

48



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES.**

**CAMPUS ARAGÓN**

**INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA.**

**ANÁLISIS DE FALLA DE UNA RUEDA DE  
SEGURIDAD, QUE SE UTILIZA EN EL  
MATERIAL RODANTE DEL S.T.C.**

297094

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A N:**

**JAIME JIMÉNEZ VIACOCO.  
J. ISAAC SALAZAR OLIVER.**

**ASESOR:  
ING. JAVIER NAVA PÉREZ.**



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.



**Todo hombre debe decidir una vez en la vida  
si se arriesga perdiéndolo todo,  
o se sienta a contemplar el paso de los triunfadores**

“Por mi Raza hablara el Espíritu”



# TEMARIO

# TEMARIO

---

## Introducción

### Capítulo 1

#### Análisis de Esfuerzos

1.1	Esfuerzo Axial -----	1
1.2	Esfuerzo Cortante -----	2
1.3	Deformación Axial y Cortante -----	4
1.4	Diagrama Esfuerzo-Deformación-----	7
1.5	Esfuerzo Biaxial -----	8
1.6	Estado de Esfuerzo Triaxial-----	13
1.7	Teorías de Falla de un Material-----	14
1.8	Concentración de Esfuerzos-----	24

### Capítulo 2

#### Propiedades Mecánicas

2.1	Tipos de Aceros-----	28
2.2	Tratamientos Térmicos de los Aceros-----	34
2.3	Selección de Materiales-----	40
2.4	Pruebas Mecánicas (Destructivas)-----	45
2.5	Pruebas Mecánicas (No Destructivas)-----	55
2.6	Teoría de la Corrosión-----	72
2.7	Desgaste -----	77
2.8	Fractografía -----	87

### Capítulo 3

#### Mecanismos de Falla y Tipos de Fractura

3.1	Deformación Plástica -----	107
3.2	Dislocaciones -----	107
3.3	Deslizamiento-----	113
3.4	Maclaje -----	117
3.5	Clivaje-----	119
3.6	Fracturas Frágiles -----	120
3.7	Fracturas Dúctiles -----	125
3.8	Fallas por Fatiga -----	127
3.9	Fallas por Corrosión-Fatiga -----	136

## **Capítulo 4**

### **Metodología del Análisis de Falla**

4.1	Antecedentes -----	145
4.2	Introducción -----	145
4.3	Recursos -----	145
4.4	Metodología -----	146

## **Capítulo 5**

### **Especificaciones y Descripción del Elemento Mecánico**

5.1	Descripción -----	154
5.2	Manufactura de las Ruedas de Acero Forjado -----	155
5.3	Maquinado -----	158
5.4	Dimensiones -----	159
5.5	Tecnología de la Rueda -----	163

## **Capítulo 6**

### **Análisis de Falla del Elemento Mecánico**

6.1	Recopilación y Revisión de la información -----	171
6.2	Información de Campo -----	173
6.3	Inspección Visual Preliminar -----	175
6.4	Examen de Laboratorio -----	176
6.5	Obtención de la Muestra -----	177
6.6	Análisis de Fractura -----	178
6.7	Fractografía -----	179
6.8	Metalografía -----	181
6.9	Prueba de Dureza -----	184
6.10	Análisis Químico -----	185

## **Conclusiones**

## **Bibliografía**



# INTRODUCCION





# INTRODUCCIÓN

---

La industria, tanto nacional como extranjera, ha estado regulada por normas y especificaciones para la manufactura de componentes mecánicos, y en forma paralela se han desarrollado métodos de pruebas e inspección para verificar la calidad; sin embargo, a pesar de todas estas medidas, no ha sido posible eliminar completamente la ocurrencia de fallas de los productos durante su vida útil.

**Falla** es un término general usado para dar a entender que una pieza en servicio **(a)** se ha vuelto completamente inoperable, **(b)** es todavía operable pero es incapaz de desempeñar satisfactoriamente su función, o **(c)** se ha deteriorado severamente, hasta el punto en que se ha vuelto poco fiable o insegura para seguir en uso.

Las fracturas de componentes en servicio se presentan debido a diversas causas, como deficiencias en especificaciones técnicas, mal diseño o selección de materiales inapropiada, procesos de manufactura inadecuados, deterioro durante el servicio, condiciones operativas excedidas, operación incorrecta o falta de mantenimiento.

A pesar de que el número de fisuras de un elemento mecánico es pequeño, son importantes porque pueden afectar el prestigio del fabricante en cuanto a la confiabilidad; y si las fallas causan accidentes, esto origina costos litigios. Estos aspectos y consideraciones se pueden ver reflejados en Transportes Colectivos de tipo ferroviario, como los trenes del STC Metro Capitalino, los cuales requieren desde un riguroso control de calidad de cada elemento mecánico a ensamblar, hasta una continua inspección minuciosa de cada parte en condiciones de servicio, así como la supervisión en el mantenimiento preventivo y correctivo de cada parte del tren.

Considerando esta problemática, en elementos mecánicos en trenes del STC Metro, se ve la necesidad de llevar a cabo un análisis de las causas que produjeron tales fallas, además de examinar las condiciones en el momento en que se produjo la fractura.

El presente proyecto es una investigación en la que se ilustra una metodología para realizar un análisis de falla, en el que se identifique los mecanismos de dicha anomalía y se determinen las causas que la produjeron, al mismo tiempo planteándose las acciones correctivas para prevenirlas.

La rueda de seguridad es un componente de vital importancia en la operación de frenado de los trenes, cambios de vías y circulación a talleres, si llegara a fracturarse en servicio, generaría un accidente de gran proporción por ejemplo un descarrilamiento del tren lo cual afectaría en aspectos técnicos, económicos y a las instalaciones fijas.



# INTRODUCCIÓN

---

Por lo cual el siguiente trabajo se desarrollo de la siguiente manera:

## Capitulo 1.

Se describen los esfuerzos axiales y cortantes así como el diagrama de esfuerzo- cortante, teoría de falla de un material y concentración de esfuerzos.

## Capitulo 2.

En esta sección se habla sobre las propiedades mecánicas como son los tipos de aceros, tratamientos térmicos, pruebas destructivas y no destructivas, selección de materiales, desgaste.

## Capitulo 3.

En este capitulo mencionamos los mecanismos de falla y tipos de fractura lo que es deformación plástica, dislocaciones, deslizamientos, lo que es el clivaje y el maclaje, los mecanismos de fractura dúctil y fractura frágil.

## Capitulo 4.

Se ilustra la metodología empleada para realizar el análisis de falla en el elemento mecánico.

## Capitulo 5.

Se describen las características físicas y químicas de la rueda de seguridad así como la tecnología y manufactura del elemento mecánico en estudio.

## Capitulo 6.

Se realizan las pruebas de campo y laboratorio para determinar porque fallo la rueda de seguridad.

# CAPÍTULO 1



## ANÁLISIS DE ESFUERZOS



# ANÁLISIS DE ESFUERZOS

## 1.1 ESFUERZO AXIAL

Cuando la carga ( tensión o compresión) actúan a través de un eje únicamente, se llama **uniaxial**, al eje x se le puede considerar como el eje de transmisión de la fuerza, es decir, en la aplicación de una carga axial, la carga se aplica coincidente con la línea central de la pieza y el esfuerzo es uniforme a través de la sección transversal.

Una barra en tensión es un ejemplo típico. En este caso, una carga de tensión F se aplica mediante los pasadores que atraviesan los extremos de la barra.(Ver fig. 1.1)

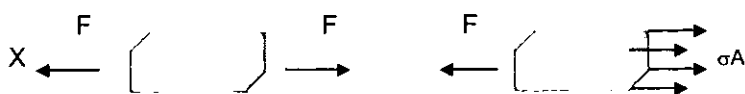


Fig. 1.1

La hipótesis de esfuerzo uniforme significa que si se corta la barra en una sección transversal, alejada de ambos extremos, y se separa una de las mitades, es posible sustituir su efecto aplicando una fuerza uniformemente distribuida de magnitud  $\sigma A$  en el extremo cortado. Entonces se dice que el esfuerzo  $\sigma$  está uniformemente distribuido y se calcula por la siguiente ecuación: (Ver fig. 1.2)

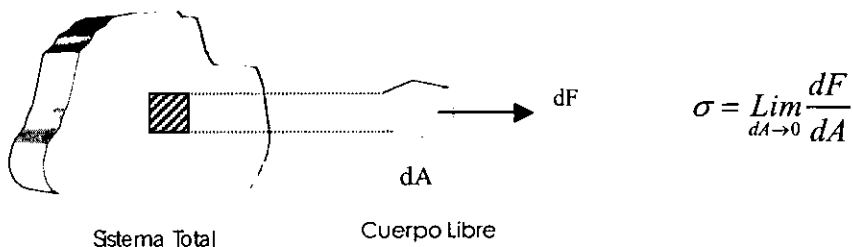


Fig. 1.2

Por lo tanto:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

**Donde:**

$\sigma$  = Esfuerzo axial

F = Carga de tensión o compresión

A = Area de la sección transversal



## 1.2 ESFUERZO CORTANTE

Las propiedades mecánicas son determinantes en el comportamiento de los materiales de ingeniería que están sometidos a fuerzas y cargas. La forma en que respondan los materiales a la aplicación de fuerzas dependerá del tipo de enlace, la disposición estructural de los átomos o moléculas, así como del tipo y el número de imperfecciones, las cuales están siempre presentes en los sólidos, y faltan sólo en raras circunstancias. Las propiedades mecánicas, por razón, varían en grado notable con los procesos de fabricación y manejo, lo cual puede producir características muy variables aun tratándose de materiales con la misma composición química. Además, el tipo de esfuerzo y la forma de su aplicación puede cambiar el comportamiento de un material en un grado mayor que la composición química, el tratamiento térmico o la temperatura.

El estudio macroscópico de la deformación plástica se logra por medio del cálculo del flujo plástico, el cual se presenta con el esfuerzo, llamado esfuerzo de deformación. De este modo, las propiedades intrínsecas de los materiales quedan especificadas por medio del esfuerzo de deformación o de tensión, la elongación, el área de reducción y el esfuerzo de compresión. Es importante correlacionar estas propiedades intrínsecas con la estructura microscópica y su comportamiento es decir que cuando a un cuerpo se le aplica una fuerza externa que tiende a cambiar su forma o tamaño, el cuerpo se resiste a esa fuerza. La resistencia interna del cuerpo se conoce como esfuerzo y los cambios en las dimensiones del cuerpo que la acompañan se llaman deformaciones o alargamientos.

Cualquier fuerza o carga aplicada en el material producirá un esfuerzo y una deformación. El esfuerzo representa la intensidad de la fuerza de reacción en cualquier punto del cuerpo, como la que se genera por cargas uniformes, condiciones de montaje, fabricación y cambios térmicos. El esfuerzo se calcula como la fuerza que actúa en un plano por unidad de área.

$$\tau = F/A$$

**Donde:**

$\tau$  = Esfuerzo cortante en lb/plg<sup>2</sup> o en N/m<sup>2</sup>

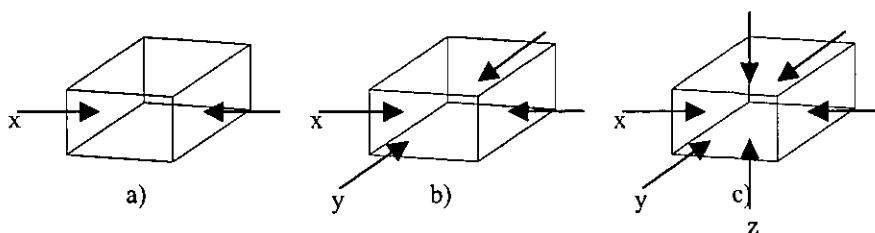
F = Fuerza cortante en lb ó N

A = Área sobre la cual actúa la fuerza cortante en plg<sup>2</sup> o en m<sup>2</sup>

Las fuerzas o cargas que actúan en un cuerpo son de dos clases: estáticas o dinámicas según su modo de aplicación. Las fuerzas estáticas (esfuerzos) permanecen esencialmente constantes o cambian en forma lenta sin presentar características repetitivas. **(Ver fig. 1.3)**



Las fuerzas dinámicas pueden ser fuerzas de impacto alternadas y contrarias. Las fuerzas por impacto se producen cuando la energía cinética de dos cuerpos que chocan es absorbida por la deflexión del material. Las fuerzas alternantes fluctúan entre dos límites generalmente en forma sinusoidal, como sucede durante la vibración.



Dirección de las fuerzas estáticas: a) Uniaxial b) Biaxial c) Triaxial

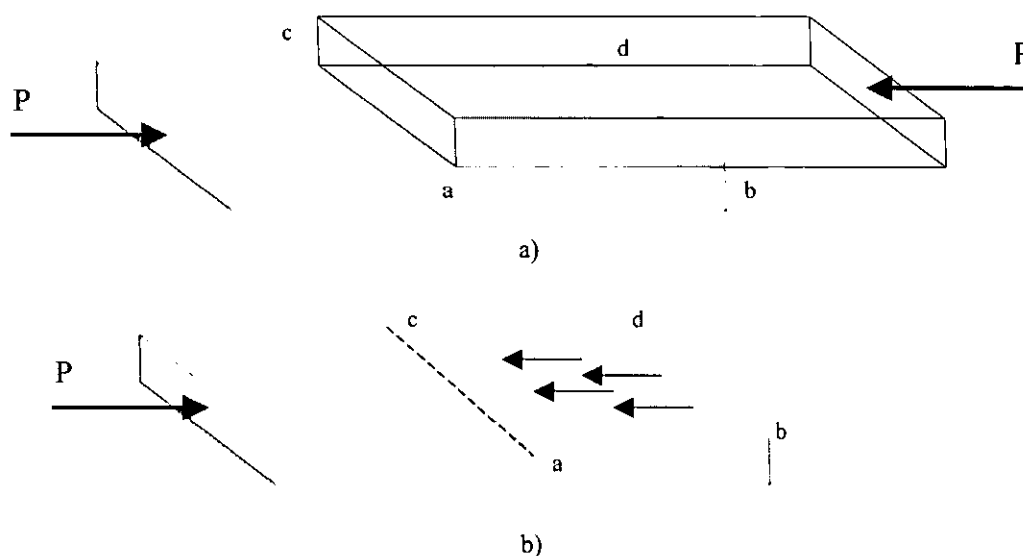
**Fig 1.3**

Los esfuerzos estáticos son de importancia primordial en la ingeniería estructural. Cualquier carga estática en un cuerpo se puede considerar, en forma completa, en términos de tres esfuerzos principales perpendiculares entre sí.

