilaridad es una propiedad que tienen algunos fluidos y que modifica los efectos de algunos principios fundamentales de la física, como puede ser la ley de la gravedad y los vasos comunicantes.

Ello se debe a la propiedad denominada tensión superficial, la cual origina una cohesión entre las moléculas superficiales de los líquidos que hace como si éstos estuviesen recubiertos por una ligera película de plástico, capaz de resistir una determinada tensión.

La existencia de la tensión superficial se demuestra en la práctica, por la formación de gotas de agua sobre una superficie lisa no absorbente. El agua que compone la gota no se desparrama, sino que se contrae por efecto de la tensión superficial que tiende a que la cantidad de agua contenida se concentre en un volumen de superficie mínima como es una esfera.

Esto es más claro en el caso del mercurio que tiene mayor tensión superficial y sus gotas forman esferas casi perfectas, o en el caso del alcohol, que con una tensión superficial inferior, forma gotas mucho más aplanadas.

Se dice por tanto que hay líquidos que "mojan" más que otros y esto tiene un reflejo más claro en el interior de tubos de muy pequeño diámetro interior llamados capilares, en los cuales los líquidos cuyo ángulo de mojado es superior a 90 grados ascenderán menos de lo que les corresponde y los que tienen un ángulo de mojado menor de 90 grados ascenderán por encima de la superficie del líquido circundante.

Este fenómeno de capilaridad, cuyos efectos son diferentes a los que se producirían en tubos de mayor diámetro, se producen también si en vez de tubos se colocan dos láminas paralelas muy próximas. Los líquidos que "mojan" penetrarán en el espacio entre las láminas, por encima de su propia superficie, a causa de una fuerza que es proporcional a su tensión superficial y al coseno del ángulo de mojado.

Las pequeñas grietas superficiales que se pueden encontrar en la superficie de materiales metálicos y otros elementos como plásticos, caucho y elementos cerámicos, actúan también como capilares y favorecen la penetración en las mismas de fluidos que tengan reducida tensión superficial, independientemente de su situación en el espacio.

Esto significa que las microcavidades del material ejercen una fuerza de atracción sobre los líquidos de reducida tensión, independientemente de su orientación. No es la gravedad la que hace que líquido se introduzca, sino otra fuerza independiente que no tiene que ver con que la grieta se encuentra horizontal o en posición boca abajo. Este fenómeno es aprovechado en la técnica de líquidos penetrantes cuya descripción genérica es como sigue:

Sobre una superficie limpia se esparce un líquido de color llamativo y de muy baja tensión superficial, el cual penetrará en las grietas o poros que eventualmente contenga el material y que se encuentren en contacto con el aire. Posteriormente y mediante lavado, se elimina este líquido de la superficie del material, de forma que quede solamente el que ha penetrado en su interior. Una vez seca la superficie se rocía sobre ella un material revelador capaz de absorber al penetrante. Las huellas de éste delatarán los lugares en donde se había producido acumulación y por lo tanto nos darán una indicación de la magnitud y forma de los defectos.

Como antes se indicó, la técnica es sencilla, pero con el fin de obtener unos resultados fiables, es preciso definir las condiciones operacionales que han de ser cuidadosamente desarrolladas y los productos más adecuados para el proceso elegido.

## **2. Clasificación de los métodos y tipos de líquidos<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> ASME SE-165, Inspección por Líquidos Penetrantes.

2. 1 Los líquidos penetrantes consisten de penetrantes fluorescentes y con colorante visible, emulsificadores, solventes removedores y reveladores.

2. 2 No es recomendable el mezclado de materiales de diferentes fabricantes.

2. 3 Los materiales usados para la inspección no deben afectar adversamente las piezas que van a examinarse.

2. 4 Los materiales penetrantes pueden ser flamables o emitir vapores peligrosos o tóxicos, es importante llevar a cabo todas las indicaciones y precauciones recomendadas por el fabricante.

2. 5 Los métodos y tipos inspección con líquidos penetrantes son clasificados como se indica en la siguiente tabla.

<b>Método A "Penetrantes Fluorescentes"</b>	
Tipo 1	Lavables con agua (A-1)
Tipo 2	Postemulsificables (A-2)
Tipo 3	Removibles con solvente (A-3)
<b>Método B "Penetrantes con Colorante Visible"</b>	
Tipo 1	Lavables con agua (B-1)
Tipo 2	Postemulsificables (B-2)
Tipo 3	Removibles con solvente (B-3)

2

2. 6 Después de una inspección con penetrante visible no se debe de efectuar una inspección con un penetrante fluorescente.

### 3. Requisitos generales

3. 1 La temperatura de los materiales penetrantes y la superficie de la pieza a inspeccionar debe estar entre 16° y 52°C.

3. 2 Cuando sea requerida la prelimpieza, se pueden emplear los agentes comunes de limpieza como son: detergentes, solventes orgánicos, soluciones de desincrustantes, removedores de pintura o desengrasantes. La limpieza por métodos abrasivos no es recomendable.

<sup>2</sup> NOM-B-133B-1990

## 4. Condiciones para la examinación

### 4.1 Limpieza.

La superficie a inspeccionar y áreas adyacentes al menos hasta 25 milímetros deben estar secas y limpias; libres de polvo, oxido, fundente de soldadura, salpicaduras, grasa, pintura, películas de aceite, suciedad, etcétera, o cualquier material que pueda cubrir las aberturas superficiales o interferir con la inspección.

La preparación de la superficie del material a inspeccionar debe estar orientada a evitar cualquier obstáculo que pueda tapar o eliminar el acceso a las discontinuidades del material.

Dichos obstáculos pueden estar ocasionados por suciedad, escoria, pintura, óxidos e incluso acumulación de material, virutas o rebabas procedentes de procesos de conformado mecanizado o manual.

Se evitarán, por lo tanto, procesos de limpieza tales como el cepillado, lijado, que puedan aportar nuevas partículas que no permitan la entrada a las grietas o poros, acudiendo a procesos de limpieza química, como puede ser el decapado con desoxidantes ácidos o alcalinos, el lavado con soluciones detergentes o el desengrasado con vapor o disolventes.

Igualmente los restos de pintura que se pretendan eliminar se extraerán con métodos que impidan su incrustación en las fisuras y el taponado de los accesos a las discontinuidades existentes.

Los productos detergentes utilizados se elegirán teniendo en cuenta los posibles ataques químicos que se le puedan ocasionar al material.

### 4.2 Secado después de la limpieza.

Las piezas deben estar perfectamente secas después de limpiarse. El secado puede efectuarse en hornos de secado, con lámparas infrarrojas, aire caliente a presión o a la temperatura ambiente. La temperatura de la pieza no debe exceder de 52°C antes de la aplicación del penetrante.

### 4.3 Aplicación del penetrante.

El penetrante se puede aplicar por diferentes métodos: inmersión, con brocha, por flujo o por atomización. Toda la pieza o área de interés debe estar completamente cubierta con el líquido penetrante.

### 4.4 Tiempo de penetración.

Después de la aplicación, permitir que el exceso de penetrante escurra

(debe evitarse la formación de charcos). El tiempo de penetración debe ser el recomendado según el tipo de penetrante y condiciones de la examinación.

#### 4. 5 Remoción del exceso de penetrante.

Después de haber transcurrido el tiempo de penetración requerido, remover el exceso de penetrante como se menciona a continuación:

##### 4. 5. 1 Penetrantes lavables con agua.

a) Pueden removerse directamente con agua usando un equipo manual, semiautomático, atomización o por inmersión.

b) La presión del agua debe ser constante y no exceder de 50 psi (345 KPa ). Se recomienda un atomizado grueso. Mantener relativamente constante la temperatura del agua en un intervalo de 16° a 43°C.

c) Evitar el sobrelavado. Para penetrantes fluorescentes efectuar la operación bajo luz negra. Cuando no se disponga de suficiente agua para el enjuague puede efectuarse la remoción frotando la superficie con un material limpio y absorbente, empapado con agua hasta que el exceso de penetrante sea removido.

##### 4. 5. 2 Penetrantes removibles con solvente.

El exceso de penetrante puede ser removido empleando material absorbente limpio que no deje pelusa y repetir la operación hasta eliminar cualquier indicio de penetrante. La última etapa de remoción se efectúa con un material absorbente humedecido ligeramente con solvente removedor. Evitar el uso excesivo de solvente para minimizar la remoción del penetrante de las discontinuidades.

Está prohibido aplicar directamente sobre la superficie el solvente después de la aplicación del penetrante y antes del revelado.

##### 4. 5. 3 Secado de las piezas.

a) Las piezas pueden secarse usando estufas de recirculación de aire caliente, con aire a presión libre de aceite con una presión que no exceda 50 psi o exponiéndolas a la temperatura ambiente. La temperatura en el secador es mantenida normalmente entre 79° y 107°C, para la mayoría de las aplicaciones. La temperatura de la pieza no debe exceder de 52°C.

b) No se permite que las piezas permanezcan en estufas de secado por un tiempo mayor que el necesario para secarlas. El tiempo de secado varía con el tamaño, naturaleza y el número de piezas.

c) En el caso de penetrantes removibles con solvente, permitir el secado por una evaporación normal. Generalmente no se requiere otra técnica de secado, mientras que en el intervalo de temperatura del procedimiento, debe de estar dentro de 16° a 52°C.

#### 4. 5. 4 Aplicación de revelador.

a) Aplicar los reveladores inmediatamente después de que el exceso de penetrante haya sido removido de la superficie de la pieza, antes de secar en el caso de reveladores acuosos, e inmediatamente después de que la pieza haya sido secada para todos los otros tipos de reveladores.

b) La aplicación se puede efectuar por baño, inmersión, atomización o espolvoreando el revelador. El tamaño, forma, condición de la superficie, número de piezas que van a ser procesadas, etc., determinan la selección de revelador.

c) Aplicar los reveladores de polvo seco después del secado. Las piezas pueden ser sumergidas en un recipiente con revelador seco, también pueden ser espolvoreadas con el revelador en polvo, manual o mecánicamente. El exceso de polvo puede removerse sacudiendo o golpeando la pieza ligeramente o soplando con aire comprimido a baja presión (5 a 10 psi) entre 34 a 69 KPa., el aire debe de estar seco y limpio.

d) Aplicar los reveladores acuosos inmediatamente después de que el exceso de penetrante haya sido removido de ésta y antes del secado. Preparar y mantener el revelador acuosos conforme a las instrucciones del fabricante.

e) Aplicar los reveladores acuosos por rocío o sumergiendo la pieza. Normalmente la pieza se sumerge en el baño de revelador. Escurrir todo el exceso del revelador de las secciones huecas y lo retenido para eliminar la tendencia al encharcamiento, lo cual podría diluir las indicaciones. A continuación se deberá de secar las piezas.

f) Aplicar el revelador húmedo no acuoso a la pieza por rocío después de que el exceso de penetrante haya sido removido y la pieza esté seca. Este tipo de reveladores se evaporan rápidamente a temperatura ambiente y no requieren, por lo tanto, del uso de un secador. Sin embargo, debe usarse ventilación adecuada.

g) No se permite sumergir o empapar la pieza con reveladores no acuosos, dado que éstos disuelven el penetrante de las discontinuidades debido a su acción solvente.

h) Aplicar los reveladores líquidos tipo película por rocío o inmersión como los recomienda el fabricante.

#### 4. 6 Tiempo de revelado.

El tiempo que el revelador debe permanecer en la pieza antes de ser inspeccionada, debe ser como mínimo 7 minutos. El tiempo de revelado inicia inmediatamente después de que el revelador en polvo seco se aplica y tan pronto como el recubrimiento del revelador (acuoso y no acuoso) se seca. Si la absorción del penetrante no altera los resultados de la inspección, se permite periodos de revelado mayores de 30 minutos.

#### 4. 7 Inspección.

a) Las superficies deben observarse durante la aplicación del revelador para monitorear el desarrollo de indicaciones que tiendan a sangrar demasiado. La interpretación final debe efectuarse después de que el penetrante haya sangrado de 7 a 30 minutos.

b) Para inspecciones críticas con penetrantes fluorescentes se permite una luz ambiental máxima de 9.8 Candelas/m. Pueden usarse niveles altos para inspecciones no críticas, si la oscuridad es difícil de obtener.

c) La intensidad de la luz negra debe medirse sobre la superficie de la pieza bajo inspección, debiendo obtener un mínimo recomendado de 800 W / cm<sup>2</sup>. Encender la luz negra por lo menos cinco minutos antes de usarla o medir su intensidad.

d) Las indicaciones de penetrantes con colorante visible pueden observarse con luz blanca natural o artificial. Para la obtención de una buena sensibilidad se recomienda tener en el sitio de la inspección un intensidad mínima de 106. 6 Candelas/m.

#### 4. 8 Método de evaluación.

Se tomará en cuenta el tamaño de las indicaciones obtenidas durante el intervalo del tiempo después de la aplicación del revelador. La evaluación puede ser efectuada de dos formas distintas;

a) Por comparación con las fotografías estándar de referencia en la norma ASTM E 433-71.

b) Por dimensionamiento directo de las indicaciones obtenidas.

#### 4. 9 Limpieza posterior.

Puede emplearse una técnica adecuada, tal como un simple enjuague con agua, máquinas de lavado, desengrasado por vapor, con solvente, limpieza con ultrasonido, agua con detergente o flujo de aire libre de aceite.

## **5. Requisitos Especiales.**

### **5. 1 Contenido de azufre, cloruros y fluoruros.**

En la inspección de aceros inoxidables austeníticos, aleaciones base titanio o níquel, es necesario restringir el contenido total de iones cloruro / fluoruro, el contenido total de cloro/flúor y el contenido de azufre. El contenido de cloro debe limitarse al 1% en donde el uso potencial incluye las aplicaciones a aceros inoxidables austeníticos o titanio. El contenido de azufre debe limitarse al 1% donde el uso potencial incluye las aplicaciones a aleaciones base níquel a elevadas temperaturas.

## **6. Interpretación y evaluación de resultados**

Una vez transcurrido el tiempo de revelado se procederá a interpretar los resultados y a evaluarlos con respecto a los criterios de aceptación o rechazo que el procedimiento tenga establecidos.

Hay que indicar que la correcta interpretación de toda inspección por líquidos penetrantes está inherida en gran medida por el cuidado con el que se haya desarrollado la secuencia de operaciones. Durante la descripción del proceso ha quedado claro la complementariedad de los distintos productos y los fundamentos que actúan unos sobre otros. De ello puede deducirse, que la falta de limpieza inicial de las superficies, las manchas y contaminaciones de unos productos con otros y los falsos contactos con las manos, trapos u otros materiales impregnados con alguno de ellos, puede contribuir a la anulación del ensayo o a distorsionar gravemente los resultados del mismo.

Si el ensayo se ha realizado con cuidado y se han seguido las indicaciones del procedimiento aplicable, los resultados serán fáciles de interpretar y quedarán claramente diferenciadas las indicaciones debidas a defectos en el material y las que corresponden a otro tipo de indicaciones consecuencia de la peculiar geometría o característica de construcción de las piezas.

Las condiciones ambientales en las que se debe realizar la interpretación, serán las descritas para el ensayo, en especial en lo que se refiere a la iluminación, tanto si se trata de penetrantes visibles, como de penetrantes fluorescentes.

La evaluación de resultados del análisis consiste en comparar las indicaciones obtenidas, con el criterio de aceptación o rechazo señalado en el procedimiento o la norma que se haya decidido aplicar y puede ser realizado por el propio operador del ensayo o por otra persona de mayor responsabilidad. En ambos casos, la interpretación debe concluir con la redacción de un informe en el que se señalen las características del ensayo y los resultados del mismo, mediante su indicación clara sobre un croquis de la pieza, complementando con una explicación escrita, lo más completa posible, acerca de las particularidades de las discontinuidades detectadas.

En cualquier caso, el informe ha de ser conservado, a fin de mantener un registro del ensayo, a los efectos de la justificación del rechazo del material.

Al finalizar el ensayo, la pieza debe quedar en la misma condición antes del aplicación del ensayo, para lo cual se llevará a cabo una limpieza final, de acuerdo con el método desarrollado para la inspección y los productos utilizados en las distintas operaciones.

## 6. 1 Calificación y Recalificación

a) La calificación de procedimientos requiere de pruebas equivalentes contra un procedimiento generalmente aprobado. La equivalencia es determinada por comparación directa en comparadores de penetrantes o en piezas de prueba respectivas, o ambas.

b) La recalificación se requiere cuando se hace un cambio o una sustitución en el tipo de materiales penetrantes o en la técnica del proceso de inspección.

## 7. Reporte de Inspección.<sup>3</sup>

Debe elaborarse un reporte de cada examinación efectuada. Este reporte debe incluir al menos la siguiente información:

- a) figura o dibujo de las piezas.
- b) la figura debe de indicar la localización de las indicaciones obtenidas.
- c) se debe de especificar la técnica y tipo de sistema penetrante.
- d) descripción e identificación de las piezas.
- e) tipo y proceso del material.