Los tres casos más importantes son:

1. La tensión o compresión uniaxial cuando el esfuerzo actúa en una sola dirección.
2. La tensión o compresión biaxial o triaxial, cuando el esfuerzo actúa en dos o tres direcciones perpendiculares.
3. El esfuerzo cortante cuando las fuerzas son paralelas a un plano imaginario en un punto.

Como se puede observar en la siguiente figura 1.4:



**Fig. 1.4**



El esfuerzo es de compresión si tiende a comprimir el material y es de tensión si tiende a separar el material. Cuando las fuerzas son paralelas en un punto de un plano imaginario, el esfuerzo se llama cortante.

Los esfuerzos cortantes se producen en un cuerpo cuando las fuerzas aplicadas tienden a hacer que una parte del cuerpo se corte o deslice con respecto a la otra. La porción superior del bloque tiende a cortarse o deslizarse con respecto a la porción inferior. Las fuerzas cortantes que resisten la carga  $P$  actúan sobre el área  $abcd$ . Estas fuerzas actúan en un plano paralelo a la carga aplicada, y no en un plano perpendicular a la carga (**fig. 1.4a**).

En la **figura 1.4b** se ilustra un método de cómo se pueden producir los esfuerzos cortantes.

### 1.3 DEFORMACIÓN AXIAL Y CORTANTE

#### LEY DE HOOKE

Cuando una barra recta se somete a una carga de tensión, la barra se alarga. El grado de alargamiento recibe el nombre de deformación, y se define como el alargamiento producido por unidad de longitud original de la barra. Se acostumbra a usar el término deformación, sin ningún calificativo, para designar la magnitud así definida, aunque a veces se especifica llamándola deformación unitaria. El alargamiento total se llama deformación total. Aplicando esta nomenclatura, la deformación es

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (1)$$

donde  $\delta$  es el alargamiento total (deformación total) de la barra de longitud original  $l$ . Sin embargo, de este modo sólo se obtiene el valor medio de la deformación. La expresión correcta de la deformación en cualquier punto es

$$\varepsilon = \frac{d\delta}{dl} \quad (1a)$$

Que determina el valor de la deformación en una longitud tan pequeña ( $dl$ ) que puede considerarse constante en dicha longitud. No obstante, es ciertas condiciones, se puede suponer que la deformación es constante y aplicar la ecuación ( 1). Estas condiciones son:

1. **El elemento sometido a tensión debe tener una sección transversal o recta constante.**
2. **El material debe ser homogéneo.**
3. **La fuerza o carga debe ser axial, es decir, producir un esfuerzo uniforme.**

Por último obsérvese que como la deformación representa un cambio de longitud dividido entre la longitud inicial, la deformación es una cantidad dimensional. No obstante, cuando se habla de deformación se emplean unidades de  $\text{mm/mm}$  o  $\text{in/in}$ .



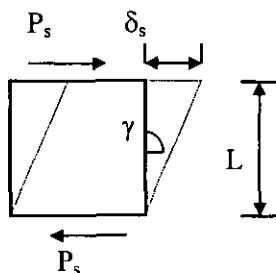
## DEFORMACIÓN ANGULAR (POR CORTANTE) — DISTORSIÓN

Las fuerzas cortantes producen una deformación angular o distorsión, de la misma manera que las fuerzas axiales originan deformaciones longitudinales, pero con una diferencia fundamental. Un elemento sometido a tensión experimenta un alargamiento, mientras que un elemento sometido a una fuerza cortante no varía la longitud de sus lados, manifestándose por el contrario un cambio de forma, de rectángulo a paralelogramo como se observa en la **figura 1.5**. El proceso puede imaginarse como producido por el desplazamiento infinitesimal o resbalamiento de capas infinitamente delgadas del elemento unas sobre otras, siendo la suma de estos infinitos resbalamientos infinitesimales la deformación transversal total  $\delta_s$  en una longitud  $L$ .

La deformación angular media se obtiene dividiendo  $\delta_s$  entre  $L$ . Por tanto,  $Tg \gamma = \delta_s / L$ , ahora bien, como  $\gamma$  es siempre muy pequeño,  $Tg \gamma \approx \gamma$  con lo que

$$\gamma = \frac{\delta_s}{l} \quad (1b)$$

Para ser más precisos, la distorsión es la variación experimentada por el ángulo entre dos caras perpendiculares de un elemento diferencial.



**Figura 1.5. Deformación angular o distorsión**

La deformación por cortante  $\gamma$  es la variación angular de la ortogonalidad en un elemento de esfuerzo, sometido a cortante puro.

La elasticidad es la propiedad por la que un material puede recobrar su forma y dimensiones originales cuando se anula la carga que lo deformaba. La ley de Hooke establece que, dentro de ciertos límites, el esfuerzo en un material es directamente proporcional a la deformación que lo produce. Un material elástico no necesariamente obedece esta ley, pues es posible que algunos materiales recuperen su forma original sin cumplir la condición límite de que el esfuerzo sea proporcional a la deformación. Por otra parte, los materiales que obedecen la Ley de Hooke son elásticos. Para la condición de que el esfuerzo sea proporcional a la deformación, se pueden escribir las relaciones

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2)$$





Suponiendo que la ley de Hooke también es válida en el cortante, existe una relación lineal entre la distorsión y el esfuerzo cortante dada por

$$\tau = G\gamma \quad (2')$$

Donde E y G son las constantes de proporcionalidad. Como las deformaciones son valores adimensionales, E y G tienen las mismas unidades que el esfuerzo. La constante E se llama módulo de elasticidad (longitudinal), y la constante G recibe el nombre de módulo de elasticidad al cortante (o angular), o bien módulo de rigidez. Sin embargo, tanto E como G son índices de la rigidez, o resistencia a la deformación, de los materiales. Estas constantes representan propiedades fundamentales de éstos.

Al sustituir  $\sigma = F / A$  y  $\varepsilon = \delta / l$  en la ecuación (2) y reordenando, se obtiene la ecuación para la deformación total de una barra cargada axialmente a tensión o a compresión:

$$\delta = \frac{Fl}{AE} \quad (a)$$

La ecuación (a) relaciona la deformación total  $\delta$  con la fuerza o carga aplicada F, la longitud de la barra L, el área de la sección recta A y el módulo de elasticidad E. La deformación total se obtiene en las mismas unidades que la longitud L, ya que  $\sigma$  y E tienen las mismas unidades. Recalcando que en la validez de la ecuación (2) hay que tener en cuenta las hipótesis siguientes:

1. La carga ha de ser axial.
2. La barra debe ser homogénea y de sección constante.
3. El esfuerzo no debe sobrepasar el límite de proporcionalidad.

La relación entre la deformación tangencial total y las fuerzas cortantes aplicadas son

$$\delta = \frac{Vl}{A_s \cdot G} \quad (b)$$

En donde V representa la fuerza cortante que actúa sobre la sección de área  $A_s$  que la soporta.

Obsérvese la semejanza de este resultado con la ecuación (a).

Los experimentos muestran que, cuando un cuerpo se somete a tensión, no sólo se le producirá una deformación axial (alargamiento), sino también una deformación lateral (estrechamiento). Poisson demostró que estas dos deformaciones son proporcionales entre sí, dentro de los límites de la ley de Hooke. Esta constante se expresa como

$$\nu = \frac{\text{deformacion} \cdot \text{unitaria} \cdot \text{lateral}}{\text{deformacion} \cdot \text{unitaria} \cdot \text{axial}} \quad (3)$$



Y se conoce como relación de Poisson. Estas mismas relaciones se verifican para la compresión, pero en este caso se produce una deformación lateral de ensanchamiento.

Estas tres constantes elásticas están relacionadas entre sí como sigue:

$$E = 2G(1+\nu) \quad (4)$$

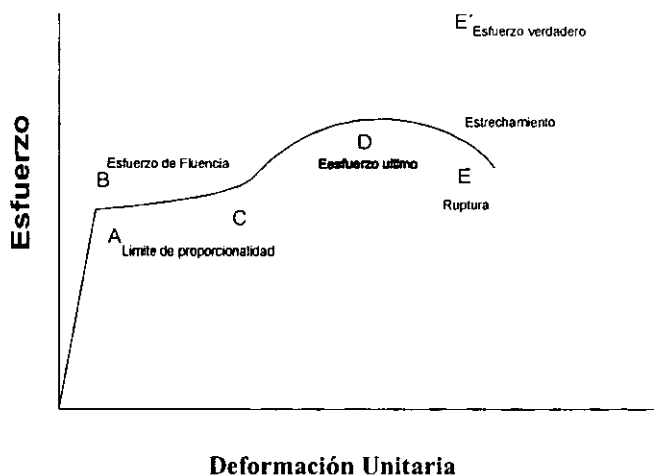
#### 1.4 DIAGRAMA ESFUERZO - DEFORMACIÓN

Con el objeto de obtener gráficas que permitan estudiar las características de los materiales, independientemente de la sección transversal del espécimen de ensayo y de la longitud de medición, se acostumbra transformar las gráficas, Carga -Deformación en gráficas Esfuerzo-Deformación unitaria. Estos últimos parámetros son adimensionales y por lo tanto, las gráficas Esfuerzo-Deformación unitaria son iguales para un mismo material independientemente de las características del espécimen de ensayo.

La forma típica del diagrama Esfuerzo-Deformación para el acero estructural (**ver fig. 1.6**) Desde O hasta A el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales y la gráfica es *rectilínea*. Mas allá del punto A deja de existir la relación lineal entre esfuerzo-deformación; por tanto, el esfuerzo en A se llama *limite de proporcionalidad*. Al aumentar mas la carga, la deformación crece mas rápidamente que el esfuerzo, hasta que en el punto B empieza a producirse un alargamiento considerable sin ningún aumento apreciable en la fuerza de tensión. Este fenómeno se conoce como *fluencia* ( o *cedencia* ) del material, y el esfuerzo en el punto B se llama *esfuerzo de fluencia*. En la región BC se dice que el material se vuelve *plástico*, y la barra en realidad puede alargarse plásticamente en una cantidad de 10 a 15 veces mayor que el alargamiento que ocurre hasta él limite de proporcionalidad. En el punto C el material empieza a sufrir *endurecimiento por deformación* y a presentar resistencia adicional al aumento de carga. Así pues, al haber mas alargamiento el esfuerzo aumenta y alcanza su valor máximo en el punto D, llamándose *esfuerzo ultimo o resistencia máxima a la tensión* . Mas allá de este punto el alargamiento adicional de la barra esta acompañado por una reducción de la carga, y la ruptura de la probeta se produce finalmente en el punto E del diagrama.

Durante el alargamiento de la barra se produce una contracción lateral que da por resultado una reducción de su área transversal. Este fenómeno no influye hasta antes del punto C, pero más allá de este la disminución de área tiene un efecto notable sobre el valor calculado del esfuerzo. Aparece un pronunciado estrechamiento de la barra y si el área transversal real de la parte más estrecha (*garganta o estricción*), se utiliza para calcular el esfuerzo, se encontrara que la gráfica esfuerzo-deformación real sigue la línea punteada CE. El fenómeno de estrechamiento es una forma de inestabilidad a la tensión, la reducción del área se puede considerar como un valor limite para el alargamiento local, conforme la longitud de calibración se aproxima a cero.

En vista de que la carga total que la barra puede soportar disminuye despoes que se ha alcanzado la resistencia máxima a la tensión, dicha disminución se debe a la reducción de área y no a una perdida de resistencia del material. En realidad, este resiste el aumento de esfuerzo hasta el punto de falla.