---

<sup>3</sup> De acuerdo a la norma NOM-B-133B

- f) acabado superficial.
- g) tiempo de penetración.
- h) nombre del técnico.

## **3.2 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.**

### **1.0 Alcance**

Se describirá el uso y técnicas de la inspección por partículas magnéticas. En general se tomarán en cuenta las normas NOM B-124-91, ASTM E- 709 y ASME- SE- 709. Métodos de inspección por partículas magnéticas.

Se proporcionarán detalles adicionales que deben ser considerados en el método que se utilice.

El método de inspección por partículas magnéticas, se utiliza para detectar fallas y discontinuidades en la superficie y algunas subsuperficiales, de materiales ferromagnéticos. La sensibilidad es mayor en la superficie de la discontinuidad y disminuye rápidamente aumentando la profundidad de la discontinuidades.

Los tipos de discontinuidades más frecuentes que se pretende detectar por éste método son: grietas, traslapes, costuras y laminaciones. Por éste método, primero se magnetiza el área a inspeccionar y se aplican partículas ferromagnéticas (medio de inspección) a la superficie.

Las partículas formarán líneas en la superficie, donde las grietas y otras discontinuidades distorsionan el campo magnético normal. Estas líneas son características de la discontinuidad que se está detectando.

Cualquier técnica que se esté utilizando para producir el flujo magnético de una pieza, la sensibilidad máxima debe alinear la discontinuidades orientándolas perpendicularmente hacia las líneas de flujo. Para una óptima detección de todos los tipos de discontinuidades, cada área deberá inspeccionarse al menos dos veces, colocando en la segunda las líneas de flujo perpendiculares a la primera.

### **1.0 Alcance y Fundamentos.**

#### **Flujo magnético.**

Las líneas de fuerza de un circuito magnético, siempre retornan a ellas mismas para formar una trayectoria cerrada. De aquí que un circuito magnético esté siempre cerrado. Al número total de líneas magnéticas existentes en un circuito se le denomina "flujo magnético". Su unidad es sólo una línea de fuerza llamada "Maxwell".

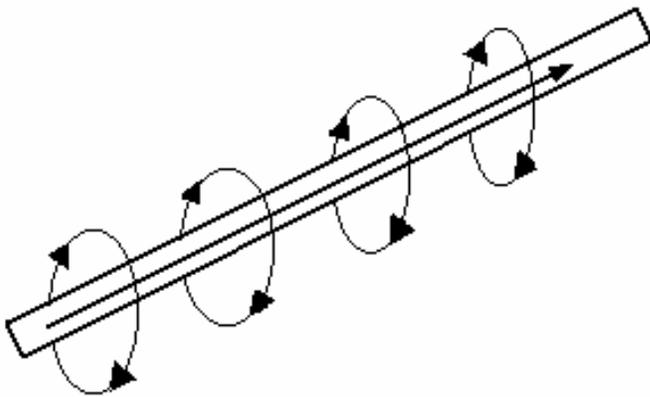
### **Densidad de flujo o inducción.**

Este es el flujo por área de unidad, a través de una unidad de área en ángulos rectos a la dirección del flujo. Se le designa generalmente por la letra (B) y su unidad es el "Gauss".

### **Permeabilidad.**

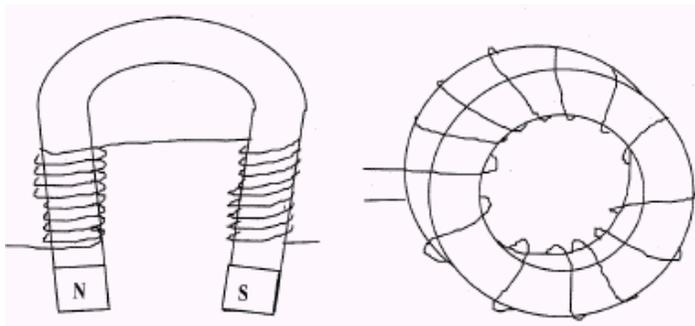
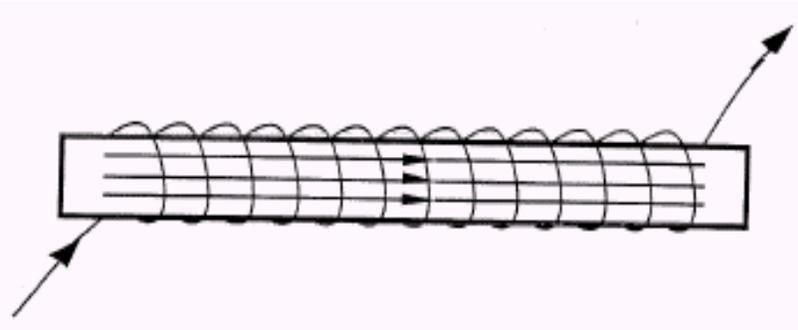
Permeabilidad es un término que se utiliza para referirse a la facilidad con que un flujo magnético puede establecerse en un circuito magnético dado.

### **Creación de un campo magnético.**



La inducción de los imanes naturales y la engendrada por ellos en otros materiales, tienen un valor limitado. Por aplicación del descubrimiento de Osted, sabemos que una corriente eléctrica puede inducir un campo magnético, sobre un material apropiado. En efecto, si hacemos pasar por un conductor cualquiera una corriente eléctrica, se induce un campo magnético circular que rodea dicho conductor, y este procedimiento va a ser utilizado para alcanzar valores de inducción más importantes y controlables que los que podrían proporcionar los imanes naturales.

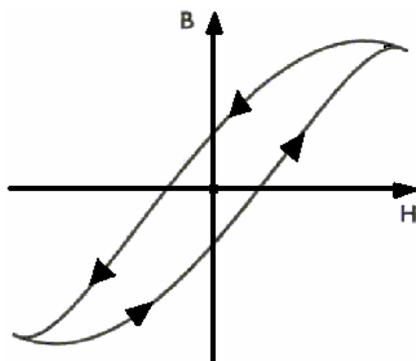
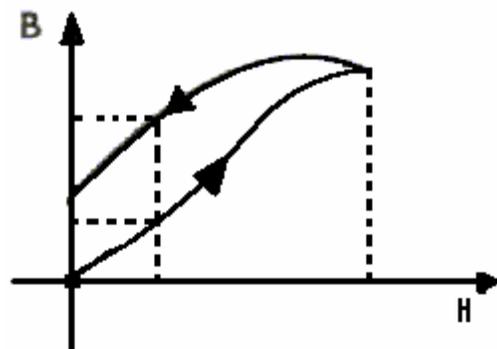
Sin embargo, el caso más utilizado es el contrario, hacer pasar la corriente por una espira a fin de crear un campo magnético lineal, en la pieza rodeada por dicha espira. En la práctica se utilizan varias espigas juntas y continuas, formando una espiral, lo que en física es conocido como un solenoide.



Las espiras del solenoide pueden estar enrolladas alrededor de una pieza de cualquier forma, siendo típico el enrollamiento sobre una pieza en forma de herradura, imitando la clásica configuración de un imán, o sobre un núcleo circular en el que se juntan las terminales de las espiras formando un toroide.

**Magnetismo remanente.**

Si en un material ferromagnético, inicialmente desmagnetado, se excita desde cero y en forma continua, un campo se crea en el mismo flujo, cuya densidad va aumentando de valor según una curva similar descrita como la siguiente figura.



Si a continuación se hace disminuir la excitación magnética, no seguirá el mismo camino, sino que la curva de desimantación sí que una ruta por encima de la imantación. Para una excitación de valor "n" durante la imantación, se obtenía una densidad de flujo "g" durante la imantación, mientras que durante la desimantación, para esta misma excitación, la pieza permanece imantada con una densidad de flujo "e".

### **Ciclo de histéresis.<sup>4</sup>**

A este fenómeno se le denomina Histéresis, que significa quedarse atrás, y su ciclo de imantación-desimantación, es muy similar al de la ilustración anterior. Se ve que la densidad de flujo de la muestra, no depende únicamente de la excitación magnética, sino también de la historia magnética de la misma. El material tiene memoria magnética, si ha sido imantado anteriormente, aunque se haya suprimido después el campo magnetizante. Al suprimir totalmente la excitación magnética, se ha convertido el material en un imán permanente.

Un material puede ser desimantado, invirtiendo el campo magnetizante un cierto número de veces y disminuyendo su intensidad en cada inversión.

## **1.1 CAMPO MAGNETICO COMO MEDIO DE INSPECCION.<sup>5</sup>**

### **Campo de fuga.**

Cuando un material ferromagnético se magnetiza, aplicando dos partes cualesquiera del mismo, los polos de un imán, se convierte en otro imán con sus polos situados antagónicamente en los puntos de contacto de los polos del imán original. Sus partículas se orientan y se crean en su interior unas líneas de fuerza que van desde un polo del imán inductor al otro, pasando por una zona inerte que se denomina línea neutra.

Las líneas de fuerza forman un flujo magnético uniforme, si el material es homogéneo. Podemos imaginarnos la corriente de un río que fluye según líneas paralelas, si el cauce es homogéneo. Cuando existe alguna alteración en el interior del material, las líneas de fuerza se desbordan por los lados, al igual que el agua del río, cuando se encuentra con un obstáculo en su cauce.

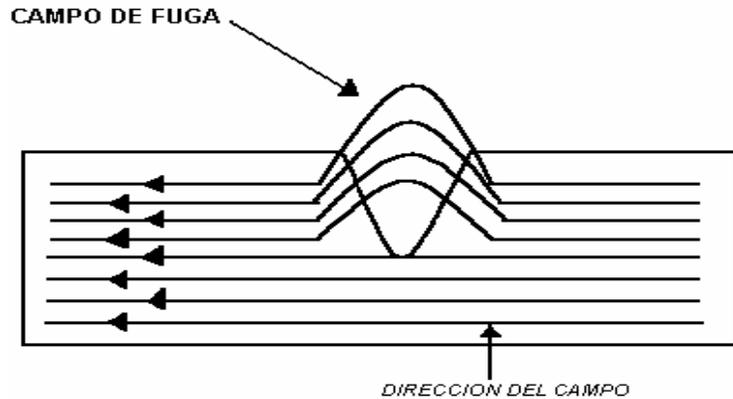
---

<sup>4</sup> F.B Doane, Principios de Magnaflux, Magnaflux Corporation,

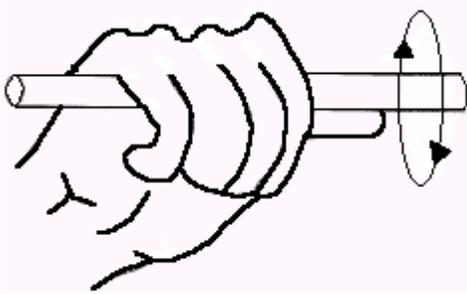
<sup>5</sup> F.B Doane, Principios de Magnaflux, Magnaflux Corporation

En la siguiente ilustración, se podrán observar las líneas de fuerza de una pieza magnetizada.

Al encontrarse el flujo magnético con el obstáculo, quien en este caso es la grieta, que se presenten el material. Las líneas desbordan por el exterior del material, creando un campo magnético por el exterior del mismo, llamado "campo de fuga".



### Dirección de la magnetización.



Las líneas de fuerza de un campo magnético, inducido por una corriente eléctrica, sigue la orientación de la llamada "**Regla de la mano derecha**". Si tomamos con dicha mano una varilla, dejando el dedo pulgar en la dirección y sentido de la corriente, los demás dedos señalarán la dirección de las líneas de fuerza.

Esto significa que si aplicamos una corriente, directamente a una barra ferromagnética que se quiera ensayar, se generarán corrientes circulares transversales, que serán muy apropiadas para detectar defectos longitudinales, ya que el campo de fuga se generará en el material, cuando alguna fisura o grieta se encuentra perpendicular a las líneas de inducción.

Por el contrario, si la barra tuviese grietas transversales, no se podrían detectar con campos transversales, pero sí con líneas de inducción longitudinales, inducidas por las espiras de un solenoide, por las que circulara una corriente, o por un campo inducido por un imán exterior, cuyos polos estuvieran en contacto con los extremos de la barra.

Esto significa que para hacer una buen inspección, se deben aplicar sucesivamente dos campos perpendiculares, ya que de esta manera se podrá siempre atravesar todas las fisuras del material con un ángulo superior a los 45 grados.

## 1.2 Posibilidades del método.

Teniendo ahora un conocimiento de los principios fundamentales del método, de inspección por partículas magnéticas, es a todas luces evidente que el campo de aplicación tiene que ser muy amplio. Evidentemente puede utilizarse sobre cualquier acero o hierro, que se pueda magnetizar lo suficiente para producir indicaciones.

Se adapta bien en general a dispersiones no metálicas, particularmente a las que tienen un contorno definido, porque tienden a producir campos de fuga más grandes, y puede utilizarse para la localización de discontinuidades debajo de la superficie del metal, tan largas como sean, si no yacen tan profundamente situadas, que el campo de perturbaciones que éstas produzcan no se registren en la superficie.

## 1.3 Materiales magnetizables.

Antes de aplicar la inspección por partículas magnéticas, conviene siempre asegurarse que el material que se va a examinar es susceptible de ser magnetizado satisfactoriamente. Esto se puede conseguir rápidamente, por alguno de los diferentes métodos. Puede comprobarse con un imán: si lo hubiese disponible, cualquier pieza de acero templado, tal como una lima, puede ser rápidamente magnetizada y se verá que sirve para este propósito.

Si el espécimen fuese pequeño, puede detenerse en la bobina de un aparato de magnetización normal, mientras la corriente este pasando, y si fuese magnetizable se notará una sacudida distinta. Su retentividad se puede comprobar averiguando, si puede atraer objetos de hierro, después que la corriente se ha interrumpido y en qué grado.

## 2.0 Requerimientos generales

### I. Equipo y material de consumo.

- 1) Equipo magnetizante; 2) Partículas Magnéticas, secas o en suspensión (visibles o fluorescentes); 3) Lámpara portátil de luz ultravioleta; 4) Medidor de intensidad de luz ultravioleta; 5) Medidor de intensidad de campo magnético; 6) indicador de campo magnético; 7) Tubo de decantación ASTM; 8) indicador de campo magnético residual; 9) Flexómetro; 10) Vernier; 11) Estopa, trapo limpio o papel absorbente.

## **2.1 Procedimiento**

El procedimiento de inspección debe estar basado en la siguiente información:

- a) Los materiales, formas o tamaños a inspeccionar y el alcance de la inspección.
- b) Las técnicas de magnetización que se usarán.
- c) El equipo que se utilizará para la magnetización.
- d) Preparación de la superficie (acabado y limpieza).
- e) Tipo de partículas ferromagnéticas que se usarán (fabricante/marca, color, secas ó húmedas).
- f) Corriente magnética (tipo y amperaje).
- g) Desmagnetización.

## **2.2 Método de inspección**

La inspección debe realizarse por un método continuo; esto es, la corriente magnética debe permanecer mientras se aplica el medio de inspección y mientras es removido el exceso.

## **2.3 Técnicas y materiales aprobados**

Las partículas ferromagnéticas usadas como medio de inspección deben ser secas o húmedas, y fluorescentes o visibles. Deben utilizarse una o más de las siguientes técnicas de magnetización :

- a) Técnica de puntas
- b) Técnica de magnetización longitudinal
- c) Técnica de magnetización circular
- d) Técnica de yugo
- e) Técnica de magnetización multi-direccional

## **2.4 Preparación de la superficie**

a) Generalmente se obtienen buenos resultados cuando las superficies están soldadas, roladas, fundidas, o forjadas. Sin embargo, la preparación de la superficie por esmerilado o maquinado será necesaria donde las irregularidades de la superficie puedan ocultar indicaciones producidas por discontinuidades.

b) Antes de la inspección con partículas magnéticas, la superficie a inspeccionar y todas las áreas adyacentes mínimo con 1" (25 mm), debe estar secas y libres de grasa, polvo, soldadura, aceite u otra materia extraña que pueda interferir en la inspección.

c) La limpieza debe hacerse usando detergentes, solventes orgánicos, removedores de pintura, desgrasante a vapor, o métodos ultrasónicos de limpieza.

d) Si permanecen algunos recubrimientos en el área a ser inspeccionada, estos deben permitir la manifestación de las indicaciones que puedan detectarse.

## 2.4 Magnetización

Varias bases diferentes pueden utilizarse para la clasificación de los métodos de magnetización. La primera de entre ellas, es de si se mantienen o no las fuerzas de magnetización, durante la aplicación del método de inspección.

Sobre esta base tenemos:

- A) Método residual.
- B) Método continuo.

Se puede hacer una segunda clasificación, sobre la base del carácter del campo utilizado, por la operación de magnetización. Sobre esta base tenemos:

- A) Método circular.
- B) Método longitudinal.
- C) Método paralelo.
- D) Métodos de espiral o campo de distorsión.
- E) Combinación de los anteriores puntos.

La tercera base, es la del tipo de corriente de magnetización usado, sobre cuya base tenemos:

- A) Método de corriente continua.
- B) Método de corriente alterna.
- C) Método de onda media.
- D) Método oscilatorio.
- E) Método de destello.