**Fig. 1.6**

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN

**Limite de proporcionalidad.** *El esfuerzo para el cual la deformación deja de ser proporcional al esfuerzo. Esta cantidad indica el rango de esfuerzo para el que será válida la suposición de acción elástica.*

**Esfuerzo de fluencia.** *El esfuerzo al que se produce por primera vez un incremento notable de la deformación, sin aumento del esfuerzo.*

**Resistencia máxima a la tensión.** *El esfuerzo correspondiente a la carga máxima alcanzada en la prueba a la tensión. Esto se considera generalmente como una medida de resistencia del material.*

**Elongación.** *La deformación total normal que ocurre a la falla. La elongación se especifica como un porcentaje y se considera como una medida de la ductilidad de un material.*

**Modulo de elasticidad.** *La relación entre esfuerzo-deformación, en el rango elástico. La cantidad E se puede considerar como la pendiente de la porción recta del diagrama esfuerzo-deformación.*



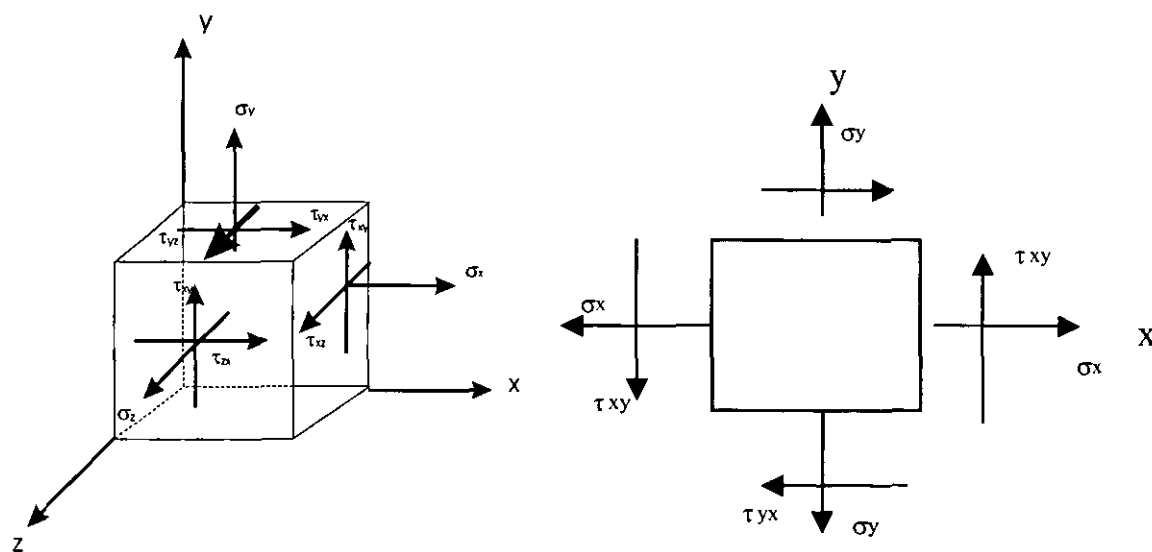
## 1.5 ESFUERZO BIAxIAL

En la **figura 1.7a** se observa un elemento del estado general de esfuerzo tridimensional y se muestran tres esfuerzos normales,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , todos positivos; y seis esfuerzos cortantes,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{zy}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{xz}$ , también positivos. El elemento esta en equilibrio estático y, por lo tanto,

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

Los esfuerzos normales dirigidos hacia fuera del elemento se consideran positivos y son de tensión. Los esfuerzos cortantes que actúan sobre una cara positiva de un elemento son positivos, si se ejercen en la dirección positiva de un eje de referencia; este es el caso en la **figura 1.7-a**. El primer subíndice de una componente de esfuerzo cortante es la coordenada normal (o perpendicular) a la cara del elemento. La componente de esfuerzo cortante es paralela al eje del segundo subíndice. Como el elemento que se presenta esta en equilibrio estático, las cargas negativas de dicho elemento tendrán esfuerzos cortantes que actúan en dirección opuesta, pero también se les considera positivos.

Lo que acabamos de escribir es el convenio clásico de los signos del esfuerzo. La **figura 1.7-b** muestra un estado de esfuerzo plano o biaxial. Los dos esfuerzos normales se indican en la dirección positiva. Los esfuerzos cortantes se tomaran como positivos cuando estén de acuerdo con el sentido en que giran las manecillas del reloj (s.r.). Por lo tanto, en la figura 1-b,  $\tau_{yx}$  es s.r. y positivo;  $\tau_{xy}$  es s.c.r (sentido contrario a aquel en el que giran las manecillas del reloj) y negativo.



ELEMENTO SOMETIDO A ESFUERZO TRIDIMENSIONAL

Fig. 1.7 a y 1.7 b



## CÍRCULO DE MORH

Se supondrá que al elemento de la **figura 1.7-b** se le corta un plano inclinado, el cual forma un ángulo  $\phi$  con respecto al eje  $x$ , como se ve en la **figura 1.8**. Esta sección trata de los esfuerzos  $\sigma$  y  $\tau$  que actúan en el plano. Al sumar las fuerzas correspondientes a todas las componentes de esfuerzo e igualarlas a cero, los esfuerzos  $\sigma$  y  $\tau$  serán

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\phi + \tau_{xy} \sin 2\phi$$

$$\tau = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\phi + \tau_{xy} \cos 2\phi \quad (2-3)$$

Derivando la primera ecuación con respecto a  $\phi$  e igualando a cero el resultado, se tiene que

$$\tan 2\phi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (2-4)$$

La ecuación anterior define dos valores particulares del ángulo  $2\phi$  y uno de ellos determina 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. El ángulo  $\phi$  entre estas dos últimas es de  $90^\circ$ .

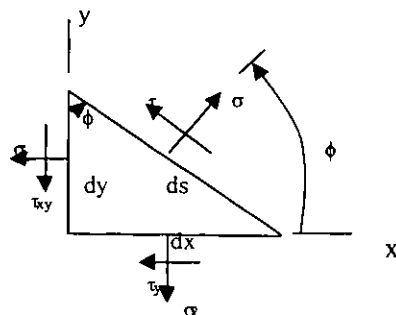


Fig. 1.8

De manera semejante se deriva de la ecuación (2-3), se iguala a cero el resultado y se obtiene

$$\tan 2\phi = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \quad (2-5)$$

La ecuación (2-5) define los dos valores de  $2\phi$ , en los que el fuerza cortante  $\tau$  alcanza un valor máximo.

Es interesante observar que la ecuación (2-4) se puede escribir en la forma



$$2\tau_{xy} \cos 2\phi = (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\phi$$

o bien

$$\operatorname{sen} 2\phi = \frac{2\tau_{xy} \cos 2\phi}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Si ahora se sustituye  $\operatorname{sen} 2\phi$  por la ecuación (2-3), se obtiene

$$\tau = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \frac{2\tau_{xy} \cos 2\phi}{\sigma_x - \sigma_y} + \tau_{xy} \cos 2\phi = 0 \quad (2-6)$$

La ecuación (2-6) indica que el esfuerzo cortante que se aplica en las dos direcciones principales es igual a cero.

Si se despeja  $\operatorname{sen} 2\phi$  de modo semejante en la ecuación (2-5) y se sustituye el resultado en la ecuación (2-2) se tiene que

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (2-7)$$

La ecuación (2-7) indica que son iguales entre sí los dos esfuerzos normales ejercitados en las direcciones de los dos esfuerzos cortantes máximo.

Las formulas de los dos esfuerzos principales se pueden obtener sustituyendo el ángulo  $2\phi$  de la ecuación (2-4) en la (2-2). El resultado es

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

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

Considérese en particular el hecho de que un valor extremo del esfuerzo cortante puede no ser el mismo que el valor máximo.

Un método gráfico de expresar las relaciones obtenidas en esta sección, denominado *diagrama del círculo de Mohr*, es un medio muy eficaz para visualizar el estado del esfuerzo en un punto y tener en cuenta la dirección de las diversas componentes asociadas al esfuerzo plano. En la **figura 1.9** se establece un sistema de coordenadas, en el que los esfuerzos normales se representan como abscisas y los cortantes, como ordenadas. En el eje de las abscisas, los esfuerzos normales de tensión (positivos) se marcan a la derecha del origen 0 y los esfuerzos normales de compresión (negativos), a la izquierda. En el eje de las ordenadas los esfuerzos cortantes positivos o en el sentido del reloj (s.r.) se trazan hacia arriba, y los esfuerzos cortantes en sentido contrario al del reloj (s.c.r) son negativos y se trazan hacia abajo.



Utilizando el estado de esfuerzo, se traza el diagrama del círculo de Mohr (fig1.9) marcando  $\sigma_x$  como OA,  $\tau_{xy}$  como AB,  $\sigma_y$  como OC y  $\tau_{xy}$  como CD. El segmento de recta DEB es el diámetro del círculo de Mohr con centro en E sobre el eje  $\sigma$ .

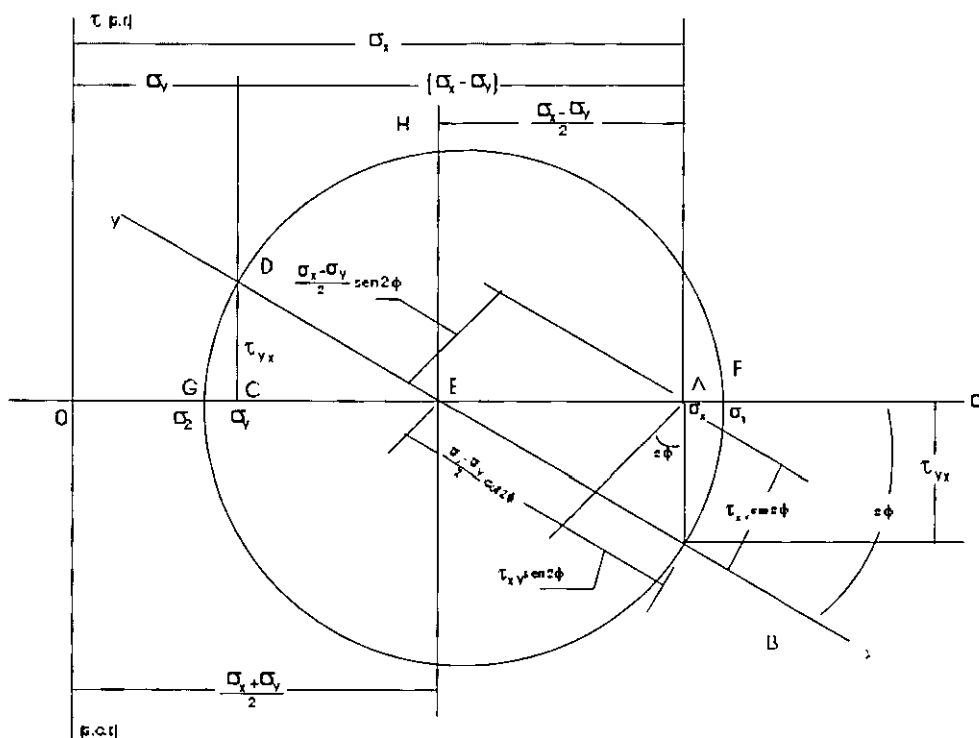


Fig. 1.9 Diagrama de Círculo de Mohr

El punto B representa las coordenadas de esfuerzo  $\sigma_y$  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 xy y DE, al eje y. El ángulo  $2\phi$ , que se mide en sentido contrario al del reloj desde EB hasta DE, es igual a  $180^\circ$ , que corresponde a  $\phi = 90^\circ$  que se mide en sentido contrario al del reloj desde x hasta y, sobre el elemento de esfuerzo de la figura 1.9. El esfuerzo normal principal máximo  $\sigma_1$  ocurre 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 Y, respectivamente.

Aunque las ecuaciones (2-4) y (2-8) se pueden resolver directamente para determinar los esfuerzos principales y las direcciones respectivas, es más fácil y rápido un procedimiento semigráfico y ofrece menos probabilidades de error.



## 1.6 ESTADO DE ESFUERZO TRIAXIAL

Al igual que en el caso anterior del esfuerzo del plano o biaxial, existe una orientación particular del elemento en el espacio, en la que todas las componentes de esfuerzo constante son iguales a cero. Cuando un elemento tiene dicha orientación, las normales a las caras corresponden a las direcciones principales y los esfuerzos normales ejercidos sobre esas caras son los esfuerzos principales. Puesto que hay seis caras, habrá tres direcciones principales y también tres esfuerzos principales,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ .

Al estudiar el esfuerzo plano se vio que un estado de esfuerzo cualquiera se podía especificar por  $\sigma_x, \sigma_y$ , y  $\tau_{xy}$  y se determinaron los esfuerzos y las direcciones principales. Para especificar un estado general de esfuerzo en tres dimensiones se requieren seis componentes de esfuerzo, y el problema de determinar los esfuerzos y las direcciones principales se vuelve mucho más difícil. Sin embargo, son raras las veces que el diseñador se enfrenta a este tipo de problemas, por lo que no se estudiara en este libro. El proceso que comprende el cálculo de las tres raíces de la ecuación cúbica.

$$\sigma^3 (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \sigma^2 + (\sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2) \sigma - (\sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2) = 0$$

Al trazar los círculos de Mohr para el esfuerzo triaxial, los esfuerzos principales se ordenan de manera que  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . El resultado se ve en la **figura 1.10**. Las coordenadas de esfuerzo  $\sigma_N, \tau_N$  para un plano de localización arbitraria cualquiera estarán siempre dentro del área sombreada.

La **figura 1.10** revela asimismo que existe los tres esfuerzos cortantes principales  $\tau_{1/2}, \tau_{2/3}$  y  $\tau_{1/3}$ . Cada uno ocurre en los planos  $t$  uno de ellos se muestra en la **figura 1.10**. La figura indica que los esfuerzos cortantes principales están dados por las ecuaciones

$$\tau_{1/2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad \tau_{2/3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \quad \tau_{1/3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Desde luego,  $\tau_{\max} = \tau_{1/3}$  cuando los esfuerzos principales normales están ordenados ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ).

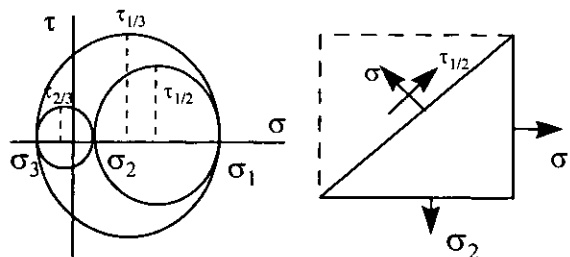


Fig. 1.10





## 1.7. TEORÍAS DE FALLA DE UN MATERIAL

### OBSERVACIONES PRELIMINARES

Cuando se ejerce una carga sobre un elemento mecánico, de modo que el estado de esfuerzo sea uniaxial, entonces se pueden comparar directamente el esfuerzo<sup>1</sup> y la resistencia<sup>2</sup> del material a fin de determinar el grado de seguridad, o bien para advertir si fallará la parte. El método es simple, puesto que sólo hay un valor de esfuerzo y también hay uno solo de resistencia, ya sea resistencia a la fluencia, resistencia última, resistencia al corte o cualquiera que ésta sea, según resulte apropiado. El problema se complica cuando el estado de esfuerzo es biaxial o triaxial. En tales casos existen diferentes tipos de esfuerzo, pero sigue habiendo sólo una resistencia significativa. Así que ¿cómo se sabe si el elemento mecánico es seguro o no, si lo es, qué tan seguro es?. Se han propuesto diversas teorías de falla de un material para ayudar a dar respuesta a esta pregunta.

La finalidad de estas teorías es predecir las condiciones de ruptura o falla bajo tensiones combinadas, suponiendo que es conocido el comportamiento en un ensayo a la tensión o compresión simples. Por falla del material se entiende cualquier deformación permanente (fluencia) o ruptura real, la que primero se produzca.