Los medios favorables o apropiados para la producción del flujo magnético necesario en una pieza pueden obtenerse usando una o más de las técnicas mencionadas a continuación.

### **a) Método continuo.**

Se entiende por método continuo, el procedimiento mediante el cual la operación de magnetización se conduce simultáneamente, con aplicación del medio de inspección. Esto es, el medio de inspección está en contacto con el espécimen, mientras se está aplicando la corriente. Aquí de nuevo, no hay ninguna distinción entre los métodos de aplicación de las partículas magnéticas, que puede ser el método húmedo o seco. El punto importante es la corriente está o no, de hecho, fluyendo a la pieza por un conductor central, o por un solenoide externo o electroimán, durante la aplicación de las partículas magnéticas. Tampoco se hace distinción alguna en cuanto al espacio de tiempo durante el cual la corriente fluye. La duración de flujo de corriente puede ser de fracciones de segundo, llamados disparos; o puede ser por una duración de tiempo suficiente para la inspección de una gran área. En el caso de grandes objetos, esto puede necesitar minutos y aún horas y de otra parte, están los extremadamente breves impulsos de corriente, empleados en la magnetización por destellos mediante descargas de condensador.

La práctica muy usada en algunas partes, es de dar más de un disparo, cuando se use método continuo, y en algunas ocasiones tres o más disparos, se practica probablemente con el propósito de conceder un tiempo más largo para que las partículas de polvo se concentren en el campo de dispersión producido por un defecto, ya que se tienen que desplazar desde varias distancias para hacerlo.

Disparos sucesivos no se dan nunca prácticamente, cuando se usa en modo seco, ya que una ligera cantidad de vibraciones se producirán, corrientemente, en las partículas por las proximidades del campo de dispersión, al desplazarse hacia los defectos.

Con el método húmedo continuo, durante el periodo en que se está aplicando la corriente, sea por aspersion o por inmersión, nuevas sumas de partículas se atraen continuamente, hacia la formación del campo de dispersión y esta atracción incrementa el tamaño y la visibilidad de la indicación, hasta el punto en que el modelo ha obtenido tales dimensiones físicas, que las fuerzas que tienden empujar las partículas fuera del defecto,

son suficientes para compensar la fuerza de atracción del campo de dispersión.

### **b) Método residual.**

Volviendo a nuestra primera clasificación, dependiente de si se debe o no mantenerse la fuerza de magnetización, durante la aplicación de los medios de inspección, tenemos en primer lugar el método residual. Cuando se emplea el método residual, el operario confía enteramente, en la cantidad de magnetismo residual, que se retiene en el espécimen, inmediata o posteriormente a la aplicación del campo magnético o de la corriente de magnetización.

Esta definición no hace ninguna referencia al tipo de polvo o partículas que se estén empleando, como medio de inspección, ni al tipo de corriente usada, ni especifica el tiempo que ha de mediar entre la aplicación de la fuerza de magnetización y el instante en que el medio de inspección se aplica. Puede seguir el uno al otro inmediatamente, o pueden estar separados por un periodo de meses o de años.

A causa de que el campo residual, retenido por un acero siempre es siempre menor que el que existe en él, mientras que la fuerza de magnetización está actuando, la fuerza del campo de dispersión en una discontinuidad será menor, para una fuerza de magnetización dada, cuando se confía en el campo residual. Por esta razón del método residual, se considera que es menos sensible que el método continuo y es descartado en cuantas aplicaciones se necesita un máximo de sensibilidad posible.

En muchas grandes e importantes ramas de la industria, no obstante, el método residual brinda resultados satisfactorios completos. Esto es porque en muchos casos es preferible usar métodos que aunque menos sensibles, revelan todas las condiciones que pueden perjudicar la vida de servicio de las piezas en cuestión. Los métodos de alta sensibilidad, bajo tales circunstancias, no servirían a ningún propósito útil, debido a que, por sus condiciones reveladoras de insignificancias para tales partes, dificultaría la interpretación de los resultados.

## **2.6 Medio de inspección**

Para la división excelente de las partículas ferromagnéticas usadas en la inspección deben conocerse los siguientes requerimientos:

a) Partículas secas.- Si se van a usar partículas secas, el color de las partículas debe darnos un contraste adecuado cuando empecemos a examinar la superficie. Los requerimientos específicos adicionales en el uso de las partículas secas nos lo dan en ASME SE—109, método estándar para la inspección de partículas magnéticas secas.

La inspección por partículas magnéticas no debe realizarse si la temperatura si la temperatura en la superficie de la pieza excede los 600°F (316°C).

b) Partículas húmedas.- Si se van a utilizar partículas húmedas, el color de las partículas deben darnos un contraste adecuado cuando se esté inspeccionando. Las partículas deben ser suspendas en un medio líquido favorable y con la concentración recomendada.

La temperatura de la suspensión de partículas húmedas de la superficie de la pieza no debe exceder los 135°F (57°C).

c) Partículas fluorescentes.- Si se van a utilizar partículas fluorescentes, la inspección debe realizarse con una luz ultravioleta (llamada también luz negra). La inspección debe cubrir los siguientes aspectos:

1) La inspección debe realizarse en cuarto oscuro.

2) El operador debe permanecer en el cuarto oscuro al menos 5 min. Antes de la inspección para que sus ojos se adapten a la oscuridad y si utiliza anteojos estos deben ser fotosensitivos.

3) La luz negra debe ser calentada por lo menos 5 min. Antes de la inspección.

4) La intensidad de la luz negra debe checarsse al menos cada 8 horas o cuando la situación de trabajo cambie, usando un medidor que sea sensible a la luz en el espectro ultravioleta, se requiere un mínimo de 800 w/cm<sup>2</sup> en la superficie de la pieza bajo inspección.

Las partículas magnéticas a utilizar se describen enseguida. Las siguientes vistas, corresponden a las partículas del fabricante Magnaflux, y se deben de tomar como una referencia, ya que en el mercado existen diferentes marcas especializadas en estos rubros.

Las partículas se describen en tres grupos, los cuales abarcan las partículas visibles en vía seca, fluorescentes en vía seca, visibles y fluorescentes en vía húmeda, así como el medio de suspensión requerido.

<b>PARTÍCULAS VISIBLES VÍA SECA</b>
-------------------------------------

TIPO DE PARTÍCULAS	COLOR
<i>1 GRAY</i>	<i>GRIS</i>
<b>3A BLACK</b>	<i>NEGRO</i>
<b>8A RED</b>	<i>ROJO</i>
<b>MX 101 GRAY</b>	<i>GRIS</i>

<b>PARTÍCULAS FLUORESCENTES VÍA SECA</b>
--

TIPO DE PARTÍCULAS	COLOR
<i>MX 200 ORANGE</i>	<i>Anaranjado</i>
<i>MX 201 GREEN</i>	<i>Verde brillante</i>

<b>PARTÍCULAS VISIBLES Y FLUORESCENTES VÍA HÚMEDA</b>
---

TIPO DE PARTÍCULAS	COLOR		SUSPENSIÓN
	LUZ BLANCA	LUZ U.V.	
<i>14 A</i>	<i>MARRÓN</i>	<i>AMARILLENTO</i>	<i>AGUA / KEROSENO</i>
<i>14 AM</i>	<i>MARRÓN</i>	<i>AMARILLENTO</i>	<i>KEROSENO</i>
<i>20 A-B</i>	<i>MARRÓN</i>	<i>AMARILLENTO</i>	<i>AGUA + WA-2B</i>
<i>MG 410</i>	<i>VERDE</i>	<i>VERDOSO</i>	<i>AGUA / KEROSENO</i>
<i>9CM RED</i>	<i>ROJO</i>	<i>VERDOSO</i>	<i>KEROSENO</i>

\* WA-2B = ACONDICIONADOR PARA AGUA.

## 2.7 Eficiencia del campo magnético

<sup>6</sup> Prácticas recomendadas para la inspección por Partículas Magnéticas, Instituto Mexicano de Ensayos No Destructivos.

Cuando es necesario verificar la exacta dirección del campo magnético, el indicador de campo de partícula magnética debe usarse colocando el indicador en la superficie de la pieza a inspeccionar. Cuando usamos este indicador, un flujo favorable o campo resistente es indicado con una línea definida de la cara de cobre del indicador, cuando las partículas magnéticas son aplicadas con la misma fuerza magnética. Cuando no se forma una línea claramente definida de partículas o no se forma en la dirección deseada, la técnica de magnetización deberá cambiarse o ajustarse. El indicador de campo de partícula magnética se está permitido solo para determinar un campo magnético adecuado.

## **2.8 Corriente rectificada**

- a) Cuando es requerida una corriente directa puede usarse corriente rectificada. La corriente rectificada por magnetización debe ser trifásica (onda rectificada completa), fase sencilla (media onda rectificada).
- b) El amperaje requerido con trifase, debe ser verificado midiendo la corriente promedio.
- c) El amperaje requerido en fase sencilla, debe verificarse midiendo la corriente promedio producida durante la conducción de medio ciclo únicamente.

## **2.9 Desmagnetización**

Cuando un magnetismo residual en la pieza puede interferir con un proceso o tratamiento subsecuente, la pieza puede desmagnetizarse en cualquier momento después de completar la inspección.

## **3.0 Características generales de los equipos de inspección**

Existen diversos tipos de equipos utilizados en la detección de defectos por la técnica de partículas magnéticas. Nos limitaremos a dar una descripción de los más usuales, empleados en los talleres de Mantenimiento Mayor Zaragoza.

Estos equipos utilizan corriente eléctrica, que puede ser alterna o continua, para producir un campo en el elemento a magnetizar. No son utilizados los imanes permanentes, aunque suponen una gran ayuda cuando en la aplicación de la corriente puede suponer un riesgo de explosión o de incendio, o el ensayo debe de hacerse en un lugar donde no sea posible disponer de una toma de corriente.

Las partículas magnéticas se aplica mientras el elemento magnetizante está aplicado sobre la pieza a inspeccionar, concretamente durante el proceso de magnetización, a fin de aprovechar la máxima pendiente de la curva de permeabilidad, aunque también se utiliza una técnica de magnetización residual en la que las partículas se aplican después de haber sido retirado el elemento inductor, pero este método sólo puede aplicarse a materiales de alta retentividad magnética y tiene poca sensibilidad.

En primer lugar, los equipos pueden clasificarse en fijos, móviles y portátiles, estando los primeros preparados para inspecciones en taller, efectuadas sobre un determinado tipo de piezas fabricadas o reparadas, que en general abarcan casi en su totalidad a todo el material rodante, mientras que los equipos móviles y portátiles, se les adaptan piezas de diversas formas y tamaño, ya que el ensayo no se realiza abarcando la pieza, sino aplican del magnetismo a zonas o puntos primordiales, en donde se sospecha que puede existir una fisura.

### **3.1 Equipos fijos**

Éstos equipos son más variados que los móviles, pues suelen adaptarse a las necesidades concretas de un determinado tipo de fabricación o de inspección. Estos instrumentos pueden tomar distintas formas y sistemas de funcionamiento, teniendo muy en cuenta a las piezas que serán inspeccionadas.

Por lo general estos equipos, en pueden utilizar las técnicas de inspección por vía seca o húmeda, siendo esta última la de mayor uso en los equipos estacionarios. Es en este método donde las partículas se encuentran en una suspensión que puede ser de agua o hidrocarburos, convenientemente agitado para que las partículas se encuentren distribuidas. Este método tiene la peculiaridad de aprovechar las partículas magnéticas, ya que no se desperdician en aplicación, además de que pueden ser reutilizadas posteriormente mediante un adecuado circuito de recuperación.

Los equipos fijos suelen utilizar dos elementos magnetizantes, los cuales se explican a continuación:

- Una bobina circular, la cual induce un campo longitudinal en la pieza que pasa a través de ella.
- Dos electrodos, los cuales se encuentran ubicados en los extremos del equipo fijo, con el fin de inducir un campo transversal en la pieza a inspeccionar.

Los electrodos magnéticos, son utilizados con el fin de inducir en la pieza un campo longitudinal en la pieza, estos polos están magnetizados por dos bobinas, alimentadas por corriente continua, puede ser utilizada la corriente alterna, si la polaridad está invertida en cada una de ellas.

Dependiendo del tamaño de la bobina circular en los equipos fijos, se pueden inspeccionar piezas de diversos tamaños, comprendidos entre pocos centímetros y varios metros. La potencia de magnetización puede llegar a varios miles de Amperes. La corriente utilizada normalmente es alterna, aunque existen equipos de corriente rectificada. En caso que se considere necesario, dichos equipos pueden incorporar elementos de desmagnetización.

### **3.2 Equipos portátiles**

Estos instrumentos son de reducido tamaño y por consecuencia, denotan su correspondiente pérdida de potencia.

Hablaremos de los equipos ligeros de transformación o rectificación de corriente, lo que les da una elevada disponibilidad en su campo de aplicación. Dichos elementos pueden trabajar con corriente alterna o rectificada de media honda, en intensidades de hasta 1500 Amperios. Los equipos portátiles utilizados en los talleres de Mantenimiento Mayor Zaragoza, son los yugos.

Los electroimanes de tipo yugo, están formados por una electroimán articulado, cuya parte central es una bobina alimentada por corriente alterna, son utilizados para la detección de defectos en piezas de espesor máximo de 0.6 milímetros, se puede utilizar corriente rectificada para otros espesores.

El núcleo del yugo, se encuentra formado por un conjunto de chapas magnéticas de muy alta permeabilidad, además de reducida retentividad.

Tienen la propiedad de que sus brazos son articulados, con los cuales se puede abarcar hasta 450 milímetros.

La potencia de una electroimán, debe ser la suficiente para poder levantar una placa magnética de 4.5 kilogramos, cuando se utiliza corriente alterna y de 18 kilogramos y se utiliza corriente continua. Éstos se debe realizar utilizando el yugo con la máxima separación de sus polos.

Aplicando los polos del yugo, en los extremos de la zona que se pretende inspeccionar y espolvoreando partículas magnéticas, entre ambos polos, se puede determinar la posibilidad de un fallo en el material, con una orientación perpendicular a la línea que va de polo a polo. Con este método de inspección se genera un campo longitudinal, cuyos extremos son los puntos de contacto de los brazos del yugo, en el material a inspeccionar.

Entre los equipos portátiles, se encuentran los electrodos de contacto o puntas de contacto, los cuales están formados por dos electrodos activados por una corriente eléctrica, estos electrodos se ponen en contacto con dos partes muy próximas de la zona a inspeccionar. Se produce en la zona dos campo circulares, localizados y distorsionados en el área situada entre los puntos de contacto.

Los electrodos se colocan sobre la superficie a inspeccionar, manteniéndolos en esa posición durante el paso de la corriente. Los extremos de dichos electrodos, deberán encontrarse limpios, para permitir el paso de la corriente sin que se produzcan arcos o quemaduras. Las puntas de contacto, cuentan con un interruptor instalado en una de las empuñaduras para evitar arcos, este interruptor se conecta mientras se hace pasar la corriente, desactivándolo antes de levantar los polos.

### **3.3 Frecuencia de calibración**

a) Cada parte del equipo magnetizante debe calibrarse por lo menos una vez al año, o cuando el equipo haya sido sometido a una preparación eléctrica, si el equipo no ha sido utilizado en un año o más, la calibración debe realizarse antes de volver a usarlo.

b) Procedimiento.- La precisión de la unidades de medición deben ser verificadas anualmente por un equipo con certificado estándar nacional. Deben ser tomadas lecturas comparativas por lo menos a tres diferentes niveles de corriente eléctrica en rangos usuales.

c) Tolerancia.- Las lecturas de los medidores no deben variar por + - el 10% del límite en la escala. Relativo al valor actual de la corriente proporcionado por el medidor de prueba. Nota: Cuando una corriente rectificada es tomada con medidor de corriente directa. Las lecturas deben multiplicarse por 2.

## 4.0 Inspección

### 4.1 Dirección de magnetización

Al menos dos inspecciones separadas deben realizarse en cada área. Durante la segunda inspección las líneas de flujo magnético deben ser aproximadamente perpendiculares a la primera inspección. Se puede utilizar una técnica diferente en la segunda inspección.

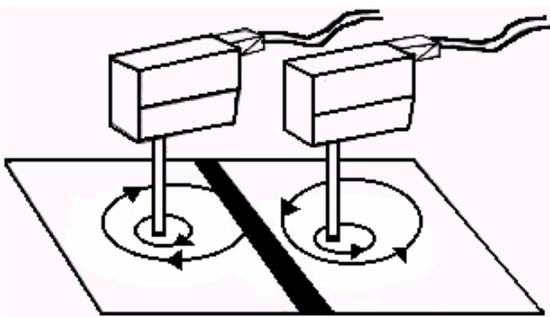
### 4.2 Alcance de la inspección

Todas las inspecciones deben ser conducidas con suficiente corriente para garantizar el 100% de alcance de la sensibilidad requerida.