Al diseñar elementos mecánicos que resistan las fallas se debe estar seguro de que los esfuerzos internos no rebasen la resistencia del material. Si el que se empleará es dúctil, entonces lo que más interesa es la resistencia a la fluencia, ya que una deformación permanente sería considerada como falla. Muchos de los materiales más frágiles o quebradizos no poseen un punto de fluencia, así que debe utilizarse la resistencia última como criterio de falla. Al diseñar elementos que han de hacerse de material frágil, también es necesario recordar que la resistencia última a la compresión es mucho mayor que a la tensión.

### CRITERIOS DE FLUENCIA PARA MATERIALES DÚCTILES

#### Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo

La teoría del esfuerzo cortante máximo resulta de la observación de que en un material dúctil aparece deslizamiento, durante la fluencia, a lo largo de planos críticamente orientados. Esto sugiere que el esfuerzo cortante máximo desempeña la función clave, y se supone que la fluencia del material depende únicamente del máximo esfuerzo cortante que se alcanza dentro de un elemento. Por consiguiente, siempre que se alcanza cierto valor crítico comienza la fluencia en un elemento. Para un material dado este valor por lo común es igual al esfuerzo cortante de fluencia en tensión o compresión simple. En cristales individuales el deslizamiento ocurre según planos y direcciones preferentes. En estudios de este fenómeno se debe determinar con todo cuidado la componente efectiva del esfuerzo cortante que produce deslizamiento; aquí se supone que debido a la orientación al azar de

---

<sup>1</sup> Esfuerzo ( $\sigma$ ): carga por unidad de área experimentada por el elemento mecánico.

<sup>2</sup> Resistencia (S): Propiedad del material que indica el esfuerzo máximo nominal, ya sea de fluencia, ruptura, tensión, compresión, según se especifique el tipo de resistencia, obtenido de pruebas mecánicas, catálogos de fabricantes, o de normas o especificaciones.



numerosos cristales el material tiene propiedades isotrópicas y por la determinación del esfuerzo cortante máximo se halla el esfuerzo cortante crítico.

La teoría del esfuerzo cortante máximo afirma que se inicia la fluencia siempre que el esfuerzo cortante máximo generado en el elemento mecánico sea igual al esfuerzo cortante máximo obtenido mediante una probeta sometida a prueba de tensión, cuando ese espécimen empieza a ceder.

En la **figura 1.11** se muestra el círculo de Mohr para la prueba de tensión simple mostrando que  $\tau_{\max} = S_y/2$ , esto es porque el esfuerzo cortante máximo absoluto en una probeta a tensión, en fluencia, actúa sobre un plano cortante que forma un ángulo de  $45^\circ$  con el eje longitudinal de la probeta, en donde  $S_y$  es el esfuerzo de fluencia en una probeta a tensión del material.

Cuando se trata de un estado de esfuerzos general se pueden hallar tres esfuerzos cortantes principales que son

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} ; \quad \tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} ; \quad \tau_{13} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (1)$$

Se designa con  $\tau_{\max}$  al mayor de ellos, el cual es el esfuerzo cortante máximo absoluto. Luego, según la teoría del esfuerzo cortante máximo, la falla por fluencia ocurre siempre que

$$\tau_{\max} \geq \frac{S_y}{2} \quad (2)$$

Se debe notar que esta teoría predice que la resistencia de fluencia en cortante es igual a la mitad de la resistencia a la fluencia en tensión, es decir

$$S_{sy} = \frac{S_y}{2} \quad (3)$$

Si se ordenan los esfuerzos normales principales como  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , para un estado general de esfuerzo, el esfuerzo cortante máximo absoluto está dado por  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  en donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son el mayor y el menor esfuerzos principales para el estado de esfuerzo. Entonces la teoría del esfuerzo cortante máximo predice que la falla se producirá siempre que

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &\geq \frac{S_y}{2} \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &\geq \frac{S_y}{2} \\ \sigma_1 - \sigma_3 &\geq S_y \end{aligned} \quad (4)$$



Supóngase que se descomponen los esfuerzos normales principales en las componentes

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_1' + \sigma_1'' \\ \sigma_2 &= \sigma_2' + \sigma_2'' \\ \sigma_3 &= \sigma_3' + \sigma_3''\end{aligned}\tag{a}$$

tal que

$$\sigma_1'' = \sigma_2'' = \sigma_3''\tag{b}$$

Los esfuerzos de la ecuación (b) reciben el nombre de componentes (o esfuerzos) hidrostáticas (de tensión o compresión) porque son iguales. Si  $\sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_3' = 0$ , entonces los tres esfuerzos cortantes dados por la ecuación (1) valdrían cero y no podría haber fluencia sin importar el valor de los esfuerzos hidrostáticos. Por tanto, las componentes hidrostáticas no tienen efecto alguno en el tamaño del círculo de Mohr, sino que meramente sirven para desplazarlo según el eje del esfuerzo normal; es decir, la suma de estos esfuerzos simplemente desplaza el círculo de Mohr a lo largo del eje  $\sigma$ , y  $\tau_{\max}$  permanece igual. Por esta razón el criterio de fluencia del estado de esfuerzo general puede representarse por medio del cilindro hexagonal regular oblicuo de la figura.

Ahora, para un estado de esfuerzo plano o biaxial y considerando  $\sigma_1 > \sigma_2$  y  $\sigma_3 = 0$ , se tiene que  $\tau_{\max} = |\sigma_{\max}|/2$  si los esfuerzos son ambos positivos o ambos negativos y  $\tau_{\max} = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|/2$  si el máximo esfuerzo es positivo y el mínimo negativo. Por consiguiente, si los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tienen el mismo signo, el criterio del máximo esfuerzo cortante da

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= S_y/2 \\ |\sigma_{\max}|/2 &= S_y/2 \\ |\sigma_1| &\leq S_y\end{aligned}\tag{5}$$

Si los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tienen signos opuestos, el criterio del máximo esfuerzo cortante produce

$$|\sigma_1 - \sigma_2| \leq S_y\tag{6}$$

Cuando la fluencia es inminente, las desigualdades de las ecuaciones (5) y (6) se reemplazan por igualdades. Considerando  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  como las coordenadas de un punto en el espacio de esfuerzos  $\sigma_1$ - $\sigma_2$ , estas ecuaciones definen el hexágono límite de la figura (1). Los esfuerzos que quedan dentro del hexágono indican que no ha ocurrido fluencia del material, es decir, el material se comporta elásticamente. El estado de esfuerzo correspondiente a puntos que quedan sobre el hexágono indica que hay fluencia en el material. Ningún punto puede quedar fuera del hexágono.

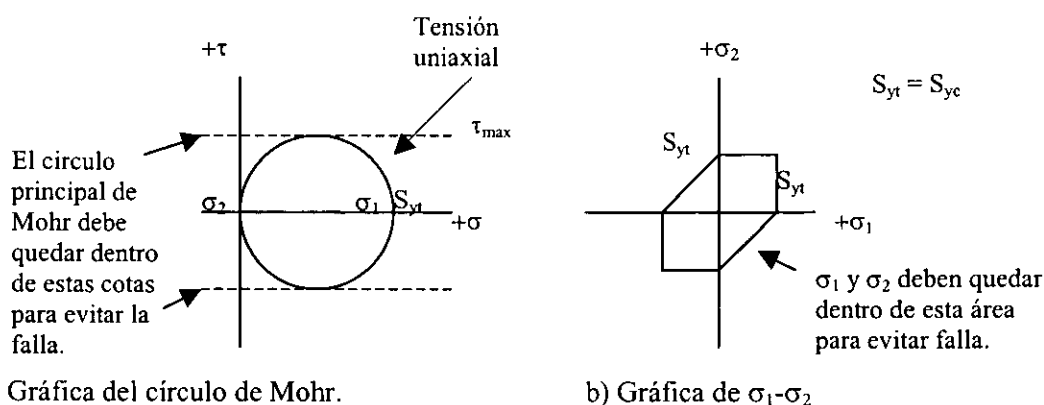
Obsérvese cuidadosamente en la **figura 1.11b** que, en los cuadrantes primero y tercero, el esfuerzo principal cero interviene en el círculo principal Mohr, en tanto que no lo hace en los cuadrantes segundo y cuarto. El punto único de prueba está marcado como "S<sub>y</sub>", resistencia a la fluencia a la tensión, de un material que se supone es dúctil.



Puede servir también un punto de información en compresión o torsión, pero la prueba a tensión es la más común y la más exacta; por lo tanto, se usa comúnmente.

Por supuesto si el material se comporta en forma verdadera según la teoría del máximo esfuerzo cortante, toda la información de la prueba debe coincidir en el nivel de esfuerzo cortante asociado con la falla.

Esta teoría recibe también el nombre de condición de fluencia (o teoría) de Tresca o Ley de Guest.



**Figura 1.11 Dos representaciones gráficas de la teoría del esfuerzo cortante máximo para esfuerzos biaxiales.**

### TEORÍA DE LA ENERGÍA DE DISTORSIÓN MÁXIMA

Otro criterio de fluencia ampliamente aceptado para materiales isotrópicos dúctiles se basa en los conceptos de energía. En este enfoque la energía elástica total se divide en dos partes: una asociada a los cambios volumétricos del material y otra que causa distorsiones por corte. Igualando la energía de distorsión o deformación por cortante en el punto de fluencia en tensión simple a la energía correspondiente a esfuerzo combinado, se establece el criterio de fluencia para esfuerzos de esta última clase.

En forma breve, esta teoría sostiene que cualquier material esforzado en forma elástica sufre un (ligero) cambio en forma, volumen o en ambos. La energía necesaria para producir este cambio se almacena en el material en forma de energía elástica. Pronto se pudo demostrar que los materiales usados en ingeniería pueden soportar enormes presiones hidrostáticas (es decir,  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 =$  elevada compresión) sin daño. Por tanto, se postuló que un material dado tiene una capacidad limitada y definida para absorber energía de distorsión (es decir, energía que tiende a cambiar la forma, pero no el tamaño), y que los intentos de someter el material a cantidades mayores de energía de distorsión provocan fluencia.

Cuando se usa esta teoría es conveniente trabajar con un esfuerzo equivalente,  $\sigma_e$ , definido como el valor del esfuerzo unitario a la tensión que producirá el mismo nivel de energía de distorsión (por lo tanto, según la teoría, la misma posibilidad de falla) que los esfuerzos reales indicados. En términos de los esfuerzos principales que existen, considerando  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , el esfuerzo equivalente (o de Von Mises) es



$$\sigma_e = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Para el caso común del esfuerzo biaxial, esta se reduce a

$$\sigma_e = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2)^{1/2} \quad (8)$$

Si los esfuerzos directos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\tau_{xy}$  se obtienen con más facilidad, una forma conveniente de la ecuación del esfuerzo equivalente es

$$\sigma_e = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (9)$$

Si sólo están presentes  $\sigma_x$  y  $\tau_{xy}$ , la ecuación se reduce a

$$\sigma_e = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (10)$$

Una vez que se ha calculado el esfuerzo equivalente, se compara con la resistencia a la fluencia obtenida con la prueba estándar a la tensión. Si  $\sigma_e$  excede  $S_{yt}$ , se pronostica la falla:

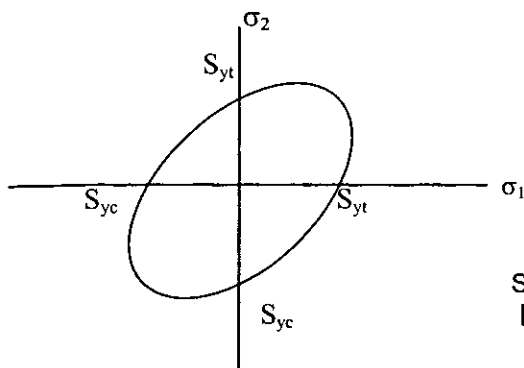
$$\sigma_e \geq S_{yt} \quad (10')$$

Para el esfuerzo plano y la ecuación (7) queda en forma dimensional como

$$S_{yt} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

$$\left( \frac{\sigma_1}{S_{yt}} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_1 \sigma_2}{S_{yt}^2} \right) + \left( \frac{\sigma_2}{S_{yt}} \right)^2 = 1 \quad (11)$$

Esta es una ecuación de una elipse, una gráfica de la cual se muestra en la **figura 1.12**. Cualquier esfuerzo que caiga dentro de la elipse indica que el material se comporta elásticamente. Los puntos en la propia elipse indican que el material está fluendo.

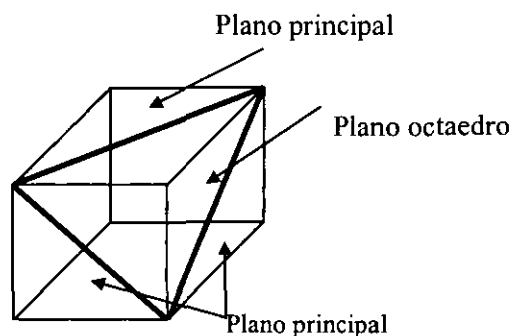


Se predice falla para todos los puntos fuera de la elipse.  
**Figura 1.12**



Gráfica  $\sigma_1-\sigma_2$  de la teoría de la energía de distorsión máxima para estados de esfuerzos biaxiales.

Las mismas ecuaciones pueden deducirse fácilmente con base en el esfuerzo cortante en un plano octaedral. La **figura 1.13** ilustra la relación de un plano octaedral con las caras de un elemento principal. Hay ocho planos octaedrales, los cuales tienen la misma intensidad de esfuerzo normal y cortante,  $\sigma_e$  puede definirse como la intensidad de un esfuerzo uniaxial a la tensión que produce el mismo nivel de esfuerzo cortante en los planos octaedrales (por tanto, de acuerdo con la teoría, la misma posibilidad de falla) como sucede con los esfuerzos reales implicados.