## 5.0 Procedimiento de magnetización

### 5.1 Técnica de puntas de contacto

Cuando se magnetiza una gran plancha localmente, por medio de punzones, utilizando corriente continua, el problema de la determinación de las fuerzas reales del campo y su distribución, es muy difícil, ya que pueden surgir muchas variaciones. La corriente entra la plancha por medio de un punzón de contacto, y sale por el otro. Se esparcirá entre los dos puntos de contacto su uniformidad, dependiendo del espacio entre los punzones, dimensiones de la chapa y su conductividad eléctrica. Las puntas de contacto generan una magnetización circular.



La norma general de la densidad de campo dependerá del modelo de distribución de corriente. Claramente se verá que esta densidad será más fuerte entre los punzones, y ésta es el área donde las indicaciones serán más fuertes. Pero la facilidad para producir indicaciones de discontinuidades, que yacen por

debajo de la superficie o en algunos casos en la superficie opuesta de la chapa, es definitivamente asegurada con la distribución del campo interno.

Como norma práctica, han sido estudiadas técnicas bajo las cuales puede ser asegurada la máxima sensibilidad, en cualesquiera condiciones, de manera que la distribución del campo real entre "punzones" se reduce a un punto de interés académico.

Para la técnica de puntas de magnetización es realizada con puntas portátiles de contrato eléctrico, presionando contra la superficie en el área a inspeccionar. Para evitar quemaduras se puede colocar un switch de control remoto dentro de las asas de las puntas que permitan encender después de que las puntas sean colocadas adecuadamente.

La corriente se puede utilizar directa o rectificada. La corriente debe ser como mínimo 100 y máximo 125 amp./pulgada y espaciar las puntas por secciones de  $\frac{3}{4}$  (20 mm) a los largo o ancho.

Para secciones menores de  $\frac{3}{4}$ " la corriente debe ser de 90 a 110 amp./pulgada.

## **5.2 Espacio de puntas**

El espacio de las puntas no debe exceder de 8" (200 mm) puede usarse un espacio corto para acomodar las limitaciones geométricas del área que será inspeccionada o para incrementar la sensibilidad, pero los espacios de las puntas menores de 3" (80 mm) no son usualmente prácticas para atraer las partículas magnéticas alrededor de las puntas. Si el voltaje del circuito abierto de la corriente es mayor de 250, son recomendadas las puntas con cubierta de plomo, acero o aluminio para evitar depósitos de cobre en la pieza a examinar.

## **6.0 Magnetización longitudinal**

Los campos longitudinales pueden ser bipolares y multipolares, pero en general se caracterizan por ser paralelos aleje del espécimen, en el cual se producen. De esta manera formar un ángulo aproximado de 90 grados con el plano de los defectos transversales, que es la dirección favorable para la acertada detección.

La magnetización longitudinal es de gran importancia en trabajos de inspección, ya que la mayoría de las grietas de fatiga en piezas longitudinales son transversalmente marcadas y por esta razón, mejor localizadas por este método. La mayoría de las inspecciones efectuadas, en

los ejes de los vagones para las fisuras de fatiga transversal se efectuaron magnetizado longitudinalmente.

En muchas operaciones de inspección, la magnetización longitudinal es la única que se aplica, ya que casi todos los defectos perjudiciales son transversales en su marca que los defectos longitudinales, si se presentan, no son peligrosos.

### 6.1 Procedimiento de magnetización

Para esta técnica la magnetización es realizada por corriente pasando a través de una bobina que envuelve la pieza o sección a inspeccionar. Esta produce un cambio magnético paralelo.

### 6.2 Potencia del campo magnético<sup>7</sup>

Para corriente directa o rectificada se debe utilizar esta técnica para magnetizar la pieza a inspeccionar. La potencia del campo requerida debe calcularse basándose en el largo (L) y al diámetro (D) de la pieza de acuerdo a las partes a, b, y c, descritas abajo.

Las piezas largas deben ser inspeccionadas por secciones no mayores de 18" (460mm). Para piezas no cilíndricas, el diámetro mayor debe ser el de la línea diagonal.

a) Piezas con una relación largo/diámetro igual o mayor que el radio; para determinar la corriente utilizamos la siguiente fórmula:

$$\text{Ampere-vueltas} = \frac{35000}{(L/D) + 2}$$

Por ejemplo, una pieza de 10" (250mm) de largo por 2" (50mm) de diámetro tiene una relación L/D de 5" entonces :

$$\frac{35000}{(5 + 2)} = 5000 \text{ ampere-vueltas}$$

b) Para piezas con una relación largo/diámetro menor de 4 pero no menor de 2; la corriente magnetizante se determina de la siguiente manera.

<sup>7</sup> De acuerdo a la Norma NOM B-124-91

$$\text{Ampere-vueltas} \quad \frac{45000}{L/D}$$

c) Para piezas con características iguales al inciso anterior, pero colocadas al centro de una bobina, se utilizara la siguiente ecuación

$$\text{Ampere - vueltas} \quad \frac{43000 R}{(6L / D) - 5}$$

Donde R es el radio de la bobina

d) Para piezas con la relación largo/diámetro menor de 2 se puede usar una magnetización alterna.

### Corriente magnetizante

La corriente requerida para obtener el campo magnetizante necesario se puede determinar dividiendo el amperaje obtenido siguiendo los pasos a y b antes detallados.

$$\text{Amperes (de la lectura)} \quad \frac{\text{Ampere-vueltas}}{\text{vueltas}}$$

Por ejemplo, si para 5 vueltas requerimos 5,000 amperes-vueltas usamos:

$$\frac{5,000}{5} = 1,000 \text{ amperes (+ - 10\%)}$$

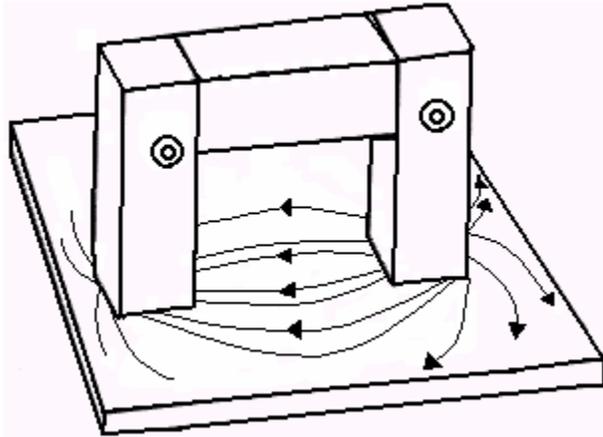
### 6.3 Técnica de magnetización por yugos

Este instrumento de magnetización, produce campos magnéticos inducidos en una pieza, por campos externos generados por un imán bipolar en forma de U, usualmente llamados "YOKE" (yugo). Los yugos o electroimanes generan una magnetización longitudinal.

Cuando una pieza de material magnetizable, se coloca a través de los polos de un electroimán que tenga un núcleo en forma de U, la pieza completa el circuito magnético, permitiendo al flujo desplazarse a través de un paso de hierro, en vez de por el aire. En este caso hay una polaridad externa considerable y un campo de dispersión muy grande.

El devanado de energía puede colocarse en una, dos o tres columnas del yugo, aunque no hay muchas ocasiones para el último estilo. El núcleo de yugo debe ser laminado, si se emplea la corriente alterna para excitarlo. Algunas veces el yugo está construido de manera que una o ambas, de las columnas sean móviles, lo que produce el efecto de una abertura ajustable y permite la magnetización de una mayor gama en el tamaño de las piezas.

Los yugos magnéticos o electroimanes, ofrecen pocas ventajas para los propósitos de las partículas magnéticas, sobre otros métodos de magnetización, se usan sólo bajo circunstancias especiales, cuando por alguna razón pueden llenar los requerimientos particulares satisfactoriamente, o como sustitutos para métodos más convenientes, cuando éstos no pueden ser utilizados. La desventaja principal de los yugos o imanes, está en que los campos externos extensivos que los rodean, produciendo adherencias de polvo, aunque de sondaje no se presenten defectos, y en la dificultad de control en los campos producidos.



La desventaja principal de los yugos o imanes, está en que los campos externos extensivos que los rodean, produciendo adherencias de polvo, aunque de sondaje no se presenten defectos, y en la dificultad de control en los campos producidos.

### 1. Aplicación

Este método solo puede ser aplicado para detectar discontinuidades que estén abiertas a la superficie de la pieza.

### 2. Procedimiento de magnetización

Para esta técnica se pueden utilizar los yugos de corriente alterna o directa o los yugos de imán permanente por su poder de luz para detectar defectos en la superficie.

### 3. Fuerza magnetizante del Yugo

a) La fuerza magnetizante de los yugos deben calibrarse para determinar su fuerza de levante.

b) Cada yugo de corriente alterna electromagnética debe tener un poder de levante de por lo menos 10 lb. (4.5kg) en el espacio máximo del polo que estamos utilizando.

## **7.0 Magnetización circular**

Existen dos métodos para producir la magnetización circular, en un objeto a magnetizar. El primero consiste en pasar una corriente a través de la pieza y el segundo consiste en pasar la corriente, a través de un conductor central, tal como una barra de cobre o un cable. En ambos casos se ha dicho que el campo inducido está confinado casi por completo a la pieza misma, y hay poco campo externo apreciable, excepto el que pueda ser generado por un defecto en ángulo con el campo. Esta característica de magnetización circular, es con frecuencia una ventaja decisiva. Además, un campo de dispersión externo mayor, no es de ningún modo un inconveniente insuperable, en particular si son usados polvos o partículas, creados para el método húmedo, porque si bien esos materiales son muy sensitivos para denotar los campos de fuga pequeños, no tienden a formar puente o a amontonarse sobre campos de dispersión muy extensos.

Las ventajas más destacadas de un campo circular, es que se localizara prácticamente cualquier defecto descubrible por el uso de las partículas magnéticas, en forma más exacta que ningún otro medio conocido de magnetización. Esto no debe interpretarse en el sentido de que el método circular es siempre el mejor, o que se trate del método más conveniente de magnetización, pero hay casos en que es el único método que puede ser usado con esperanzas de éxito.

### **7.1 Técnica de contacto directo**

a) Procedimiento magnetizante.- Esta técnica de magnetización se realiza pasando la corriente a través de la pieza a inspeccionar. Esta, forma un campo magnético circular que es aproximadamente perpendicular a la dirección en la que fluye la corriente en la pieza.

b) Corriente magnetizante.- Debe utilizarse corriente directa o rectificada (media onda rectificada u onda completa rectificada). La corriente requerida puede determinarse usando los siguientes conceptos :

1) para piezas de diámetro abajo de 5" (125mm) se debe utilizar de 700 a 900 amp./pulgada.

2) para piezas de diámetro de 5 a 10" (125-250mm) se debe utilizar de 500 a 700 amp./pulgada.

3) para piezas de diámetro de 10 a 15" (250-380mm) se debe utilizar de 300 a 500 amp./pulgada.

4) para piezas de diámetro arriba de 15" (380mm) se debe utilizar de 100 a 330 amp./pulgada.

5) Para piezas de figura geométrica que no sea circular la sección de la línea diagonal mayor en ángulo recto al flujo de la corriente se deben determinar las pulgadas que se van a utilizar en la tabulación anterior.

6) Como alternativa, para piezas no cilíndricas el amperaje de magnetización se puede establecer usando indicador de campo de partículas magnéticas.

## 7.2 Técnica de conductor central

Existen dos métodos para producir la magnetización circular, en un objeto a magnetizar. El primero consiste en pasar una corriente a través de la pieza y el segundo consiste en pasar la corriente, a través de un conductor central, tal como una barra de cobre o un cable. En ambos casos se ha dicho que el campo inducido está confinado casi por completo a la pieza misma, y hay poco campo externo apreciable, excepto el que pueda ser generado por un defecto en ángulo con el campo. Esta característica de magnetización circular, es con frecuencia una ventaja decisiva. Además, un campo de dispersión externo mayor, no es de ningún modo un inconveniente insuperable, en particular si son usados polvos o partículas, creados para el método húmedo, porque si bien esos materiales son muy sensitivos para denotar los campos de fuga pequeños, no tienden a formar puente o amontonarse sobre campos de dispersión muy extensos.

Las ventajas más destacadas de un campo circular, es que se localizara prácticamente cualquier defecto descubrible por el uso de las partículas magnéticas, en forma más exacta que ningún otro medio conocido de magnetización. Esto no debe interpretarse en el sentido de que el método circular es siempre el mejor, o que se trate del método más conveniente de magnetización, pero hay casos en que es el único método que puede ser usado con esperanzas de éxito.

**a) Procedimiento de magnetización.-** Para esta técnica se usa un conductor central para inspeccionar las superficies internas de piezas cilíndricas anillos. La técnica del conductor central se utiliza también para inspeccionar superficies externas con esas formas.

Cuando se van a inspeccionar cilindros de diámetro largo, el conductor se coloca en la parte interna del cilindro, cuando el conductor no está centrado, la circunferencia del cilindro debe inspeccionarse en incremento e indicador de campo magnético.

Para barras o cables que pasen a través del borde del cilindro se puede usar la magnetización por inducción circular.

**b) Corriente magnetizante.-** Para una vuelta sencilla del conductor central. El campo magnético debe incrementarse en proporción al número de veces que pase al conductor central a través del hueco de la pieza.

Por ejemplo, si se requieren 6000 amperes para inspeccionar una pieza con su conductor central sencillo, cuando se utilice uno con 2 vueltas a través del cable se requerirán 3000 amperes y 1200 amperes para uno de 5 vueltas.

## **7.0 Magnetización multidireccional**

### **7.1 Procedimiento de magnetización**

Esta técnica es aplicada por paquetes de operación de alto amperaje de por lo menos 3 circuitos energizados. El efecto de esta corriente rápida es que produce una magnetización global de la pieza en múltiples direcciones. Pueden generarse campos magnéticos circulares o longitudinales usando en combinación varias de las técnicas descritas.

### **7.2 Potencia del campo magnético**

Solamente se pueden utilizar para magnetizar una pieza, tres fases de corriente rectificadas de onda completa. Los requerimientos iniciales de corriente magnetizante para cada circuito se deben establecer utilizando los esquemas o ejemplos previamente descritos. Se puede utilizar un indicador de campo magnético para verificar que el campo obtenido es adecuado en por lo menos dos

direcciones perpendiculares. En las áreas donde no se puede demostrar que la fuerza del campo es adecuada se pueden utilizar otras técnicas de partículas magnéticas adicionales.

## **9.0 Evaluación de las indicaciones**

**a)** Todas las indicaciones se pueden evaluar acuerdo a los estándares de aceptación de los códigos de referencia.

**b)** Las discontinuidades en o cerca de la superficie son indicadas por la retención de la inspección sin embargo, localizar irregularidades en la superficie pueden producir falsas indicaciones.

**c)** La acumulación de partículas en áreas extensas que pueden ocultar indicaciones de discontinuidades son inaceptadas, entonces las áreas deben limpiarse nuevamente y reexaminarse.

## **10.0 Reportes**

Debe elaborarse un reporte de cada examinación efectuada. Este reporte debe incluir al menos la siguiente información: una figura por cada pieza inspeccionada, indicar la técnica de magnetización, tipo de corriente y amperaje, áreas examinadas, equipo empleado, tipo de partículas, condición superficial, descripción e identificación de las piezas examinadas, el nombre de la persona que realizó el ensayo.

### **3.1 Los ensayos no destructivos.**

Los Ensayos No Destructivos, END, son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente. Las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, que eran relativamente desconocidas hasta hace pocos años, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado con sus productos.

En la fabricación y/o construcción de componentes, equipos e instalaciones, intervienen una serie de actividades cuya finalidad está bien definida o delimitada; éstas son principalmente: el diseño, la fabricación o construcciones propiamente dichas, el montaje o instalación y finalmente la inspección y las pruebas.

Estas actividades siempre se llevan a cabo, se trate de un tornillo, un embarque automotriz, un intercambiador de calor, un reactor químico, el casco de un barco, una central de energía o un gasoducto.

Las actividades que revisten mayor importancia para los fines de esta introducción son las pruebas e inspecciones que normalmente se practican a los materiales y que se pueden dividir de diferentes formas. Una de las clasificaciones más usuales es la siguiente:

- **Pruebas Destructivas.**
- **Pruebas No Destructivas (PND).**

#### **3.1.1 Definición y descripción de las pruebas destructivas.**

El objetivo principal de las pruebas destructivas es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales, como resistencia mecánica, la tenacidad o la dureza. La ejecución de las pruebas destructivas involucra el daño del material, la destrucción de la probeta o la pieza empleada en la determinación correspondiente, por lo que podemos concluir que los ensayos destructivos son la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, parte o componente sujeto a inspección.

Este tipo de pruebas siempre han sido necesarias para comprobar si las características de un material cumplen con lo especificado durante el diseño.

Debe observarse que estas pruebas no se pueden aplicar a todas las partes o componentes, ya que serían destruidos y perderían su utilidad.

Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización de los productos o los requisitos de seguridad, como es el caso de la industria aeroespacial, la nuclear eléctrica o la petroquímica, impusieron también nuevas condiciones de inspección, en las cuales se estableció la necesidad de verificar hasta en un 100% los componentes críticos; lo que planteó una severa dificultad a los departamentos de calidad, hasta que iniciaron el empleo de otras técnicas de inspección, diferentes a la visual, con las cuales se medía la integridad de los componentes sin destruirlos. Esto fue posible al medir alguna otra propiedad física del material y que estuviera relacionada con las características críticas del componente sujeto a inspección; es decir, se inició la aplicación de las pruebas no destructivas, las cuales actualmente son de uso común en casi todos los sectores industriales.

### 3.1.2 Definición y descripción de las Pruebas No Destructivas (PND).

“Son la aplicación de métodos físicos indirectos que tienen por finalidad verificar la sanidad de un material, sin alterar de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales”.

Las pruebas no destructivas son la aplicación de **métodos físicos indirectos**, como es la transmisión del sonido. La opacidad al paso de la radiación, etc., y tienen la finalidad de **verificar la sanidad** de las piezas examinadas. Cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de las piezas, si no verificar su **homogeneidad y continuidad**.

Por lo tanto, estas pruebas no sustituyen a los ensayos destructivos, si no que los complementan.

**Las pruebas no destructivas**, como su nombre lo indica, **no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material**. Por ello no inutilizan las piezas que son sometidas a los ensayos y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que las componen.

### 3.2 Definición de los Ensayos No Destructivos (END).

“Es un proceso que involucra la inspección, prueba o evaluación de materiales, componentes y ensamblajes para detectar discontinuidades en materiales, propiedades y problemas de maquinaria sin dañar o alterar la funcionalidad de las piezas

De acuerdo con su aplicación, los Ensayos no Destructivos, nombre más comúnmente usado para las pruebas no destructivas, se dividen en:

- Técnicas de **inspección superficial y subsuperficiales.**
- Técnicas de **inspección volumétrica o internas.**
- Técnicas de **inspección de hermeticidad o integridad.**
  - a) Medición por cambios de presión.
  - b) Medición por la pérdida de flujo.

### 3.3 Diversas técnicas de inspección

#### 3.3.1 Técnicas de inspección superficial y subsuperficial.

Mediante éstas sólo se comprueba la **integridad superficial y subsuperficial** de un material. Por tal razón su aplicación es conveniente cuando es necesario detectar discontinuidades que están en la superficie, abiertas a ésta o a profundidades menores de 3 mm. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes Ensayos No Destructivos:

- Inspección Visual (VT).
- Líquidos Penetrantes (PT).
- Partículas Magnéticas (MT).
- Electromagnetismo (ET).

#### 3.3.2 Técnicas de inspección volumétrica.

Su aplicación permite conocer la integridad de un material en su espesor y detectar discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos:

- Radiografía Industrial (RT).
- Ultrasonido Industrial (UT).

- Radiografía Neutrónica (NT).
- Emisión Acústica (AET).

### **3.3.3 Técnicas de inspección de la integridad o de la hermeticidad.**

Son aquéllas en la que se comprueba la capacidad de un componente o de un recipiente para contener un fluido (líquido o gaseoso) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica, sin que existan pérdidas apreciables de presión o de volumen del fluido de prueba en un periodo previamente establecido. Este tipo de inspección se realiza empleando cualquiera de los siguientes ensayos:

- Pruebas por cambio de presión.
- Hidrostática.
- Neumática.
- Pruebas por pérdidas de fluido.
- Cámara de burbujas.
- Detector de halógenos.
- Espectrómetro de masas.
- Detector ultrasónico.

### **3.4 Ventajas de los Ensayos No Destructivos.**

Los Ensayos No Destructivos (END) pueden ser usados en cualquier paso de un proceso productivo aplicándose por ejemplo:

1. Durante la recepción de las materias primas que llegan al almacén para comprobar la homogeneidad, la composición química y evaluar ciertas propiedades mecánicas.
2. Durante los diferentes pasos de un proceso de fabricación para comprobar si el componente está libre de defectos que pueden producirse por un mal maquinado, un tratamiento térmico incorrecto o una soldadura mal aplicada.
3. En la inspección final o de liberación de productos terminados; para garantizar al usuario que la pieza cumple o supera sus requisitos de aceptación; que la parte o componente cumplirá de manera satisfactoria 'la función para la que fue creada.

### 3.5 Limitaciones de los Ensayos No Destructivos.

1. La Primera limitación a la que se enfrentan los usuarios de este tipo de pruebas es que en algunos casos la **inversión inicial es alta**, pero puede ser justificada si se analiza correctamente la relación costo-beneficio, especialmente en lo referente a tiempos muertos en las líneas productivas.
2. Otra limitación es que la propiedad física a controlar es medida de forma indirecta; adicionalmente, es evaluada cualitativamente o por comparación. Esta limitante puede ser superada si se preparan **patrones de comparación** o referencia que permitan una calibración correcta de los sistemas de inspección
3. Cuando no existen **procedimientos de inspección** debidamente preparados y calificados o cuando no se cuenta con patrones de referencia o calibración adecuados, una misma indicación puede ser interpretada y ponderada de forma diferente por dos o más inspectores.
4. Si bien los ensayos no destructivos son relativamente fáciles de aplicar, se requiere que el **personal** que los realice halla sido debidamente capacitado y calificado y que cuente con la experiencia necesaria a fin de que se interpreten y evalúen correctamente los resultados y se evite el desperdicio de material o las pérdidas de tiempo por sobre inspección.

### 3.6 Beneficios del empleo de los Ensayos No Destructivos.

1. El primer beneficio que se puede observar es que aplicar correctamente los Ensayos No Destructivos y combinarlos con un buen análisis estadístico contribuye **a mejorar el control del proceso de fabricación** de una parte, componente o servicio; también ayuda a mejorar la productividad de una planta, **al prevenir paros imprevistos** por falla de un componente crítico; además de ayudar a programar los planes de mantenimiento, lo que reduce el tiempo y el costo de la reparación.
2. También es importante mencionar que estos métodos, cuando se aplican como parte de la **inspección preventiva reducen notablemente los costos de reparación** o reproceso, pero sobre todo ayudan a ahorrar tiempo y recursos que de otra forma se

desperdiciarían en una pieza que finalmente puede tener un costo de producción muy superior al presupuestado

3. Actualmente en los países desarrollados, la combinación de la inspección no destructiva con otras actividades del programa de aseguramiento de calidad ayuda a mantener un nivel de calidad uniforme en el producto final, lo que mejora la competitividad de sus productos en el mercado nacional e internacional.
4. Otro beneficio que normalmente no contemplan muchas empresas es que al emplear los END como una herramienta auxiliar del mantenimiento industrial, se tiene una mejor evaluación de las partes y componentes en servicio; lo que **permite optimizar la planeación del mantenimiento correctivo**. La aplicación de los END en la industria norteamericana evita pérdidas del orden de 2% del PIB de ese país.
5. Actualmente en la fabricación de bienes de capital de servicio especializado, la aplicación de los ensayos no destructivos puede ser **requerida por un contrato o por los códigos y regulaciones nacionales o internacionales** aplicables al producto; por lo que la empresa que cuente con un sistema de inspección no destructiva podrá cumplir más fácilmente requisitos de calidad más estrictos.

### 3.7 Selección del Ensayo No Destructivo adecuado.

Si bien las pruebas de un grupo pueden ser intercambiadas para aumentar la velocidad de la inspección o aumentar la sensibilidad en la detección de discontinuidades, **no es recomendable sustituir las pruebas de un grupo con las de otro.**

Por ejemplo, las pruebas de **inspección volumétrica tienen limitaciones cuando se intenta encontrar defectos cercanos a la superficie**, como es el caso del campo muerto del haz ultrasónico o la falta de definición (penumbra) en una radiografía.

Por otra parte las **partículas magnéticas o el electromagnetismo tienen grandes limitaciones en cuanto a su sensibilidad cuando aumenta el espesor** de la muestra que se inspecciona, ya que la intensidad del campo magnético generado o la corriente inducida decrecen de forma cuadrática o exponencial con la profundidad, representada por el espesor del material.

Para complementar lo anterior, **las pruebas de hermeticidad** no sustituyen de modo alguno a las demás, ya que tan **sólo aseguran que un recipiente pueda contener un fluido sin que existan pérdidas apreciables del mismo**; por lo que muy posiblemente en una primera prueba el recipiente pase con éxito; pero de existir un defecto no detectado con anterioridad por los demás ensayos, al paso del tiempo éste podría tener tendencia al crecimiento hasta convertirse en una falla del material del recipiente, con consecuencias tal vez desastrosas y la posible pérdida no sólo de bienes materiales, sino también de vidas humanas.

Finalmente, para efectuar una aplicación correcta de los ensayos no destructivos, debe seleccionarse previamente con un **esquema a seguir para capacitar, calificar y certificar al personal que realiza este tipo de inspecciones**.

Dicha actividad es importante, ya que no basta contar con el equipo adecuado si no se cuenta con un personal debidamente preparado para operarlo y que pueda obtener resultados **confiables, reproducibles y repetitivos**. Por lo antes mencionado es conveniente comprender que la capacitación del personal que realiza las inspecciones es una inversión a corto plazo y que evitará la sobreinspección, el desperdicio de materiales o la inadecuada aplicación de los equipos de inspección.

Una vez concluida la presentación en forma general de los Ensayos No Destructivos, de los aspectos referentes a las aplicaciones, ventajas, beneficios y limitaciones: de éstos. Se dará inicio a una breve descripción de los END más comúnmente empleados en México y del proceso y criterios para la capacitación, calificación y certificación de quienes aplican estas técnicas.

### **3.5 Técnicas de inspección volumétrica.**

Estas técnicas se emplean para **verificar la sanidad interna de los materiales**; comprueban el grado de integridad de un material en todo su espesor.

Son aquellas con las que se comprueba la integridad de un material en su espesor y se detectan discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza.

Estas técnicas de inspección incluyen los siguientes métodos de examen:

- Ultrasonido Industrial (UT).
- Radiografía Industrial (RT).
- Neutrografía (NRT).

➤ Emisión Acústica (AE).

Por regla general estos métodos deben considerarse como complementarios entre sí, ya que cada uno es especialmente sensible para apreciar un tipo determinado de indicaciones; por lo que la combinación correcta de

las técnicas arriba mencionadas permitirá detectar y evaluar correctamente las indicaciones que pudieran encontrarse en el interior de un material.

### 3.5.1 Definición y descripción de ultrasonido

Este sistema de inspección tiene sus orígenes en los ensayos de percusión, en los cuales los materiales eran golpeados con un martillo y se escuchaba cuidadosamente el sonido que la pieza examinada emitía. La desventaja de estos ensayos es que sólo permitían detectar defectos de una magnitud tal que ocasionarán un cambio en el tono del sonido que emitía el material sujeto a prueba y por este motivo eran poco confiables en la inspección preventiva.

Los equipos de ultrasonido que empleamos actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias que se seleccionen dentro de un ámbito de 0.25 hasta 25 Mhz.

#### Definición

Ultrasonido u ondas ultrasónicas **son vibración mecánicas** que se transmiten en el material por medio de ondas de la misma naturaleza que el sonido, pero con una **frecuencia mayor al rango audible**, o sea mayor a los 20,000 ciclos/segundo.

Algunas ondas ultrasónicas pueden transmitirse en sólidos, líquidos y gases, pero a diferente velocidad.

En su propagación, las ondas ultrasónicas serán reflejadas y transmitidas en las interfases donde se tenga un cambio de Impedancia Acústica (Z). La impedancia acústica es la resistencia que ofrecen los materiales al paso de las ondas ultrasónicas.

## **Descripción.**

El instrumento ultrasónico envía pulsos eléctricos con cierta frecuencia de repetición al transductor, este al recibirlos vibrará; estas vibraciones se propagan en el medio a una velocidad constante y serán reflejadas parcialmente cuando exista en su camino un cambio de “Z”; el reflejo en forma de eco, al ser captado por el transductor, producirá una señal eléctrica RF que será desplegada en la pantalla.

### **3.5.2 Requisitos y secuencia de la inspección por ultrasonido industrial.**

Antes de iniciar una inspección por UT, es necesario definir los siguientes parámetros, a fin de hacer una correcta selección del equipo de trabajo:

- Cuál es el tipo de discontinuidad que puede encontrarse.
- Qué extensión y orientación puede tener en la pieza.
- Qué tolerancias se pueden aplicar para aceptar o rechazar la indicación.

Una vez definidos los puntos anteriores, el siguiente paso es decidir qué equipo de inspección será utilizado.

Los equipos que actualmente existen de forma comercial ofrecen una gran variedad de alternativas, por lo que antes de comprar un equipo es conveniente que se analicen todas las posibles alternativas de operación, siendo recomendable escoger un instrumento que cuente con servicio, refacciones y confiabilidad; ya que la inversión inicial puede variar desde un mínimo de 6,000 USD, hasta varios cientos de miles de dólares.

Todas las normas establecen los requisitos mínimos que debe cumplir un instrumento de inspección por ultrasonido y son:

a) La ganancia, que es la capacidad de amplificación del instrumento y que debe ser de por lo menos 60 dB; esto es, que pueda amplificar las señales del orden de 1,000 veces como mínimo. Adicionalmente, la ganancia debe estar calibrada en pasos discretos de 2 dB.

b) La pantalla debe tener una retícula grabada en la pantalla del tubo de rayos catódicos y deberá estar graduada en valores no menores del 2% del total de la escala.

c) El ruido del instrumento (señal de fondo) no debe exceder del 20% del total de la escala vertical cuando la ganancia esté al máximo de operación.

En el caso de emplear medidores con lectura digital o analógica, la repetitividad del instrumento no deberá ser menor al 5%.

Por otra parte, todas las normas exigen que el instrumento de inspección ultrasónica sea revisado y, en caso necesario, recalibrado por un taller de servicio autorizado por el fabricante.

Este último punto es de vital importancia si se está trabajando bajo códigos o normas de aceptación internacional como AWS o ANSI/ASME. Con base en lo anterior, antes de adquirir un equipo, es recomendable visitar al proveedor y comprobar que cuenta con la licencia por parte del fabricante para dar el servicio de mantenimiento preventivo y correctivo al equipo. A continuación se deben seleccionar el palpador y el cable coaxial a ser empleados.

Los cables son del tipo coaxial para prevenir problemas de interferencia eléctrica y sus conexiones deben ser compatibles con las del instrumento y el palpador a emplear. La longitud del cable afectará la calidad de la inspección, por lo que se debe evitar el empleo de cables más largos de lo recomendado por los fabricantes del equipo.

La selección del palpador es uno de los puntos más críticos, ya que de él dependerá en gran medida la calidad de la inspección.

Los factores a ser tomados en cuenta para la selección de un palpador son:

- Número de elementos piezoeléctricos.
- El tipo de inspección (contacto, inmersión, alta temperatura).
- El diámetro del elemento piezoeléctrico.
- La frecuencia de emisión.
- En su caso, el ángulo de refracción.

- El tipo de banda.
- El tipo de protección de antidesgaste.

Por lo común, las normas establecen las condiciones mínimas que deben cumplir los palpadores. Como la variedad de estos elementos es muy amplia, es conveniente contar con los catálogos de los fabricantes o consultar al proveedor aprobado respecto a las características de cada unidad antes de efectuar una adquisición.

Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o un cerámico piezoeléctrico dentro del palpador; este elemento, que llamaremos transductor, tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Al ser excitado eléctricamente, y por el efecto piezoeléctrico, el transductor vibra a altas frecuencias (lo que genera ultrasonido); estas vibraciones son transmitidas al material que se desea inspeccionar.

Durante el trayecto en el material, la intensidad de la energía sónica sufre una atenuación, que es proporcional a la distancia del recorrido. Cuando el haz sónico alcanza la frontera del material, dicho haz es reflejado. Los ecos o reflexiones del sonido son recibidos por otro (o por el mismo) elemento piezoeléctrico y su señal es filtrada e incrementada para ser enviada a un osciloscopio de rayos catódicos, en donde la trayectoria del haz es indicada por las señales de la pantalla; también puede ser transmitida a un sistema de graficado, donde se obtiene un perfil acústico de la pieza; a una pantalla digital, donde se leerá un valor o a una computadora, para el análisis matemático de la información lograda.

Es importante apuntar la necesidad de emplear un acoplante (aceite, grasa o glicerina) con objeto de que el sonido pueda transmitirse del transductor a la pieza de trabajo sin que existan grandes pérdidas de energía en la interfase acústica conformada por el espacio de aire entre el metal o el material a examinar y el palpador.

El acoplante debe reunir las siguientes características para emplearlo con confianza: ser inerte al material en inspección; de fácil remoción después de terminar la inspección; debe formar una capa homogénea en la superficie de contacto; además, su costo será bajo y fácil la adquisición.

Cabe aquí aclarar que algunas normas o códigos son rígidamente específicos en el tipo de acoplante a ser empleado, quedando limitado al empleo de glicerina, agua o gel de celulosa.

En cuanto al sonido, una vez que ha sido introducido en el material sujeto a inspección, puede presentar diferentes formas (modos) de conversión (viaje).

Así pues, si el palpador está orientado perpendicularmente a la superficie de inspección (superficie de incidencia), el sonido viajará preferentemente de forma compresiva (se desplazará con una velocidad longitudinal o compresiva) y será este modo el que se empleará para detectar las indicaciones.

Si por el contrario el palpador se inclina dentro de ciertos ángulos (entre el primer y segundo ángulo crítico de la ley de Snell) sobre la superficie de incidencia, el sonido viajará preferentemente de forma cortante: el sonido se desplazará con una velocidad transversal o cortante. Por último, si el palpador se inclina con una orientación tal que el haz incida con un ángulo igual al segundo ángulo crítico de la ley de Snell, el haz viajará de forma superficial: el sonido se desplazará con una velocidad superficial.

Cada uno de estos modos de propagación tiene aplicaciones muy específicas en la inspección ultrasónica y su selección dependerá de las características de la pieza sujeta a inspección y de las discontinuidades que se quieran detectar.

Si el material está libre de indicaciones que puedan ser detectadas, la señal será constante en cuanto a su intensidad y posición; pero si hay un cambio en las propiedades acústicas del material o una discontinuidad, que refleje, atenúe o disperse el haz de ultrasonido, la señal se modificará y se podrá observar una disminución en la amplitud de la señal de la pared posterior o la aparición de indicaciones antes de lo esperado.

La interpretación de estos cambios en las señales debe ser realizada por personal que ha sido capacitado, calificado y que cuente con la experiencia necesaria en la inspección a realizar, ya que de ello depende que los resultados sean confiables, reproducibles y repetitivos.

### 3.5.3 Herramientas para la inspección por ultrasonido.

#### 3.5.3.1 Palpadores

Los **palpadores** pueden ser clasificados en los grupos siguientes de acuerdo a:

- Forma de propagación del haz ultrasónico.
- Técnica de inspección
- Numero de cristales
- Grado de amortiguamiento
- Aplicaciones especiales.

#### Diferentes tipos de palpadores.

El palpador de haz angular esta formado de un palpador de haz recto y una cuña de plástico llamada zapata, con ella se logra la conversión de modo por incidencia angular, el palpador puede ser de dos tipos:

1. Como una unidad integral.
2. En dos partes, desmontable.

Estos palpadores pueden ser de: ondas transversales, longitudinales y transversales, ondas longitudinales, superficiales y de placa o de Lamb.

Los palpadores de contacto son colocados directamente sobre la superficie de prueba, separados por una película de acoplante.

En palpadores de inmersión la transmisión de las ondas se efectúa a través de una columna líquida sin que exista contacto o rozamiento con la superficie de la pieza.

Palpadores de doble cristal, dual o duplex. Se llaman así por que están compuestos de dos cristales (uno emite y el otro recibe), ensamblados sobre unas líneas de retardo internas con una ligera inclinación. Las líneas de

retardo focalizan el haz permitiendo con ello penetrar microestructuras de grano burdo, tal como el acero inoxidable en espesores delgados. Sus aplicaciones o usos son:

- Para medir espesores de pared  $\leq 2.00$  pulgadas.
- Para detección de discontinuidades en espesores  $\leq 2.000$  pulgadas.
- Para detectar discontinuidades cercanas a la superficie.

Palpadores para alta temperatura estos se utilizan sobre piezas muy calientes.

### Frecuencias y diámetros comerciales de palpadores

FRECUENCIA
0.50 Mhz
1.00 Mhz
2.25 Mhz
3.50 Mhz
5.00 Mhz
7.00 Mhz
10.0 Mhz
15.0 Mhz
20.0 Mhz
25.0 Mhz

DIAMETROS
1/8" (0.125 in)
1/4" (0.250 in)
3/8" (0.375 in)
1/2" (0.500 in)
5/8" (0.625 in)
3/4" (0.750 in)
1.0" (0.1000 in)

**Rangos de frecuencia  
comunes  
para inspección**

(de un rango de 0.50 a 25.0 Mhz.)

### Las frecuencias de uso común son:

**2.25 Mhz.** Es la frecuencia nominal para la detección y evaluación de discontinuidades en piezas fundidas, forjadas, soldadura y placas.

**5.0 Mhz.** Es la frecuencia nominal para la medición de espesores (palpador dual) en recipiente, tuberías y tanques.

**0.5 y 1.0 Mhz.** Son las frecuencias bajas, comunes para la detección y evaluación de discontinuidades en materiales muy gruesos y/o con estructura de grano burdo.

### 3.5.3.2 Blocks patrón.

El **block patrón o patrón** son secciones de material sano con propiedades acústicas (velocidad y atenuación) iguales o similares a la pieza a examinar: pueden ser desde una pieza o un juego de piezas para una determinada actividad específica; se clasifican en tres tipos:

- Blocks de calibración.
- Blocks de referencia.
- Blocks mixtos

**Blocks de Calibración** contienen dimensiones y formas conocidas; algunos están dimensionados en milímetros y otros en pulgadas.

**Blocks de Referencia** contienen dimensiones, formas y reflectores de referencia para estandarizar la calibración del sistema de acuerdo a la normatividad aplicable.

### 3.5.4 Aplicaciones

La inspección ultrasónica es uno de los métodos de inspección no destructiva más ampliamente utilizado; en el área metal-mecánica es utilizado principalmente para:

- Detección de discontinuidades.
- Medición de espesores.
- Medición de durezas.
- Limpieza de componentes delicados.

### 3.5.5 Ventajas

- Este método es de gran velocidad de prueba debido a que la operación es electrónica, proporciona indicaciones prácticamente instantáneas de discontinuidades y/o lecturas de espesor.
- Son de mayor exactitud en la determinación de la posición de discontinuidades internas, estimando sus tamaños equivalentes, orientaciones, forma (lineal, puntual o extendida), también permite la detección de discontinuidades extremadamente pequeñas.
- Es de alto poder de penetración lo que permite localizar discontinuidades a una gran profundidad (varios metros en acero al carbono conformado).
- También permite la interpretación inmediata, la automatización y el control del proceso de fabricación. No utiliza radiaciones perjudiciales para el organismo humano y no tiene efectos sobre el material inspeccionado.
- Solo requiere el acceso a una superficie, esto permite el examen de equipos y tuberías en servicio.

### 3.5.6 Limitaciones

- Existen también limitaciones un ejemplo de ellas son en las piezas de geometría compleja, rugosas, de grano grueso, porosas, demasiado ásperas, muy pequeñas, muy delgadas o no homogéneas, son difíciles de inspeccionar. Se necesita utilizar patrones de referencia, tanto para calibrar el equipo como para caracterizar las discontinuidades.
- Es necesario un acoplante para obtener una transferencia efectiva de las señales entre pieza y palpador. El patrón de referencia debe de ser del mismo material o parecido al que se va a inspeccionar.
- El **acoplante** es un medio acústicamente conductor interpuesto entre el palpador y la superficie del material a ensayar. Su objetivo es desplazar la fina película de aire existente para permitir la transmisión de la presión acústica incidente. Los comúnmente usados son: **agua, aceite, glicerina, grasas de petróleo, grasas de silicón, pasta de celulosa, gel de base agua, etc.**

El acoplante, incluye los aditivos, no debe ser perjudicial al material que esta siendo examinado. Se debe considerar lo siguiente para la selección de un acoplante:

- Acabado superficial de la pieza
- Temperatura de la superficie de prueba
- Posibilidad de reacciones químicas entre la superficie de prueba y el acoplante
- Requerimientos de limpieza (algunos acoplantes son difíciles de remover).
- Posición de la superficie de barrido.

Además la viscosidad del acoplante debe ser la apropiada al acabado de la superficie a examinar. El examen de superficies muy rugosas, generalmente requiere de acoplantes de alta viscosidad.

#### 4.1.-DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL RODANTE

Un tren, lo integran nueve carros divididos en tres elementos y en cada elemento se tienen dos motrices y un remolque. Existen dos tipos de carros motrices, aquellos provistos de una cabina de conducción (M) y los que no cuentan con dicha cabina (N). Todos los carros motrices están equipados con dos boguis o carretillas, y cada carretilla cuenta con dos motores de corriente continua de 150 HP y 375 V, conectados eléctricamente en serie, mecánicamente acoplados a un eje diferencial. Los motores funcionan tanto al arranque como durante el frenado, en esta última se pretende recuperar energía.



FIG. 4.1 EL METRO SE COMPONE DE NUEVE CARROS. STC METRO

En ambos lados de las carretillas motoras se encuentran montados dos pantógrafos estos llevan escobillas de carbón que al deslizarse sobre la cara vertical de la barra guía toman la corriente de alimentación para todos los circuitos de alta tensión (750 VCD); las carretillas están provistas de dos escobillas metálicas, que al deslizarse sobre el riel de seguridad, cierran el circuito de alta tensión, además de asegurar la descarga de la electricidad estática de la carrocería.

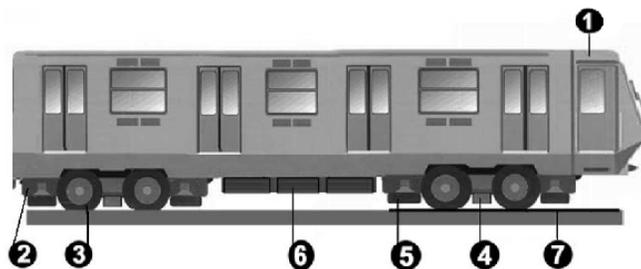


FIG. 4.2 COMPONENTES DEL CARRO MOTRIZ. SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO (METRO). 1) CABINA DE CONDUCCIÓN, 2) MOTORES DE TRACCIÓN, 3) RUEDAS PORTADORAS, 4) ESCOBILLAS, 5) RUEDAS GUÍA, 6) EQUIPOS DE REGULACIÓN DE LOS MOTORES, 7) CARRETILLA O BOGUIE.

Al centro del bogui y entre los ejes diferenciales se localiza un pivote que se une a una estructura piramidal que va fija a la carrocería, esta unión asegura la transmisión de la fuerza de arrastre del bogui a la carrocería durante la circulación del tren.

El sistema de suspensión secundaria, consiste en dos resortes de acero vulcanizado que van ligados por una barra de torsión que soporta y amortigua el peso de la carrocería sobre el bogui.

## **4.2 PRINCIPIO DE RODAMIENTO**

El mecanismo de frenado lo componen cuatro cilindros neumáticos, dispuestos a los lados de las ruedas metálicas, accionando cada uno a dos zapatas de madera especialmente tratada, el tratamiento de la madera consiste en una impregnación con aceite de cacahuete y sal ignífuga, para evitar la combustión de las mismas.

El sistema de control para la tracción y el frenado eléctrico se encuentra montado en la parte inferior de los carros motrices, consiste básicamente en un servomecanismo que a base de levas accionan a los diferentes contactores eléctricos que establecen y cortan los circuitos de cada grado de tracción y frenado.

Los carros motrices “N” aseguran la alimentación en alta tensión de los motores de tracción y de los carros remolque (R). Estos carros tienen carrocería idéntica a la del carro motriz “N”, estos reposan sobre dos carretilla que, a diferencia de las motrices, no cuentan con motores de tracción por lo que se denominan carretillas portadoras.

Bajo el carro remolque se encuentran instalados los siguientes equipos:

a) Motocompresor; produce el aire comprimido que se emplea para el frenado y el cierre y apertura de las puertas.

b) Motor-Generador, para los materiales MP-68, NM-73A y NM-73B.

Que proporciona la corriente alterna de 250 V-250 Hz; que se destina principalmente para el alumbrado propio de los carros y para la alimentación de los circuitos de tren que se alimentan en baja tensión.

El motocompresor y el motor-generador trabajan con 750 V, proporcionada por el carro motriz “N” adyacente.

c) Convertidor estático para los materiales NM-79, NC-82, NM-83A y MP-82.

Algunos equipos eléctricos del tren requieren para su funcionamiento de una alimentación de corriente alterna; esta es proporcionada por un equipo electrónico llamado convertidor estático (CES), con las siguientes características:

- Tensión de alimentación de 750 VCC
- Tensión de salida alterna 220 CA, a una fase 60 Hz.
- Tensión de salida directa 75 VCC
- Captor de pilotaje automático.

d) Baterías, suministran la corriente de baja tensión 72 VCD, para la alimentación de los circuitos de comandos y mandos del tren.

Se localizan sobre el costado derecho de los carros remolque, cada uno de los bancos esta compuesto por cincuenta acumuladores eléctricos alcalinos de Níquel-Cadmio en envase de acero, con un voltaje de 1.5 volts/celda.

Los carros remolque "R" aseguran de corriente continua a través del motor-generador, la alimentación de los circuitos del alumbrado del mismo carro remolque, además de alimentar también a los carros motrices "M" y "N" que le son asociados.

#### **4.2.1 RUEDAS PORTADORAS**

El rodamiento de los carros se logra a través de dos carretillas o boguis dotados cada uno de cuatro ruedas de eje horizontal, provistas de neumáticos, situados dos a cada lado del bogui, a estos neumáticos se les ha denominado neumáticos portadores, siendo estos los que normalmente soportan la carrocería, deslizándose sobre un perfil metálico tipo "I" de olas anchas denominado pista de rodamiento.

#### **4.2.2 RUEDAS GUÍA**

El guiado se logra mediante cuatro ruedas eje vertical, provistas de neumáticos, situados en los cuatro ángulos del bogui, que se apoyan en dos barras laterales denominadas barras guías y que se encuentran a todo lo largo de las líneas, salvo donde existe un aparato de guía necesario para efectuar el paso de una vía a otra para efectuar alguna otra maniobra.

### 4.2.3 RUEDAS DE SEGURIDAD

Se ha acoplado una rueda auxiliar metálica a cada rueda portadora, análoga a las ruedas convencionales del ferrocarril, pero provista de una ceja alargada. A pesar de encontrarse situada en la vía normalmente, ésta nunca toca el riel sino en caso de pérdida de aire de algún neumático portador de guía y en el caso de falta de barra guía, como es en zonas de maniobra, la ceja de la rueda de seguridad se recarga contra el hongo del riel y suplente las funciones de la rueda de guiado.

Además tiene dos funciones muy importantes para el funcionamiento del tren, la primera consiste en actuar como tambor de freno, ya que al actuar el frenado neumático, las zapatas de madera se comprimen contra la cara de rodamiento, logrando de esta manera la disminución de la velocidad y por consiguiente el paro total del tren.

Finalmente estas ruedas metálicas permiten el paso del tren a talleres para su montaje y que se tenga acceso total a las ruedas portadoras y de guiado, ya que en talleres el tren se desliza sobre las ruedas de seguridad.

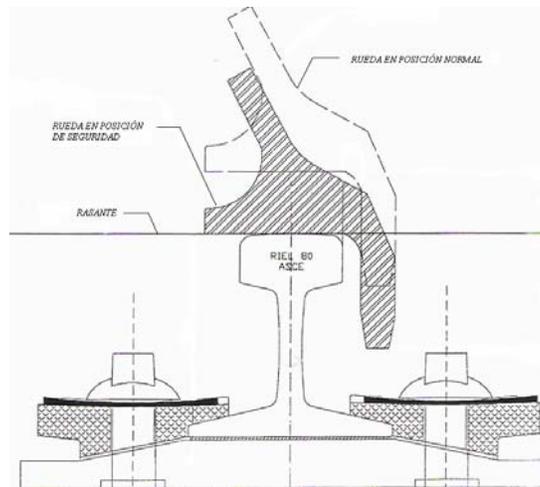


FIG. 4.3 EN LA ILUSTRACION SE OBSERVA EL CONTACTO DE LA RUEDA METALICA.

### 4.3 PILOTAJE AUTOMÁTICO

La red del Metro trabaja con sistemas de pilotaje automático implantados a raíz del accidente del 20 de octubre de 1975. Mediante el pilotaje automático, la distancia entre los trenes, lo mismo que su velocidad y frenado, se gobiernan de manera automatizada, por lo que la responsabilidad de estas operaciones no recae ya sobre el conductor. Es uno de los sistemas más complejos y seguros del mundo, pero provoca breves detenciones y retardos cuando se registra cualquier pequeña variación en las condiciones de seguridad.

En los trenes de la Ciudad de México, entre sus diversos equipos electrónicos, existe uno denominado caja negra, el cual tiene la finalidad de captar y almacenar información diaria de los más importantes eventos operativos y técnicos que ocurran durante el transporte del público usuario. Dicha información, analizada y evaluada, permite mejorar las condiciones operativas de los trenes y elevar la calidad del servicio.

El Metro cuenta con tres Puestos Centrales de Control, donde mediante sus tableros de control óptico, se regula la circulación de todos los trenes en la red, atendiendo una comunicación permanente con todos los conductores y desde donde es posible cortar la energía eléctrica en un tramo o en toda la red. En la seguridad operativa del Metro se emplean más de 2,500 personas.