**Figura 1.13 Un plano octaedral ilustrado con respecto a los planos principales.**

#### CRITERIOS DE FRACTURA PARA MATERIALES FRÁGILES.

##### Teoría del Esfuerzo Normal Máximo

Esta teoría establece que la falla suele ocurrir siempre que el esfuerzo principal mayor sea igual a la resistencia del material, ya sea a la fluencia (para materiales dúctiles) o última (para materiales frágiles).

Supóngase que se ordenan los tres esfuerzos principales para cualquier estado de esfuerzo en la forma

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

Luego, si la fluencia fuera el criterio de falla, esta teoría anticipa que la falla sucede siempre que

$$\sigma_1 = S_{yt} \quad \text{o bien} \quad \sigma_3 = -S_{yc} \quad (12)$$



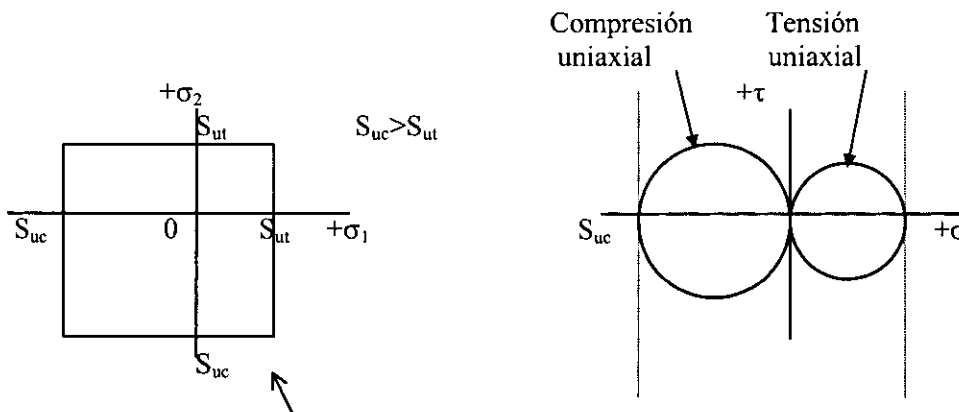
Donde  $S_{yt}$  y  $S_{yc}$  son las resistencias de fluencia a la tensión y a la compresión, respectivamente. Si se usa la resistencia última la falla ocurrirá siempre que

$$\sigma_1 = S_{ut} \quad \text{o bien} \quad \sigma_3 = -S_{uc} \quad (13)$$

Donde  $S_{ut}$  y  $S_{uc}$  son respectivamente las resistencias últimas a la tensión y a la compresión.

Los resultados experimentales indican que esta teoría se aplica razonablemente a materiales frágiles en todos los intervalos de esfuerzos, siempre que exista un esfuerzo principal de tensión. La falla se caracteriza por la ruptura por separación o hendimiento (clivage). Este mecanismo de falla difiere notablemente de la fractura por ductilidad, a la que acompañan grandes deformaciones debidas al deslizamiento sobre los planos de esfuerzo cortante máximo.

La teoría del esfuerzo normal máximo se puede interpretar en gráficas, como es el caso de las otras teorías descritas. Esto se hace en la **figura 1.14**



Para esfuerzos biaxiales  $\sigma_1, \sigma_2$  deben quedar dentro de esta área para evitar falla.

El círculo principal de Mohr debe quedar dentro de estas cotas para evitar falla.

a) Gráfica de  $\sigma_1 - \sigma_2$

b) Gráfica del círculo de Mohr

**Figura 1.14 Dos representaciones gráficas de la teoría del esfuerzo normal máximo.**

La teoría sostiene que la falla ocurrirá siempre que el mayor esfuerzo a la tensión tienda a exceder la resistencia uniaxial a la tensión, o siempre que el esfuerzo más grande a la compresión tienda a exceder la resistencia uniaxial a la compresión.

Con respecto a la gráfica del círculo de Mohr de la **figura 1.14b.**, Se pronostica falla para cualquier condición de esfuerzos para la cual el círculo principal de Mohr se prolongue más allá de cualquiera de las fronteras verticales indicadas con líneas discontinuas. En la gráfica  $\sigma_1 - \sigma_2$  de los esfuerzos biaxiales ( $\sigma_3 = 0$ ) mostrada en la **figura 1.14a.** se pronostica la falla para todas las combinaciones de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  que caen fuera del área marcada.

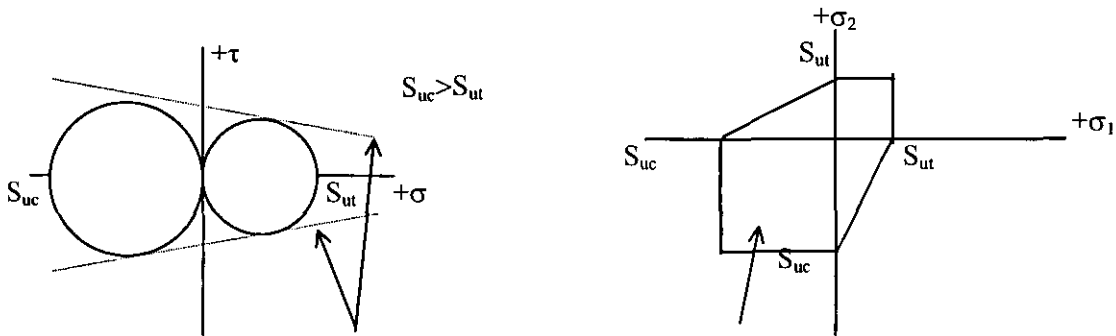


Se ha encontrado que esta teoría correlaciona en forma razonable con la información de pruebas para fracturas cuando el material es frágil, Como puede esperarse no es adecuada para materiales dúctiles. Por esta razón, los puntos de prueba en la **figura 1.14** se han designado como las resistencias últimas a la tensión y a la compresión en un material que se ha supuesto que sea frágil.

### TEORÍA DE MOHR MODIFICADA (DE LA FRICCIÓN INTERNA)

Al paso de los años, se ha propuesto diversas modificaciones empíricas a las teorías básicas de las fallas, una de las cuales es la teoría de Mohr (también conocida como la teoría de Coulomb-Mohr), representada en la **figura 1.15**. Se recomienda la aplicación de esta teoría en materiales frágiles, para los cuales la resistencia a la compresión excede en mucho la resistencia a la tensión. (Aunque se considera por lo general que la teoría es una modificación empírica de la teoría del esfuerzo cortante máximo, usando los valores experimentales de ambas resistencias a la tensión y a la compresión, se puede deducir analíticamente si se incluye el efecto de la fricción interna).

Para predecir la fractura de materiales frágiles se recomienda modificar la teoría de Mohr, ilustrada en la **figura 1.16**. Correlaciona mejor con la mayoría de la información experimental que las teorías de Mohr o del esfuerzo normal máximo, que también se usan.



El círculo principal de Mohr  
Debe quedar dentro de estas  
Cotas para evitar la falla.

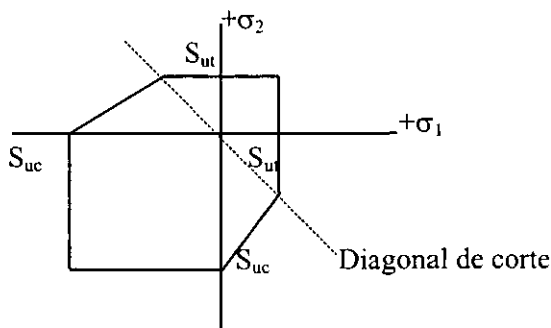
Para esfuerzo biaxiales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  deben quedar  
dentro de esta área para evitar la falla.

a) gráfica del círculo de Mohr.

b) gráfica de  $\sigma_1-\sigma_2$ .

**Figura 1.15. Dos representaciones gráficas de la teoría de Mohr (o de Coulomb-Mohr)**





**Figura 1.16. Representación gráfica de la teoría de Mohr modificada para esfuerzos biaxiales**

## SELECCIÓN Y USO DE LAS TEORÍAS DE FALLA

Conviene recordar que en el mejor de los casos, una teoría sobre las fallas es un sustituto para la información de las pruebas relacionadas con el material real y la combinación de esfuerzos implicada. También cualquier información adicional y útil de prueba puede usarse para mejorar una curva teórica de las fallas para un material dado.

### A) FALLA DE MATERIALES DUCTILES

Tratándose de un estado de esfuerzo biaxial, uno de los tres esfuerzos principales será igual a cero. Considérese que los esfuerzos restantes distintos de cero son  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  como se estableció anteriormente. Representando las tres teorías de falla para un material dúctil en un sistema de coordenadas  $\sigma_1, \sigma_2$  se obtiene a gráfica de la figura( 9); en la figura se muestra una comparación de algunos resultados de experimentos clásicos con las teorías de fluencia y fractura presentadas antes. Obsérvese particularmente la concordancia entre la teoría de la energía máxima de distorsión y los resultados experimentales para materiales dúctiles. Sin embargo, la teoría del esfuerzo normal máximo es mejor para materiales frágiles y puede dar resultados inciertos en materiales dúctiles.

Todas las teorías para el esfuerzo uniaxial concuerdan, puesto que la prueba o ensayo de tensión simple es la norma o estándar de comparación. Por consiguiente, si en un punto uno de los esfuerzos principales es grande en relación con el otro, todas las teorías dan prácticamente los mismos resultados. La discrepancia entre las teorías es mayor en el segundo y cuarto cuadrantes, cuando ambos esfuerzos principales son numéricamente iguales.

Como se mencionó anteriormente, experimentos bien documentados indican que la teoría de la energía de distorsión máxima predice la fluencia con la mayor exactitud en los cuatro cuadrantes. Así pues, el aceptar la teoría de la energía de distorsión máxima como la correcta, significa que la teoría del esfuerzo cortante máximo siempre da resultados conservadores puesto que su representación gráfica queda dentro de la elipse de la energía de distorsión.

Obsérvese que la teoría del esfuerzo normal máximo equivale a la del esfuerzo cortante máximo en el primero y tercer cuadrantes; sin embargo, la gráfica que corresponde a la



teoría del esfuerzo normal máximo queda fuera de la elipse de la energía de distorsión en el segundo y cuarto. De modo que sería muy peligroso utilizar la teoría del esfuerzo normal máximo, ya que podría predecir condiciones de seguridad que en realidad no existen.

Por lo general, un diseñador de elementos mecánicos empleará la teoría del esfuerzo cortante máximo si las dimensiones no tienen que ser muy precisas, si es necesaria una rápida estimación del tamaño, o si se sabe que los factores de seguridad han de ser amplios. La teoría de la energía de distorsión máxima predice con mayor precisión la falla, y por tanto, se utilizará cuando el margen de seguridad hubiera de estar dentro de límites cercanos o cuando se investigue el origen de la falla real de un elemento mecánico.

## B) FALLA DE MATERIALES FRÁGILES

Es importante notar que existen casos en los que pueden fallar los elementos mecánicos, no por fluencia sino por ruptura por fragilidad. Al seleccionar una teoría de falla para el caso de materiales frágiles, se observan primero las siguientes características de la mayor parte de estos materiales:

- 1. La gráfica del esfuerzo en función de la deformación es una línea continua y uniforme hasta el punto de falla; ésta ocurre por ruptura y, por tanto, estos materiales no tienen resistencia de fluencia.**
- 2. La resistencia a la compresión muchas veces suele ser mayor que la resistencia a la tensión.**
- 3. La resistencia última de torsión  $S_{su}$ , es decir, el módulo de ruptura, es aproximadamente igual a la resistencia a la tensión.**

La teoría de esfuerzo normal máximo y la teoría de Coulomb-Mohr se han aplicado para predecir la falla de materiales frágiles. Al emplear la teoría del esfuerzo normal máximo los puntos de prueba serán  $S_{ut}$  y  $S_{uc}$  en lugar de  $S_{yt}$  y  $S_{yc}$  (para materiales dúctiles) respectivamente.

Muestra también un número de puntos de prueba, que permiten comparar las predicciones de la teoría del esfuerzo normal máximo con las de la teoría de Coulomb-Mohr. En el primer cuadrante, donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tienen el mismo sentido, se observa que las dos teorías son idénticas, y por lo tanto, que cualquiera puede emplearse satisfactoriamente para predecir la falla. En el cuarto cuadrante, donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  tienen sentidos opuestos, ambas difieren. Se observa primero que a partir de la teoría de Coulomb-Mohr se obtienen resultados conservadores, puesto que todos los puntos de los datos quedan fuera. Obsérvese también la recta que tiene la pendiente  $\sigma_2/\sigma_1 = -1$ . Para la torsión pura,  $\sigma_2 = -\sigma_1$  y, por tanto, la intersección de esta recta con la gráfica correspondiente a una teoría de falla da el valor de  $S_{su}$ , según lo predice esta teoría. Debe notarse que su intersección con la gráfica correspondiente a la teoría del esfuerzo normal máximo da  $S_{su} = S_{ut}$ , lo cual como ya se indicó, es una característica de los materiales frágiles. Pero la teoría de Coulomb-Mohr predice un valor de  $S_{su}$  algo menor que  $S_{ut}$ . La teoría de Mohr modificada, que se muestra en el cuarto cuadrante, no es tan conservadora como la de Coulomb-Mohr pero es mejor para la predicción de la falla. Obsérvese que la teoría de Mohr modificada no difiere de la del esfuerzo normal máximo hasta que  $\sigma_3$  es menor que  $-S_{ut}$ . Para esta región del cuarto cuadrante, la teoría modificada de Mohr se expresa por la ecuación



$$S_3 = \frac{S_{uc}}{\frac{S_{uc} - S_{ut}}{S_{ut}} \frac{\sigma_1}{\sigma_3} - 1} \quad \sigma_3 \leq -S_{ut} \quad ; \quad \sigma_1 \geq 0$$

En las situaciones donde se puede esperar en forma razonable que una parte sobrecargada en servicio falle en la misma forma que una barra del mismo material en una prueba estándar a la tensión, se recomienda que a) se use la teoría de la energía de distorsión máxima para pronosticar la fluencia cuando el material se comporta como dúctil y b) la teoría modificada de Mohr para predecir la fractura cuando el material se comporta como frágil.

## CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO

Al “flujo” de una fuerza a través de un miembro lo alterará un cambio brusco en la configuración geométrica del elemento, resultando una concentración de las líneas de fuerza. Por ejemplo, las líneas de fuerza en una placa simple cargada uniaxialmente se muestra en la **figura 1.17(a)**, y en la **figura 1.17(b)** se indica cómo se concentran dichas líneas alrededor de un agujero en la placa.

La longitud de los vectores en la **figura 1.17 (c) y 1.17 (d)** indica la magnitud del esfuerzo en diversos puntos a lo largo del plano A-A. En 1 (c) el esfuerzo es uniforme y no se altera en la porción situada lejos de los efectos de extremo de las cargas. **En 1.17 (d)** donde se introduce un agujero, las deformaciones, y por tanto los esfuerzos, se concentran en mayor grado en el orificio. El esfuerzo de mayor intensidad en el plano A.-A es adyacente al agujero y es mucho mayor que el esfuerzo medio en una sección transversal sin perforación los esfuerzos máximos en estructuras que se presentan en los puntos de cambio brusco en la configuración geométrica son extremadamente importantes en el diseño de elementos de cualquier material sometidos a cargas repetidas, y en el diseño de miembros hechos de material frágil sujetos a cargas de cualquier tipo.

A menudo es difícil determinar el valor máximo del esfuerzo en una concentración empleando el análisis teórico, pero los diseñadores o proyectistas suelen determinar el esfuerzo máximo aplicando un factor a un esfuerzo medio obtenido a partir de la relación elemental entre carga y esfuerzo. Tales factores se llaman factores de concentración de esfuerzo y han sido determinados experimentalmente para muchos cambios en las condiciones geométricas, como agujeros, ranuras, muescas y curvas de enlace ( o filetes ) en placas y barras ejes sometidos a esfuerzos axiales, de flexión y de torsión.

El factor de concentración de esfuerzo, representado por  $k$ , se define como la razón del esfuerzo máximo al esfuerzo medio. Es decir,

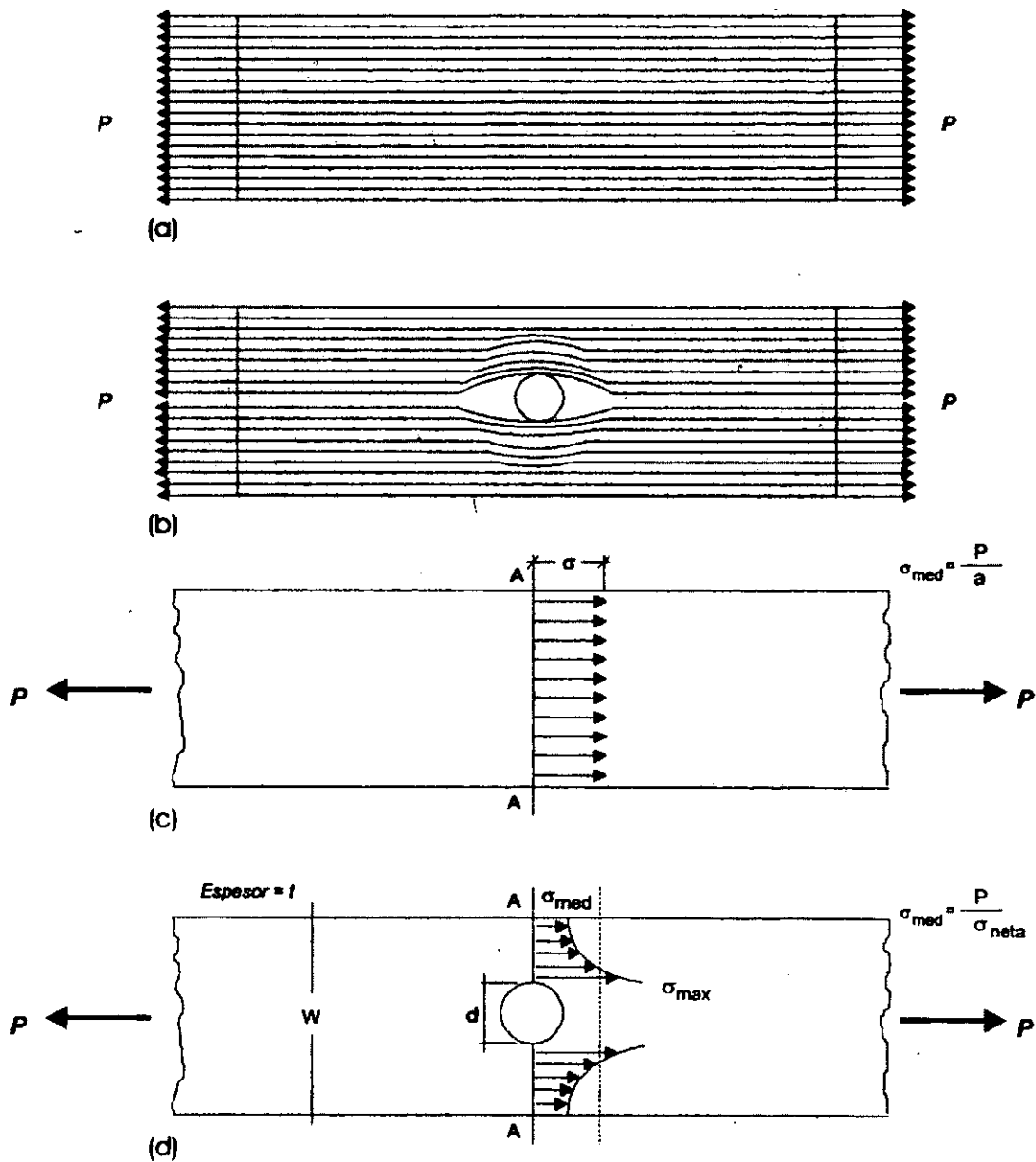
$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{med}}}$$



El esfuerzo medio se determina generalmente utilizando el área neta de la sección transversal. Por ejemplo, en la **figura 1.17 (d)**

$$\sigma_{\max} = k \frac{P}{a_{\text{neta}}}$$

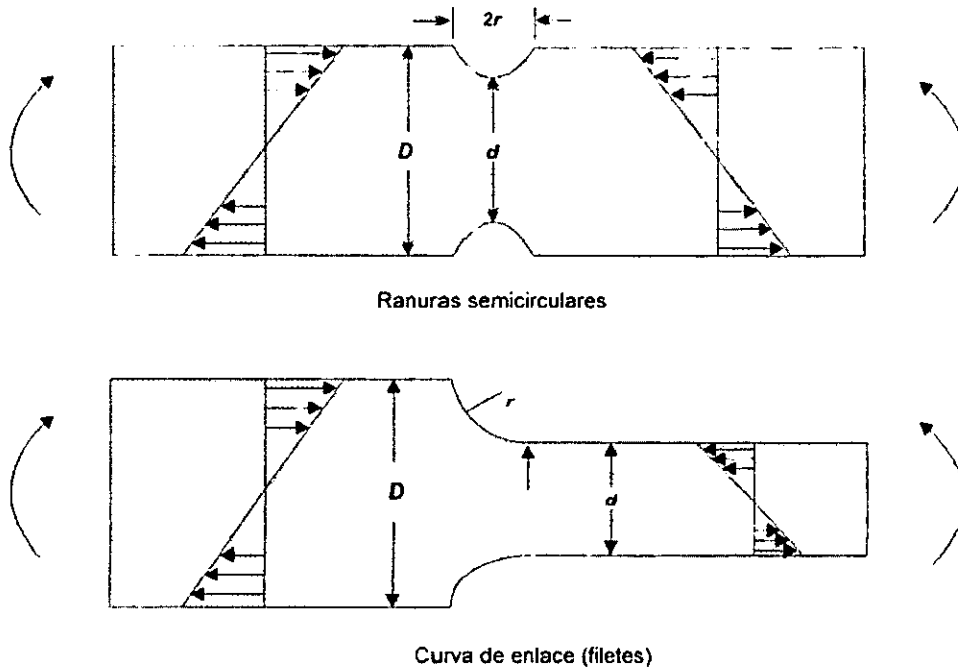
Donde  $a_{\text{neta}}$  es igual a  $(w - d)t$ , siendo  $t$  el grueso de la placa. El factor de concentración de esfuerzo, excepto en casos muy poco usuales, es mayor que la unidad. Para una placa con orificio cargada uniaxialmente el factor tiende a un valor teórico de 3, a medida que la anchura de la placa se hace extremadamente grande en comparación con el diámetro del agujero.



**Fig. 1.17** Se muestran las líneas de concentración de Esfuerzos para placas con cargas axiales y de flexión



En la **figura 1.18 (a) y 1.18 (b)** se ilustran los efectos de un cambio geométrico típico sobre las distribuciones de esfuerzo en miembros de trabajo a flexión y a torsión, respectivamente. Las curvas de la **figura 1.17 y 1.18** dan algunos valores de los factores teóricos de concentración de esfuerzo para placas con cargas axial y de flexión, respectivamente, e indican su variación según diversos parámetros dimensionales.

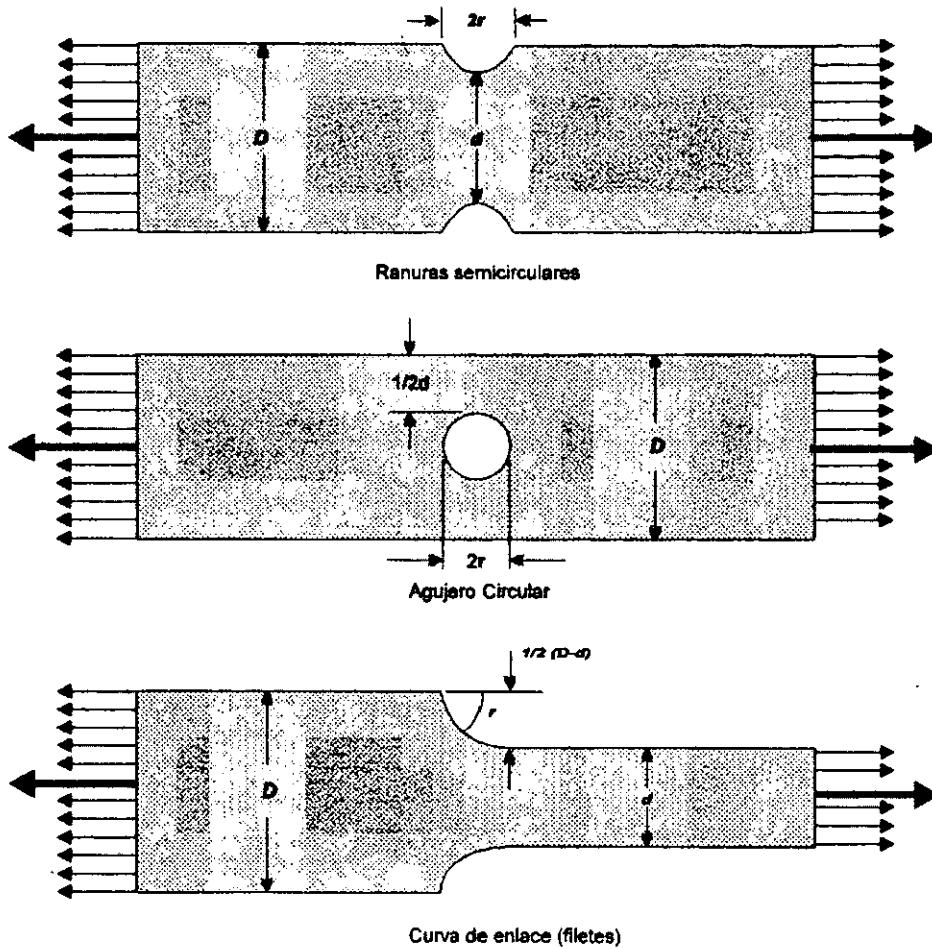


#### FACTORES DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO PARA FLEXIÓN AXIAL

**Fig. 1.18 Efectos de cambio geométrico**

Para un miembro hecho de un material muy frágil, la distribución de esfuerzo “con pico” estará presente a cualquier nivel de carga, y por lo general se iniciará una ruptura en el punto de esfuerzo máximo cuando el valor del esfuerzo alcance el del esfuerzo último. Por esta razón los cambios bruscos de configuración geométrica que originan concentraciones de esfuerzo siempre se deben considerar cuidadosamente, y evitarlos si es posible, en el diseño de miembros que se harán de materiales frágiles.

En un miembro construido de un material dúctil la distribución de esfuerzo “con pico”, o concentración del esfuerzo, se reducirá a , medida que ocurra la fluencia. Este fenómeno se iniciará en el punto de esfuerzo máximo. Si el material tiene un intervalo inelástico grande, como sucede con varios materiales estructurales comunes ( por ejemplo, el acero dulce ), el material sufrirá fluencia en la región de la concentración del esfuerzo, sin peligro de ruptura. Esta es una de las mayores ventajas de la ductilidad de un material. Al diseñar un elemento construido de un material dúctil para trabajo con cargas estáticas, raras veces se consideran los factores de concentración de esfuerzo. Sin embargo, si se esperan cargas repetidas, aun un material dúctil puede fallar como resultado de grietas que se inician en las concentraciones de esfuerzos. **Fig 1.19**



FACTORES DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO PARA CARGA AXIAL

Fig. 1.19 factores de Concentración de Esfuerzos para carga Axial

## CAPÍTULO 2



# PROPIEDADES MECANICAS



# PROPIEDADES MECÁNICAS

---

## 2.1 TIPOS DE ACEROS

Los aceros son los metales más ampliamente usados en la industria los métodos de clasificación está, basados en el proceso de manufactura, contenido de carbono, contenido de aleación, reacción eutectoide, y su uso.