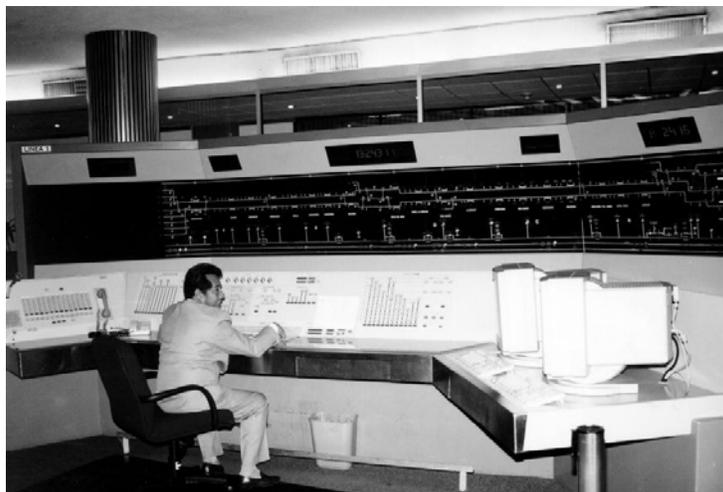


FIG. 4.4 CENTRAL DE CONTROL DEL STC METRO

De la señalización que se realiza mediante los semáforos depende la seguridad de los usuarios, del personal del Metro, de la circulación de los trenes y de las instalaciones fijas. Los semáforos en el Metro garantizan, en todo momento, la existencia de una distancia de seguridad entre dos trenes. A esta distancia se conoce como sección tapón.

Esto significa que, como protección un tren siempre tendrá detrás de él dos semáforos en rojo. Antes de que un tren del Metro pueda avanzar, es necesario que se lo permitan 23 parámetros o condiciones de seguridad integrados en los vagones y las vías.



FIG. 4.5 LOS SEMÁFOROS GARANTIZAN UNA DISTANCIA DE SEGURIDAD ENTRE TRENES. STC METRO

La Gerencia de Instalaciones Fijas tiene a su cargo conservar en óptimas condiciones de operación y funcionamiento los equipos y sistemas electrónicos, electromecánicos y de vías que conforman la infraestructura de la red del Metro. Dichas instalaciones, equipos y sistemas cuentan con una tecnología de vanguardia, la cual permite garantizar en todo momento la seguridad en la circulación de los trenes a través de los sistemas de Pilotaje Automático y Mando centralizado.

El Sistema de Transporte Colectivo efectúa de manera permanente diversos trabajos para mejorar el sistema electromecánico de las líneas, entre los que se incluye sustituir kilómetros de cable de alta tensión, reemplazar circuitos de alumbrado, fuerza y tracción, instalar nuevos sistemas eléctricos y mejorar los Sistemas de Mando Centralizado, Pilotaje Automático, Regulación de Trenes y Señalización.



FIG. 4.6 SISTEMA DE MANDO DE UN TREN NEUMÁTICO STC METRO

### 1.3 PARQUE VEHICULAR DEL STC METRO

El parque vehicular del STC metro está compuesto por dos tipos generales de trenes, los trenes neumáticos y los trenes férreos, los cuales a su vez cuentan con diferentes tipos de modelos, utilizados y distribuidos a lo largo de toda la red.

#### 4.3.1 TRENES NEUMÁTICOS

Este tipo de parque vehicular está integrado por diez modelos diferentes de trenes sobre neumáticos, los cuales circulan en las líneas de la 1 a la 9 y la línea B. Su grado de eficiencia es variable en función de las características técnicas con que fueron construidos.

Para llevar a cabo una comparación homogénea de la eficiencia entre los distintos modelos, se ha formulado un "índice de confiabilidad" que consiste en la relación entre el número de carros en operación y la cantidad de averías que ocurren durante los kilómetros recorridos, en un período determinado. En consecuencia, un índice más elevado representa una mayor confiabilidad para el tren. Por otra parte, el índice de disponibilidad del material rodante, es expresado como el cociente de la cantidad de trenes disponibles entre la cantidad de trenes en operación.

En el período de 1996 a junio de 1999, el material rodante registró un promedio de 4.6 averías por cada 10,000 kilómetros recorridos, las cuales se debieron básicamente a los cuatro principales sistemas que son:

- a) Apertura y cierre de puertas.
- b) Motrices inactivas.
- c) Pilotaje automático.
- d) Elementos apagados.



FIG. 4.7 EL PARQUE VEHÍCULAR ESTÁ INTEGRADO POR DIEZ MODELOS DIFERENTES DE TRENES

### 4.3.2 TRENES FÉRREOS

El parque vehicular de rodadura férrea está compuesto actualmente por 26 trenes, de seis carros cada uno, de los cuales 20 son del Modelo FM-86 y 6 son de un nuevo material denominado FM-95A, que forman parte de un lote de 13 trenes en fabricación. Estos últimos cuentan con tecnología de punta, incluyéndose la tracción asíncrona.

Para las estadísticas que aquí se muestran no se consideran los trenes FM95A debido a que se están integrando paulatinamente al servicio. El índice de fiabilidad se establece al igual que el material neumático.

El índice de disponibilidad se calcula sobre la base del cumplimiento del polígono de carga vigente actualmente en la Línea "A", que es de 18 trenes en horas punta.

En estos trenes las fallas más frecuentes se ubican principalmente en dos sistemas:

- a) Apertura y cierre de puertas.
- b) Pilotaje Automático.

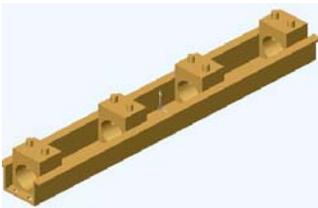


FIG. 4.8 EL PARQUE VEHICULAR DE RODADURA FÉRREA ESTÁ COMPUESTA DE 26 TRENES, 20 SON DEL MODELO FM86 Y 6 SON FM-95<sup>a</sup>. STC METRO

### 3. Bogie

El Bogie es también conocido como carretilla. La función del bogie es la de portar a la caja, la guía y la desplaza. Comprende principalmente de las ruedas, los cuerpos de ejes, suspensiones, motores, transmisiones y bastidor.

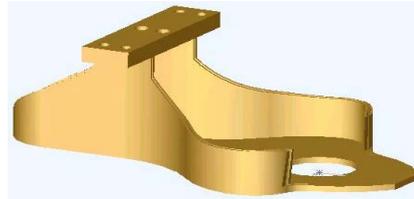
- Suspensión secundaria
  - Travesaño (1)
  - Barra de torsión (2)
  - Pirámide (3)
- Bastidor de Bogie (4)
- Ruedas de seguridad (5)
- Puente motor (6)
- Tapa de nivel de aceite (7)
- Brazo de rueda guía (8)
- Tornillo de maza (9)



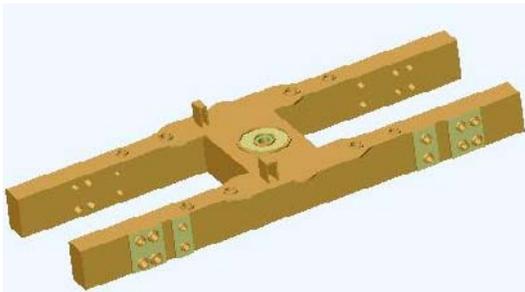
1



2



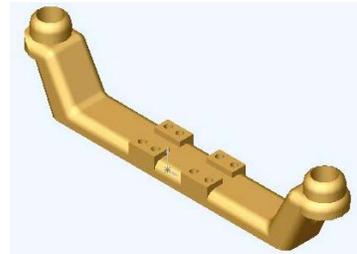
3



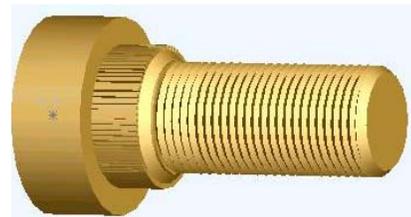
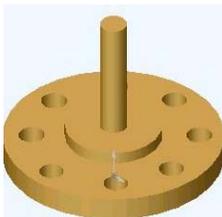
4



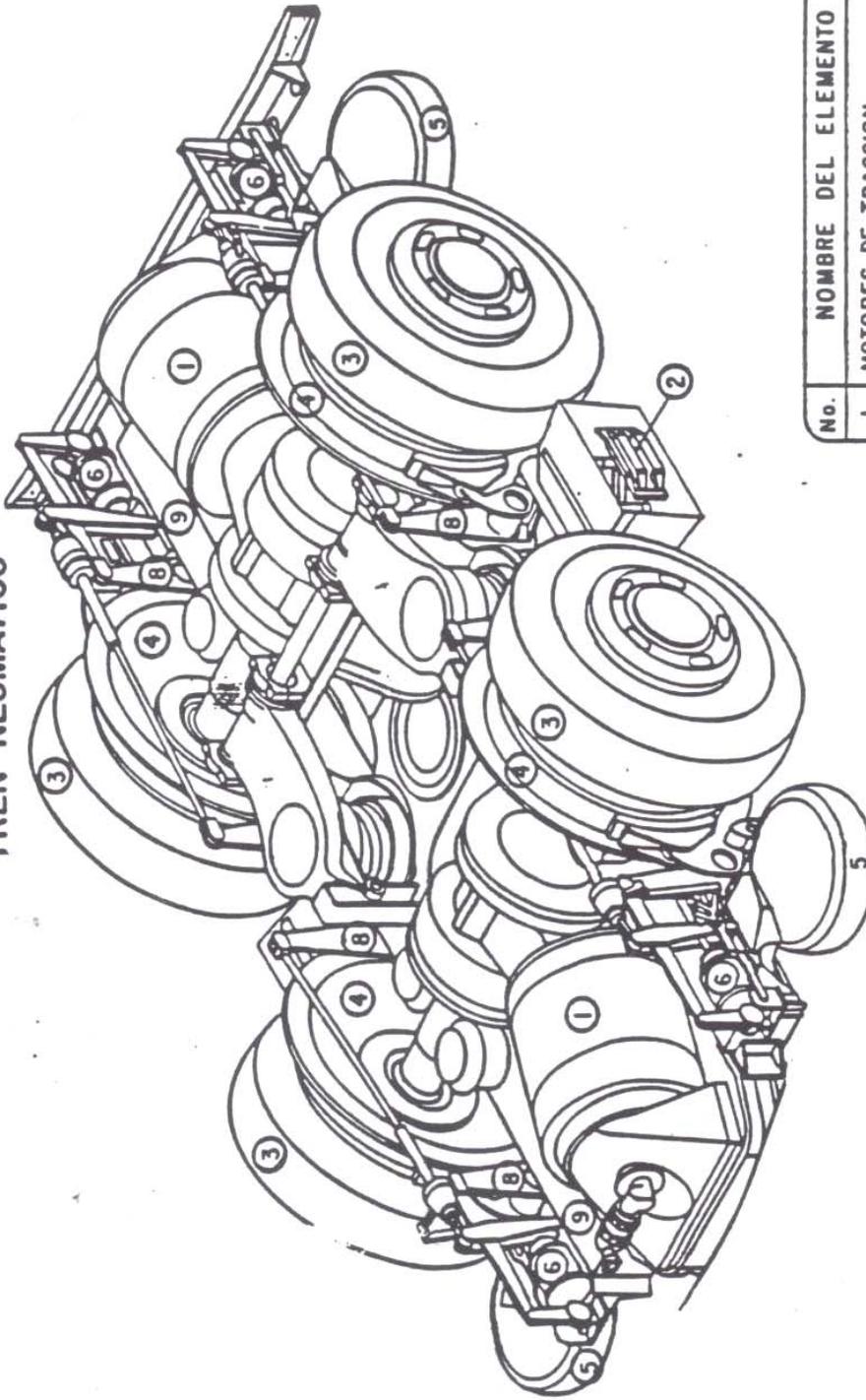
5



6



**CARRETILLA MOTORA  
TREN NEUMÁTICO**



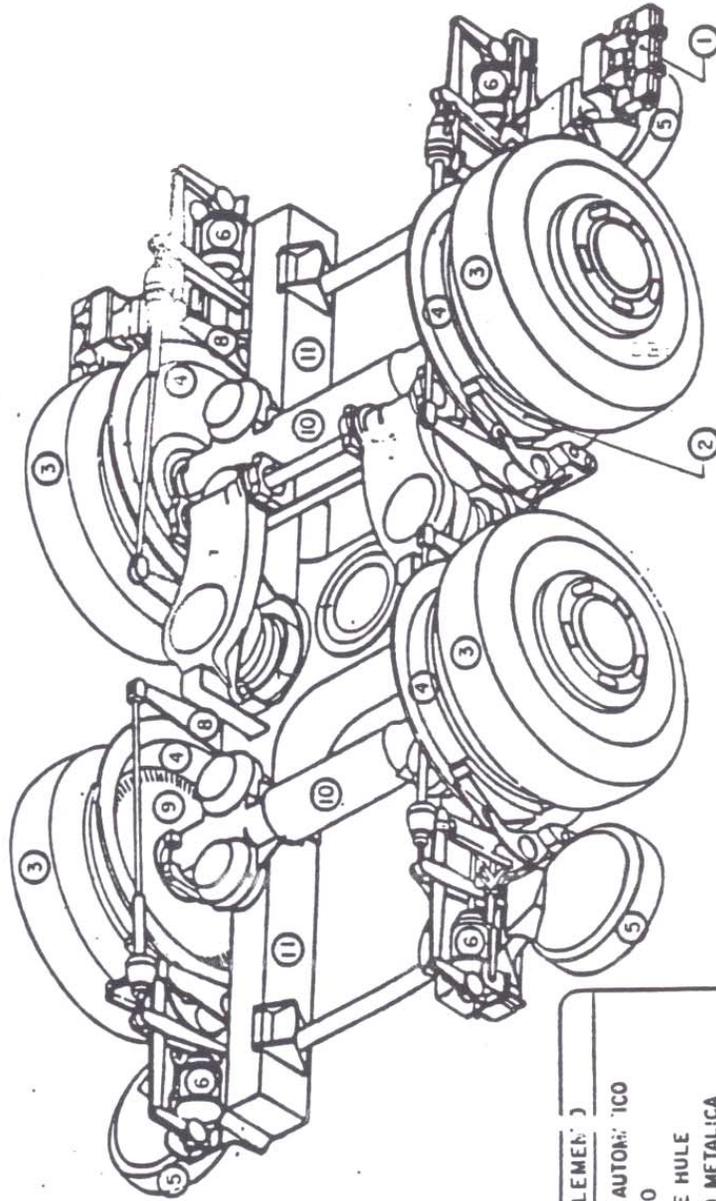
7

8

9

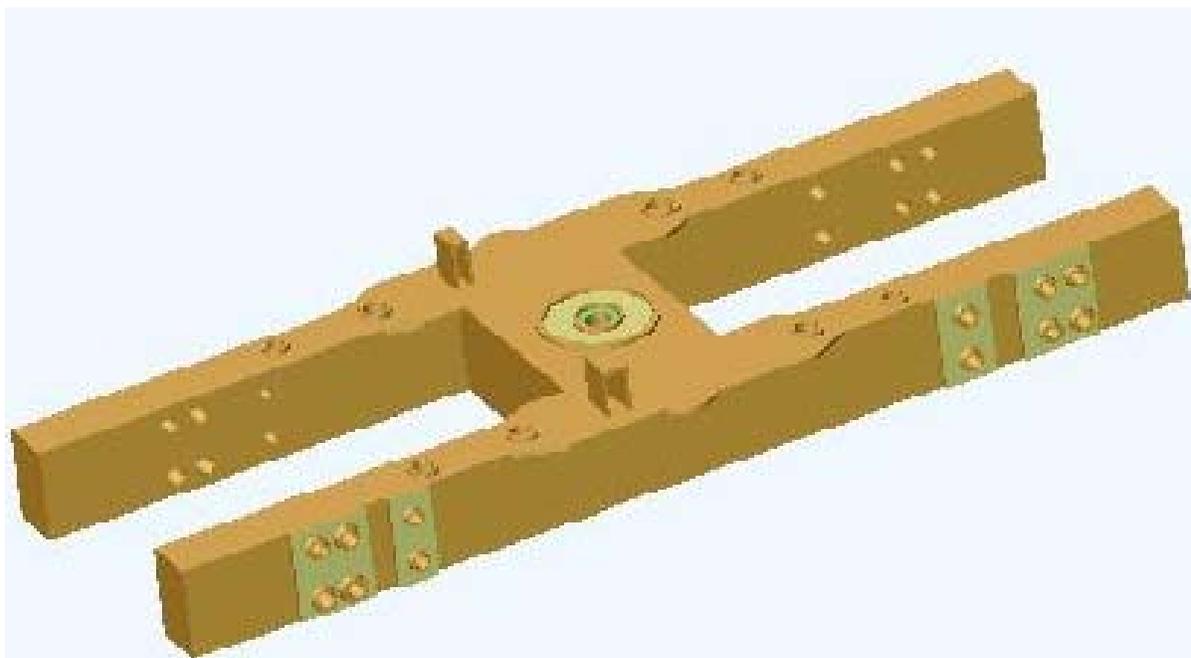
No.	NOMBRE DEL ELEMENTO
1	MOTORES DE TRACCION
2	ESCOBILLAS POSITIVAS
3	RUEDA PORTADORA DE HULE
4	RUEDA DE SEGURIDAD METALICA
5	RUEDA GUIA DE HULE
6	CILINDRO DE FRENO
7	SUSPENSION SECUNDARIA
8	VARILLAJE DEL FRENADO
9	BASTIDOR CHASIS

**CARRETILLA PORTADORA**  
( TREN NEUMÁTICO )



No.	NOMBRE DEL ELEMENTO
1	CAPTOR DE PILOTAJE AUTOMÁTICO
2	ZAPATAS DEL FRENADO
3	RUEDA PORTADORA DE HULE
4	RUEDA DE SEGURIDAD METÁLICA
5	RUEDA GUÍA DE HULE
6	CILINDRO DE FRENO
7	SUSPENSION SECUNDARIA
8	VARILLAJE DEL FRENADO
9	RUEDA GUÍA METÁLICA

## BASTIDOR DE BOGUI



## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LA PLACA EN EL BASTIDOR DEL BOGIE DE LOS CARROS DEL METRO SOBRE NEUMÁTICO, MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO.