El método más comúnmente usado es sobre la base de la composición química del acero. De acuerdo a este método, los aceros se clasifican en los siguientes tipos:

### a) Aceros al carbono:

- Aceros bajo carbono (  $\leq 0.3 \% C$  )
- Aceros medio carbono ( 0.3 a 0.6 % C )
- Aceros alto carbono ( 0.6 a 1.0 % C )

### b) Aceros aleados:

- Aceros baja aleación (  $\leq 8 \%$  elementos de aleación )
- Aceros alta aleación (  $> 8 \%$  elementos de aleación )

## DESIGNACIÓN DE ACEROS

El sistema más ampliamente usado para la designación de aceros al carbono y aceros baja aleación es el sistema SAE- AISI. Este sistema es aplicado a piezas forjadas semiterminadas, barras roladas en caliente y terminadas en frío, alambre y artículos tubulares sin costura, perfiles estructurales, placas, lamina, solera y fleje, y tubos soldados. Otros sistemas para clasificar aceros al carbono y de baja aleación incluyen el sistema de numeración unificada ( UNS) y especificaciones ASTM.

Sistemas de clasificación similares han sido ideados para aceros de alta aleación, tales como aceros inoxidable y aceros para herramientas.

El desempeño de los aceros depende de las propiedades asociadas con sus microestructuras. Ya que todas las fases en los aceros son cristalinas, Las microestructuras del acero están constituidas de varios cristales, Algunas veces tres o cuatro tipos diferentes, las cuales están físicamente combinadas por solidificación, cambios de fase en estado sólido, deformación en caliente, deformación en frío y tratamiento térmico. Cada tipo de microestructura y producto es desarrollado para una gama de propiedades características por rutas de procesamiento específicos que controlan los cambios microestructurales.





## SISTEMA DE DESIGNACION AISI

Este sistema de designación para aceros consiste de cuatro o cinco dígitos numéricos. El primer dígito de la designación indica el tipo al cual el acero pertenece. El segundo dígito indica el porcentaje aproximado del elemento de aleación predominante, o algunas veces indica la modificación de la aleación en tal grupo. Los últimos dos o tres dígitos indican el contenido de carbono en centésimas de porcentaje.

Además de las especificaciones numéricas AISI pueden incluir una letra como prefijo para indicar el proceso de manufactura empleado.

## TABLAS DE ESPECIFICACIÓN

La composición detallada, propiedades, y datos técnicos de un material en particular están disponibles en la forma de tablas de especificación. Dichas tablas para distintos materiales han sido compiladas y publicadas por diversas asociaciones. Estas tablas de especificación proporcionan las propiedades mecánicas y físicas, rangos de composición para distintos elementos presentes, parámetros de tratamiento térmico y la variación esperada en propiedades, dimensiones limitantes del material y su variación con las propiedades, y todos los datos técnicos requeridos para diseño.

## PROPIEDADES Y APLICACIONES DE ACEROS

Los aceros tienen grandes aplicaciones de ingeniería entre los materiales metálicos debido a la amplia gama y combinación de propiedades físicas y mecánicas que el acero puede poseer. Una combinación de dureza, resistencia y ductilidad pueden ser obtenidas en los aceros con el control adecuado del contenido de carbono, elementos de aleación y tratamiento térmico. Los aceros pueden ser fácilmente sometidos a todos los tipos de proceso de fabricación tales como maquinado, conformado, rodado en frío, trabajo en caliente, fundición, soldadura, etc.

Las propiedades mecánicas del acero son principalmente determinadas por el contenido de carbono en el acero. La dureza y resistencia aumentan con el incremento del contenido de carbono.

## ACEROS ALEADOS

Los principales constituyentes de un acero simple al carbono son hierro y carbono. Las propiedades de aceros al carbono están directamente relacionadas al porcentaje de carbono presente. Además del carbono, los aceros simples al carbono contienen otros elementos tales como manganeso ( 0.3 a 1 % ), silicio ( 0 a 0.3 % ), azufre ( 0.04 % máx. ) y fósforo ( 0.05 % máx. ). Estos elementos no tienen un efecto apreciable en las propiedades en los aceros al carbono. El carbono es responsable de la dureza y resistencia requeridas en el acero. El manganeso es adicionado para proporcionar una templabilidad y resistencia mínimas después del trabajado. El silicio es adicionado solo cuando el acero es desoxidado. El azufre y fósforo están presentes como impurezas no deseadas.



Un acero aleado puede ser definido como un acero al carbono al cual uno o más elementos son adicionados para obtener algunos efectos benéficos. Los elementos comúnmente adicionados incluyen silicio, manganeso, níquel, cromo, molibdeno, tungsteno, vanadio, cobalto, cobre, boro, aluminio, etc. Debido a la presencia de estos elementos, los aceros aleados poseen los siguientes mejoramientos en propiedades y aplicaciones en comparación a los aceros al carbono.

- a) **Los aceros aleados pueden tener mayor dureza, resistencia y tenacidad.**
- c) **Altos valores de dureza y resistencia pueden ser logrados en secciones transversales mucho mayores en aceros aleados, en comparación a los aceros simples al carbono.**
- d) **Poseen mucho mayor templabilidad, lo cual tiene un mayor significado en el tratamiento térmico.**
- e) **Los aceros aleados tienen mayor susceptibilidad al revenido, y retienen su dureza y resistencia a temperaturas elevadas ( resistencia a la termofluencia), en comparación a los aceros simples al carbono.**
- f) **Poseen alta dureza ( dureza roja ) a temperaturas de hasta 600 ° C, debido a la presencia de carburos de aleación**
- g) **Los aceros aleados tienen mayor resistencia a la corrosión y oxidación.**

Los elementos de aleación pueden afectar la constitución, características y comportamiento de los aceros al carbono en muchas formas. Algunos de los principales efectos de los elementos de aleación son: Endurecimiento de la ferrita, formación de carburos y compuestos especiales, cambio de temperaturas y composiciones críticas, y disminución de la rapidez de enfriamiento crítica.

En la siguiente tabla (**Tabla 2.1**) se muestra el sistema de designación AISI-SAE de aceros al carbono y de baja aleación.

## ACEROS PARA HERRAMIENTA

Un acero para herramienta es cualquier acero usado para hacer herramientas para el corte y conformado de metales. Estos aceros aleados complejos, que contienen relativamente grandes cantidades de tungsteno, molibdeno, vanadio, manganeso y cromo, hacen posible reunir cada vez mas demandas de servicio severo. En servicio, la mayoría de las herramientas están sometidas a cargas extremadamente altas que son aplicadas rápidamente. Las herramientas deben soportar esas cargas un gran numero de veces sin ruptura y sin sufrir excesivo desgaste o deformación en muchas aplicaciones, los aceros para herramienta deben proporcionar esta capacidad bajo condiciones que desarrollan altas temperaturas en la herramienta. La mayoría de los aceros para herramienta son productos trabajados pero piezas fundidas de precisión puede ser usadas en algunas aplicaciones. El proceso de metalurgia de polvos es también usado en la fabricación de aceros para herramienta.



Este proporciona un tamaño y distribución de carburos uniformes en secciones grandes, y composiciones especiales que son difíciles o imposibles de producir en aleaciones trabajadas o fundidas.

Los aceros para herramienta son clasificados de acuerdo a su composición, aplicación o método de templado. Cada grupo es identificado con una letra capital; Los tipos de aceros para herramienta individuales son asignados por números de código (**Tabla 2.2**).

**1.- Aceros de alta velocidad** son materiales para herramienta destinados para el uso en aplicaciones de corte de metales a alta velocidad. Hay dos clasificaciones de aceros de alta velocidad: Aceros de alta velocidad de al molibdeno ( grupo M ) los cuales contienen de 0.75 a 1.52 % C y 4.5 a 11 % Mo, y aceros de alta velocidad al tungsteno ( grupo T ) que tienen contenidos de carbono similares pero altos contenidos de tungsteno ( 11.75 a 21 % ). Los aceros del grupo M constituyen más del 95 % de todos los aceros de alta velocidad producidos.

**2.- Aceros para trabajo en caliente ( grupo H )** han sido desarrollados para soportar las combinaciones de calor, presión y abrasión asociadas a corte o conformado de metales a altas temperaturas. Los aceros del grupo H normalmente tienen contenidos de carbono medios ( 0.35 a 0.45 % ) y cromo, tungsteno, molibdeno, y contenidos de vanadio de 6 a 25 %. Los aceros H son divididos en aceros para trabajo en caliente al cromo, aceros para trabajo en caliente al tungsteno y aceros para trabajo en caliente al molibdeno.

**3.- Aceros para herramienta**, son restringidos en aplicación para aquellos usos que no implican calentamiento prolongado o repetitivo por arriba de 205 a 260 °C. Hay tres categorías de aceros para trabajo en frío: Aceros endurecidos al aire ( grupo A ), aceros al alto carbono y alto cromo ( grupo D ), y aceros endurecidos en aceite ( grupo O ).

**4.- Aceros resistentes al impacto ( grupo S )**, contienen manganeso, silicio, cromo, tungsteno y molibdeno, en distintas combinaciones el contenido de carbono es alrededor de 1.5 % los aceros del grupo S son usados principalmente para aplicaciones que requieren alta tenacidad y resistencia a cargas por impacto.

**5.- Aceros para herramienta para propósitos especiales de baja aleación (grupo L)**, contienen pequeñas cantidades de cromo, vanadio, níquel, molibdeno. Los aceros del grupo L son generalmente usados para partes de maquinaria y otras aplicaciones especiales que requieren buena resistencia y tenacidad.

**6.- Aceros para moldes ( grupo P )**, contienen cromo y níquel como principales elementos de aleación. Debido a su baja resistencia a suavizamiento a elevadas temperaturas, los aceros del grupo P son usados casi exclusivamente en moldes permanentes para fundición por inyección a baja temperatura y en moldes para inyección o molde por comprensión de plásticos.

**7.- Aceros para herramienta endurecidos en agua ( grupo W)**, contienen carbono como el principal elemento de aleación ( 0.7 a 1.5 %C ). Los aceros del grupo W, los cuales además tienen baja resistencia al suavizamiento a elevadas temperaturas, son adecuados para el troquelado en frío, acuñado, herramientas para el trabajado de la madera, herramientas para el corte de metales y componentes de maquinas herramientas resistentes al desgaste.



**Los aceros para herramienta son seleccionados sobre la base de las siguientes propiedades:**

- 1) Características no deformadoras**
- 2) Tenacidad**
- 3) Resistencia al desgaste**
- 4) Dureza roja**
- 5) Resistencia a la descarburación**
- 6) Templabilidad**
- 7) Maquinabilidad**

### **ACEROS INOXIDABLES**

Los aceros inoxidable son aleaciones a base de hierro conteniendo al menos 10.5 %Cr que logran sus características inoxidable mediante la formación de una capa superficial invisible y adherente de óxido rico en cromo. Este óxido se forma en la presencia de oxígeno. Otros elementos adicionados para mejorar características particulares incluyen níquel, molibdeno, cobre, titanio, aluminio, silicio, níquel, nitrógeno, azufre y selenio. El carbono está normalmente presente en cantidades alrededor de menos de 0.03 % a más de 1 % en ciertos grados.

**Los aceros inoxidable poseen una combinación de diversas propiedades:**

- 1) Amplio rango de resistencia y dureza**
- 2) Alta ductilidad y formabilidad**
- 3) Alta resistencia a la corrosión**
- 4) Buena resistencia a la termofluencia**
- 5) Alta resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas**
- 6) Buena conductividad térmica**
- 7) Fácil soldabilidad**
- 8) Buena maquinabilidad**
- 9) Alta capacidad de trabajo en frío y en caliente**
- 10) Excelente apariencia y acabado superficial**

La más grande ventaja de los aceros inoxidable sobre los aceros simples al carbono y aleados es que proporciona alta resistencia a la corrosión en la mayoría de los medios de operación e intemperie.

Los aceros inoxidable trabajados son divididos en cinco grupos: Aceros inoxidable martensíticos, Aceros inoxidable ferríticos, Aceros inoxidable austeníticos, Aceros inoxidable dúplex (ferríticos-Austeníticos) y aceros inoxidable endurecidos por precipitación.

Los inoxidable martensíticos son esencialmente aleaciones de cromo y carbono que poseen una estructura cristalina bcc (martensítica) en la condición de endurecido. Son ferromagnéticos, endurecibles por tratamientos térmicos y generalmente resisten a la corrosión solo en ambientes relativamente ligeros. El contenido de cromo está generalmente en el rango de 10.5 a 18 %, y el contenido de carbono puede exceder 1.2 %.



Adiciones de nitrógeno, níquel y molibdeno en combinación con niveles de carbono un poco más bajos producen aceros con tenacidad y resistencia a la corrosión. Azufre o selenio es adicionado en algunas aleaciones para mejorar la maquinabilidad.

Los aceros inoxidable ferríticos son esencialmente aleaciones hierro-cromo con estructuras cristalinas bcc. Algunos grados pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y níquel para conferir características particulares. Las aleaciones ferríticas son ferromagnéticas y tienen buena ductilidad y formabilidad, pero sus resistencias a alta temperatura son relativamente bajas comparadas con los grados austeníticos. Los aceros inoxidable ferríticos son sin embargo altamente resistentes al fisuramiento por esfuerzo-corrosión por cloruro.

Los aceros inoxidable austeníticos son los más comúnmente usados de los aceros inoxidable. Estos materiales tienen una estructura fcc conseguida mediante el uso liberal de elementos de austenización tales como níquel, manganeso y nitrógeno. Estos aceros son esencialmente no magnéticos en la condición de recocido y pueden ser endurecidos solo por trabajo en frío. Usualmente poseen excelentes propiedades criogénicas y buena resistencia a alta temperatura. El contenido de cromo generalmente varía de 16 a 26 %, níquel hasta aproximadamente 35 % y manganeso hasta 15 %. Molibdeno, cobre, Aluminio, titanio y niobio pueden ser adicionados para conferir ciertas características, tales como resistencia a la corrosión u oxidación incrementadas. Azufre o selenio pueden ser adicionados para mejorar la maquinabilidad.