### 5.1 ANTECEDENTES:

Considerando que los carros del metro sobre neumático tienen una antigüedad que va desde los siete años (NE-92) hasta los 30 años (estos últimos material MP- 68), siendo una de sus partes mas importante el elemento denominado “bastidor de bogie”, puesto que es el componente que contiene el sistema de acoplamiento entre el chasis y la caja, y varios accesorios como son; las transversas, la timonería de freno, el freno de inmovilización, las escobillas, los motores, las ruedas de seguridad, la rueda portadora, la rueda guía, suspensión secundaria, dispositivo de estabilización transversal, entre otros.

El bastidor de bogui se constituye de una estructura en forma de H fabricada en placa de acero de bajo contenido de carbono de alta soldabilidad. En el bastidor del bogui los ensambles son efectuados por soldadura de arco eléctrico y su construcción es de tipo caja con elementos prefabricados por doblado o por forja, al igual que las fijaciones y los soportes necesarios para que sobre el bastidor se ensamblen sus diversos accesorios.

Durante la revisión general de los trenes se ha detectado que el bastidor del bogui no es completamente hermético y permite la entrada y acumulación de agua, la cual genera un proceso de corrosión de la placa de acero en el interior del bastidor, produciendo al paso del tiempo una pérdida de espesor en la misma, haciendo esta situación la necesidad de conocer el espesor de pared de la placa para establecer la confiabilidad del desempeño de este elemento.

### Contenido del procedimiento

#### 1 OBJETIVO.

Establecer los lineamientos necesarios para determinar mediante la técnica de ultrasonido el espesor de la placa de acero de bajo contenido de carbono que constituye el bastidor del Bogie de los carros del metro sobre neumático, para garantizar un servicio óptimo de este elemento, dada su función fundamental en el ensamble de los carros.

#### 2 ALCANCE

Este procedimiento permite evaluar la pérdida de espesor de la placa de acero de bajo contenido de carbono empleando la técnica de contacto con un palpador de doble cristal en un equipo detector de fallas del tipo pulso eco y barrido tipo A.

### 3 RESPONSABILIDADES.

Es responsabilidad del personal que realiza la inspección apegarse a lo que establece el presente procedimiento. Así como la interpretación, evaluación y emisión de los resultados de cada espécimen ó muestra evaluada.

### 4 NORMAS Y DOCUMENTOS DE REFERENCIA.

4.1- Manual proporcionado por el fabricante para la operación del equipo de ultrasonido empleado.

4.2 – ASTM E – 797-90, Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulso-Echo Contac Method.

4.3 - ASTM E – 317-85, Standar Practice for evaluating performace characteristics of ultrasonic pulse-echo testing systems without the use of electronic measurements.

4.4.-Norma nacional NOM B -482-91, Capacitación, calificación y certificación de personal de ensayos no destructivos.

### 5.- REQUISITOS DEL PERSONAL.

El personal que realice la inspección deberá estar calificado al menos como Nivel 1 en la técnica de ultrasonido industrial según la norma nacional NOM B-482-91

### 6. EQUIPO Y MATERIAL.

6.1 - Unidad de ultrasonido o equipo de medición de espesores del tipo pulso eco y barrido tipo "A"

6.2 - Palpador de doble cristal con un frecuencia comprendida entre 2 y 8 Mhz.

6.3 - La forma del transductor puede ser circular, rectangular o cuadrada, preferentemente circular con un diámetro de 6 a 12 mm. Y un área de 28.27 a 113.10mm<sup>2</sup>

6.4 - Los cables coaxiales deberán estar en buenas condiciones y poseer las conexiones adecuadas, al equipo o en su defecto utilizar adaptadores.

6.5 - Como acoplante podrá utilizarse glicerina, aceite o pasta de celulosa diluida.

NOTA: El acoplante empleado deberá ser el mismo en la calibración y en la inspección.

6.6 - Bloque de calibración de pasos que contenga espesores de 2 a 6 mm con incrementos de 1mm fabricado en acero de bajo contenido de carbono.

## 7. REQUISITOS GENERALES.

7.1 - El instrumento debe permitir un cambio de amplitud de 1dB y tener una pantalla vertical clara y bien definida en intervalos equivalentes al 2% del total de la amplitud vertical. También debe presentar una pantalla horizontal definida y con divisiones equivalentes al menos el 2% de la amplitud total de la pantalla.

7.2 - El equipo debe presentar una linealidad en la escala horizontal de la pantalla de +/-2% del total de la pantalla y una linealidad en la escala vertical de pantalla de +/-5% en al menos el 80% del total de pantalla.

7.3 - El equipo debe verificarse cada tres meses o antes de un periodo de uso intenso en linealidad de la escala vertical, linealidad de la escala horizontal y precisión de la ganancia calibrada, según norma ASTM E -317-85.

7.4 - El equipo debe estar dentro del periodo vigente de calibración.

## 8. CALIBRACIÓN EN DISTANCIA.

8.1 - Al inicio de cada inspección el equipo detector de fallas deberá calibrarse en distancia, el método básico de calibración en distancia

aplicable es el indicado en el procedimiento específico para medición de espesores del equipo empleado el cual se resume a continuación:

8.2 - Aplicar acoplante en el bloque de pasos en el espesor mínimo (2 mm) y sobre el espesor máximo (6 mm).

8.3 - Quitar los seguros a los controles de retardo y longitud de barrido.

8.4 - Localizar el pulso inicial con el control de retardo de barrido y colocarlo en el cero de la escala (con la finalidad de tenerlo ubicado).

8.5 - Colocar el palpador sobre el espesor mínimo y ajustar con el control de rango burdo convenientemente hasta observar la reflexión de pared posterior (RPP).

8.6 - Ajustar la RPP a una amplitud ligeramente mayor al 100% con el control de ganancia y con el control de retardo colocar el inicio de la inflexión en la división 2 de la escala horizontal. No importa si el pulso inicial se desplaza a la izquierda de la pantalla hasta desaparecer, éstos no es relevante.

8.7 - Colocar el palpador sobre el espesor máximo con el control de rango fino (longitud de barrido) y colocar la RPP en la división 6 de la escala horizontal. En caso necesario hacer uso del control de rechazo para definir perfectamente el inicio de la señal

8.8 - Colocar nuevamente el palpador sobre el espesor mínimo y con el control de retardo ajustar la RPP en la división 2 de la escala horizontal.

8.9 - Repetir los pasos de los párrafos 8.6 y 8.7 hasta que las RPP se obtengan en las divisiones 2 y 6 respectivamente, sobre la escala horizontal.

## 9. EXPLORACIÓN U BARRIDO.

9.1 – La superficie de inspección deberá estar libre de suciedad, escamas y cualquier material extraño además de tener un acabado superficial que permita un buen asentamiento y desplazamiento del palpador, la velocidad de barrido no debe exceder de 150mm/segundo.

9.2 - La medición de espesores se realizará en los puntos de intersección sobre un cuadrículado de 25mm.

Cuando en algún punto se detecte un decremento del espesor nominal de la placa de acero, se procede a efectuar un barrido alrededor de este punto para determinar el espesor mínimo en esta zona y delimitar su extensión.

## 10. LIMPIEZA POSTERIOR.

Una vez terminada la inspección remover completamente los residuos del acoplante.

## 11. EMISIÓN DEL REPORTE DE RESULTADOS.

Los resultados de cada inspección se registrarán en los formatos anexos y el informe deberá de contener:

- No. de procedimiento utilizado
- No. de serie de la pieza inspeccionada.
- Fecha y lugar de la inspección.
- Equipo utilizado.
- Palpador utilizado.
- Frecuencia central del transductor.
- Tamaño del transductor.
- Identificación de los bloques utilizados
  
- Acoplante utilizado.
- Condición superficial.
- Nombre, firma y nivel del personal que realizó la inspección y revisó
- Identificación y localización del área explorada, indicandola en croquis.
- Croquis con reticulado para la identificación de los valores relevantes que se incluyen en el informe.

**EJEMPLO: CARRO N-1263 REHABILITADO NM-73 A.**

DATOS OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN DE ESPESORES EN LOS PERFILES DE LOS LANGUEROS QUE CONFORMAN EL BASTIDOR "H" DEL BOGIE, MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO.

---

- **BASTIDOR DELANTERO No. 10824**

---

LANGUERO DERECHO	LANGUERO IZQUIERDO
PERFIL EXTERIOR:	PERFIL EXTERIOR:
ESPESOR MÁXIMO = 4,3 mm	ESPESOR MÁXIMO = 4,3 mm
ESPESOR MÍNIMO = 4,1 mm	ESPESOR MÍNIMO = 4,1 mm
ESPESOR PROMEDIO = 4,2mm	ESPESOR PROMEDIO = 4,2 mm
PERFIL INTERIOR:	PERFIL INTERIOR:
ESPESOR MÁXIMO = 4,3 mm	ESPESOR MÁXIMO = 4,4 mm
ESPESOR MÍNIMO = 4,1 mm	ESPESOR MÍNIMO = 4,1 mm
ESPESOR PROMEDIO = 4,2 mm	ESPESOR PROMEDIO = 4,2 mm

---

- **BASTIDOR TRASERO No. 10854**

---

LANGUERO DERECHO	LANGUERO IZQUIERDO
PERFIL EXTERIOR:	PERFIL EXTERIOR:
ESPESOR MÁXIMO = 4,3 mm	ESPESOR MÁXIMO = 4,3 mm
ESPESOR MÍNIMO = 4,0 mm	ESPESOR MÍNIMO = 4,0 mm
ESPESOR PROMEDIO = 4,2 mm	ESPESOR PROMEDIO = 4,2 mm

PERFIL INTERIOR:	PERFIL INTERIOR:
ESPESOR MÁXIMO = 4,2 mm	ESPESOR MÁXIMO = 4,2 mm
ESPESOR MÍNIMO = 3,8 mm	ESPESOR MÍNIMO = 3,8 mm
ESPESOR PROMEDIO = 4,2 mm	ESPESOR PROMEDIO = 4,1 mm

- **OBSERVACIONES**

1.- EL ESPESOR PROMEDIO REPORTADO, ES LA MEDIA ARITMÉTICA DE LOS VALORES OBTENIDOS EN CADA UNO DE LOS PERFILES DEL BOGIE.

2.- EL ESPESOR DE PARED ES UNIFORME, ÚNICAMENTE EN ALGUNOS PUNTOS AISLADOS SE DETECTARON LAS VARIACIONES INDICADAS.

3.- AÚN Y CUANDO EL ESPESOR NOMINAL DE LA PLACA ES DE 4,0 mm, AL OBTENER VALORES MAYORES, NO SIGNIFICA QUE EL ESPESOR HALLA AUMENTADO, SE TRATA DE VARIACIONES PROPIAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN.

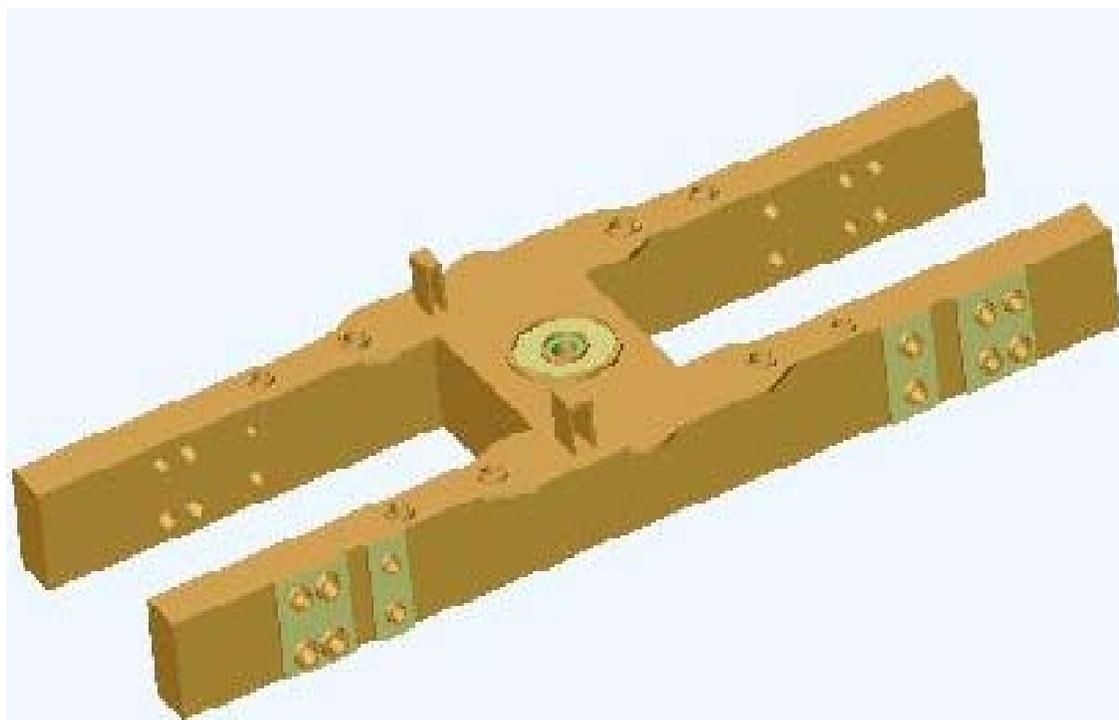
4.- LA MEDICIÓN DEL ESPESOR DE PARED DE LOS BASTIDORES FUE REALIZADA AUXILIÁNDOSE DE UN RETICULADO EN EL CUAL SE COLOCÓ EL TRANSDUCTOR EN EL CENTRO DE CADA CUADRO DE 25 mm POR LADO.

**MÉTODO UTILIZADO:**

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DEL ESPESOR DE PARED EN EL BASTIDOR DEL BOGIE DE LOS CARROS DEL METRO SOBRE NEUMÁTICOS, MEDIANTE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO, CLAVE CL/MM/05-31-01.

**EQUIPO UTILIZADO:**

MEDIDOR DE ESPESORES DME DL, MARCA KRAUTKRAMER-BRANSON, No. INV. 131121.  
BLOQUE DE CALIBRACIÓN DE 1 A 8 mm.  
TRANSDUCTOR DE DOBLE CRISTAL DE 8 MHz Y Ø 9,6 mm.



BASTIDOR DEL BOGUI

## CONCLUSIONES

La revisión de los bastidores es un aspecto fundamental en la rehabilitación de el material rodante después de 30 años de servicio, ya que este es el esqueleto que soporta los diferentes elementos que utiliza el bogi para generar la tracción y lograr el movimiento o desplazamiento de los trenes.

El objetivo es medir el espesor de las paredes del bogi para verificar la reducción del mismo por el efecto de la corrosión.

El espesor encontrado nos permitirá tomar la decidir si se sigue manteniendo o reemplazarlo por otro en buenas condiciones o uno nuevo no se puede permitir que un bastidor con reducción de espesor se encuentre operando debido a que si falla en servicio los costos de reparación del material rodante y de las vías sería muy alto.

Por lo que se requiere de desarrollar un método de medición efectivo de manera que se pueda reducir la probabilidad de falla por este aspecto.

En el caso abordado en la tesis, mediante el empleo de la técnica de ultrasonido nos a permitido el medir de manera eficiente el espesor de la pared de los bastidores del bogi

## BIBLIOGRAFIA

- 1.-MECANICA DE MATERIALES .  
Beer And Jhonston. Mc GRAW HILL, 1995
  
- 2.-MECANICA DE MATERIALES .  
Hibeler. CECSA, 1994
  
- 3.-MECANICA DE MATERIALES .  
Timosenko . IBEROAMERICANA 1995
  
- 4.-CURSO DE LIQUIDOS PENETRANTES NIVEL 1 Y 2  
IMENDE 1988
  
- 5.-CURSO DE PARTICULAS MAGNETICAS NIVEL 1 Y 2  
CIDECI, 1992
  
- 6.-CURSO DE ULTRASONIDO INDUSTRIAL NIVEL 1 Y 2  
IMENDE 1998