Los aceros inoxidable dúplex tienen una estructura mixta de ferrita bcc y austenita fcc. La cantidad exacta de cada fase es función de la composición y tratamiento térmico. Las mayorías de las aleaciones son diseñadas para contener cantidades casi iguales de cada fase en la condición de recocido. Los principales elementos de aleación son cromo (21 a 30 %) y níquel ( 3.5 a 7.5 % ), pero molibdeno ( hasta 4 % ), nitrógeno, cobre, silicio y tungsteno pueden ser adicionados para controlar el balance estructural y para impartir ciertas características de resistencia a la corrosión.

Los aceros inoxidable endurecidos por precipitación (PH) son grados de cromo-níquel que contienen elementos de endurecimiento por precipitación tales como cobre y aluminio. Estos grados pueden tener estructuras cristalinas austeníticas, sé austeníticas o martensíticas. Todos son endurecidos por un tratamiento de envejecimiento final que forma precipitados muy finos a partir de una solución sólida supersaturada.

Debido a su amplia gama de propiedades físicas, mecánicas, de corrosión y características de fabricación, los aceros inoxidable son universalmente usados para todo tipo de aplicación.

La selección de un acero inoxidable esta normalmente basada en la resistencia ala corrosión, propiedades mecánicas y costosos aceros inoxidable ferríticos y austeníticos deben ser usados donde sea requeridas alta ductilidad y formabilidad. Si es requerida alta resistencia, los aceros inoxidable austeníticos pueden ser usados después de trabajo en frío. Los aceros inoxidable martensíticos deben ser usados donde sea requeridas alta dureza y resistencia.

La apropiada selección de los aceros inoxidable bajo distintas condiciones de corrosión es muy esencial. En general los aceros inoxidable austeníticos tienen mucho mejor resistencia a la corrosión que los aceros inoxidable ferríticos y martensíticos. Los grados estabilizados de bajo carbono y aceros inoxidable al molibdeno son ampliamente usados en la industria química y bajo las más severas condiciones de corrosión.

**La siguiente tabla (Tabla 2.3) muestra las composiciones de aceros inoxidable estándar representativos:**



### Sistema de designación AISI\_SAE para acero al carbono y de baja aleación

Números y dígitos	Tipo de acero y contenido de aleación nominal, %	Numeracion es y dígitos	Tipo de acero y contenido de aleación nominal, %	Numeracion es y dígitos	Tipo de acero y contenido de aleación nominal, %
<b>Aceros al Carbono</b>		<b>Aceros al Niquel-Cromo-Molibdeno</b>		<b>Aceros al Cromo (para rodamientos)</b>	
10xx(a).....	Simples al carbono (Mn 1 max)	43xx.....	Ni 1.82; Cr 0.50 y 0.80; Mo 0.25	50xxx.....	Cr 0.50
11xx.....	Resulfurados			51xxx.....	Cr 1.02
12xx.....	Resulfurados y refosforizados	43BVxx.....	Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12 y 0.25; V 0.03 min	52xxx.....	Cr 1.45
15xx.....	Simples al carbono (rango max Mn: 1.00-1.65)	47xx.....	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20 y 0.35	} C 1.00 min.	
		81xx.....	Ni 0.30; Cr 0.40; Mo 0.12		
<b>Aceros al Manganeso</b>		86xx.....	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20	<b>Aceros al Cromo-Vanadio</b>	
13xx.....	Mn 1.75	87xx.....	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25	61xx.....	C 0.60, 0.80, and 0.95; V 0.10 y 0.15 min
		88xx.....	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35	<b>Aceros al Tungsteno-Vanadio</b>	
<b>Aceros al Niquel</b>		93xx.....	Ni 3.25; Cr 0.20; Mo 0.12	72xx.....	W 1.75; Cr 0.75
		94xx.....	Ni 0.45; Cr 0.40; Mo 0.12	<b>Aceros al Silicio-Manganeso</b>	
25xx.....	Ni 5.00	97xx.....	Ni 0.55; Cr 0.20; Mo 0.20		
		98xx.....	Ni 1.00; Cr 0.80; Mo 0.25		
<b>Aceros al Niquel-Cromo</b>		<b>Aceros al Niquel-Molibdeno</b>			
23xx.....	Ni 3.50	46xx.....	Ni 0.85 y 1.82; Mo 0.20 y 0.25		
		48xx.....	Ni 3.50; Mo 0.25	92xx.....	Si 1.40 y 2.00; Mn 0.65, 0.82, y 0.85; Cr 0 y 0.65
<b>Aceros al Niquel-Cromo</b>		<b>Aceros al Cromo</b>		<b>Aceros baja aleación de alta resistencia</b>	
31xx.....	Ni 1.25; Cr 0.65 y 0.80			9xx.....	diversos grados SAE
32xx.....	Ni 1.75; Cr 1.07				
33xx.....	Ni 3.50; Cr 1.50 y 1.57	<b>Aceros al Cromo</b>		<b>Aceros al Boro</b>	
34xx.....	Ni 3.00; Cr 0.77			XxBxx.....	B denota acero al boro
<b>Aceros al Molibdeno</b>		<b>Aceros al Plomo</b>			
40xx.....	Mo 0.20 y 0.25	50xx.....	Cr 0.27, 0.40, 0.50, y 0.65		
44xx.....	Mo 0.40 y 0.52	51xx.....	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00, y 1.05	xxLxx..... L denota acero plomado	
<b>Aceros al Cromo-Molibdeno</b>					
41xx.....	Cr 0.50, 0.80, y 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25, y 0.30				

**Tabla 1 (a) Las xx en los últimos dos dígitos de estas designaciones, indica que el contenido de carbono (en centésimas de porcentaje) debe ser anexado.**



PROPIEDADES MECÁNICAS **LIMITES DE COMPOSICIÓN DE TIPOS SELECCIONADOS DE ACEROS PARA HERRAMIENTA TRABAJADOS**

Designación										
AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mn	W	V	Co
<b>Aceros al molibdeno de alta velocidad</b>										
	T11301	0.78-0.88	0.15-0.40	0.20-0.50	3.50-4.00	0.30max	8.20-9.20	1.40-2.10	1.00-1.35	...
	T11302	0.78-0.88; 0.095-1.05	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30max	4.50-5.50	5.50-6.75	1.75-2.20	...
	T11304	1.25-1.40	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.75	0.30max	4.25-5.50	5.25-6.50	3.75-4.50	...
	T11335	1.05-1.40	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30max	4.580-5.50	5.50-6.75	1.75-2.20	4.50-5.50
	T11342	1.25-1.15	0.15-0.40	0.15-0.65	3.50-7.25	0.30max	9.00-10.00	1.15-1.85	0.95-1.35	7.75-8.75
	T11362	1.25-1.35	0.15-0.40	0.15-0.40	3.50-4.00	0.30max	10.00- 11.00	5.75-6.50	1.80-2.10	...
<b>Aceros al tungsteno de alta velocidad</b>										
	T12001	0.65-0.80	0.10-0.40	0.20-0.40	3.75-4.50	0.30max	...	16.25- 18.75	0.90-1.30	...
	T12015	1.50-1.60	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-5.00	0.30max	1.00max	11.75- 13.00	4.50-5.25	4.75-5.25
<b>Aceros al cromo para trabajos al caliente</b>										
	T20811	0.33-0.43	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30max	1.10-1.60	...	0.30-0.60	...
	T20819	0.32-0.45	0.20-0.50	0.20-0.50	4.00-4.75	0.30max	0.30-0.55	3.75-4.50	1.75-2.20	4.00-4.50
<b>Aceros al tungsteno para trabajo caliente</b>										
	T20821	0.26-0.36	0.15-0.40	0.15-0.50	3.00-3.75	0.30max	...	8.50-10.00	0.30-0.60	...
	T20823	0.25-0.35	0.15-0.40	0.15-0.60	11.00- 12.75	0.30max	...	11.00- 12.75	0.75-1.25	...
	T20826	0.45-0.55b	0.15-0.40	0.15-0.40	3.75-4.50	0.30max	...	17.25- 19.00	0.75-1.25	...
<b>Aceros al molibdeno para trabajo en caliente</b>										
	T20842	0.55-0.70b	0.15-0.40	...	3.75-4.50	0.30max	4.50-5.50	5.50-6.75	1.75-2.20	...
<b>Aceros endurecidos en aire, de media aleación, para trabajo en frío</b>										
	T30102	0.95-1.05	1.00max	0.50max	4.75-5.50	0.30max	0.90-1.40	...	0.15-0.50	...
	T30106	0.65-0.75	1.80-2.50	0.50max	0.90-1.20	0.30max	0.90-1.40	...	...	...
	T30110	1.25-1.50c	1.60-2.10	1.00-1.50	...	1.55-2.05	1.25-1.75	...	...	...
<b>Aceros al alto carbono, alto cromo, para trabajo en frío</b>										
	T30402	1.40-1.60	0.60max	0.60max	11.00- 13.00	0.30max	0.70-1.20	...	1.10max	...
	T30403	2.00-2.35	0.60max	0.60max	11.00- 13.50	0.30max	...	1.00max	1.00max	...
<b>Aceros endurecidos en aceite para trabajo en frío</b>										
	T31501	0.85-1.00	1.00-1.40	0.50max	0.40-0.60	0.30max	...	0.40-0.60	0.30max	...
	T31502	0.85-0.95	1.40-1.80	0.50max	0.50max	0.30max	0.60max	...	0.30max	...
	T31506	1.25-1.55c	0.30-1.10	0.55-1.50	0.30max	0.30max	0.20-0.30	...	...	...
<b>Aceros resistentes al impacto</b>										
	T41901	0.40-0.55	0.10-0.40	0.15-1.20	1.00-1.80	0.30max	0.50max	1.50-3.00	0.15-0.30	...
	T41902	0.40-0.55	0.30-0.50	0.90-1.20	...	0.30max	0.30-0.60	...	0.50max	...
	T41907	0.40-0.55	0.20-0.90	0.20-1.00	3.00-3.50	...	1.30-1.80	...	0.20- 0.30(d)	...
<b>Aceros de baja aleación para herramientas de propósito especial</b>										
	T61206	0.45-1.00b	0.10-0.90	0.50max	0.70-1.20	...	0.25max	...	0.10-0.30	...
	T61206	0.65-0.75	0.25-0.80	0.50max	0.60-1.20	0.25-2.00	0.50max	...	0.20- 0.30(d)	...
<b>Aceros de bajo carbono para moldes</b>										
	T51602	0.10max	0.10-0.40	0.10-0.40	0.75-1.25	0.10-0.50	0.15-0.40	...	...	...
	T51605	0.10	0.20-0.60	0.40max	2.00-2.50	0.35max	...	...	...	...
	T51620	0.28-0.40	0.60-1.00	0.20-0.80	1.40-2.00	...	0.30-0.55	...	...	...
<b>Aceros endurecidos en agua</b>										
	T72301	0.70-1.50e	0.10-0.40	0.10-0.40	0.15max	0.20max	0.10max	0.15max	0.10max	...
	T72302	0.85-1.50e	0.10-0.40	0.10-0.40	0.15max	0.20max	0.10max	0.15max	0.15-0.35	...

Todos los aceros excepto los del grupo W contienen 0.25max Cu, 0.03max P y 0.03 max S; lo aceros del grupo W contiene 0.20max Cu, 0.025 max P y 0.25max S. Donde se a especificado, el azufre puede ser incrementado a 0.06-0.15% para mejorar la maquinabilidad de los aceros del grupo A, D, H, T. (b) Disponible en varios rangos de carbono. (c) Contiene grafito libre en la microestructura. (d) Opcional. (e) Los rangos de carbono especificados están designados por números sufijos.



## Composiciones de aceros inoxidables estándar representativos

Composición (a). % en pesos

Tipo	Designación UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Other
<b>Tipos Austeníticos</b>									
301	S20100	0.15	5.05-7.05	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25N
305	S20500	0.12-0.25	14.0-15.5	1.00	16.5-18.0	1.0-1.75	0.06	0.03	0.320.40N
302	S30200	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	...
304	S30400	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	...
304N	S30451	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.16N
310	S31000	0.25	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	...
316	S31600	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316NL	S31653	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0Mo; 0.10-0.06N
321	S32100	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5x %C min Ti
347	S34700	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	10x %C min Nb
348	S34800	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	0.2Co; 10x %C min Nb; 0.10 Ta
<b>Tipos Ferríticos</b>									
405	S40500	0.08	1.00	1.00	11.5-14.5	...	0.04	0.03	0.10-0.30Al
409	S40900	0.08	1.00	1.00	10.5-11.75	0.50	0.045	0.045	6x%C min-0.75max Ti
430	S43000	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	...	0.04	0.03	...
434	S43400	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	...	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo
439	S43035	0.07	1.00	1.00	17.0-19.0	0.50	0.04	0.03	0.15 Al; 12x%C-1.10Ti
442	S44200	0.20	1.00	1.00	18.0-23.0	...	0.04	0.03	...
446	S44600	0.20	1.50	1.00	23.0-27.0	...	0.04	0.03	0.25 N
<b>Tipos Duplex (Ferríticos – Austeníticos)</b>									
2209	S32900	0.20	1.00	0.75	23.0-5.00	2.50-5.00	0.040	0.030	1.00-2.00 Mo
	S31803	0.03	2.00	1.00	21.0-23.0	4.50-6.50	0.030	0.020	...
<b>Tipos Martesíticos</b>									
410	S41000	0.15	1.00	1.00	11.5-13.5	...	0.04	0.03	...
414	S41400	0.15	1.00	1.00	11.5-13.5	1.25-2.50	0.04	0.03	...
416Se	S41623	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	...	0.06	0.06	0.15min Se
410	S42000	0.15 min	1.00	1.00	12.0-14.0	...	0.04	0.03	...
411	S43100	0.20	1.00	1.00	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04	0.03	...
410A	S44002	0.60-0.75	1.00	1.00	16.0-18.0	...	0.04	0.03	0.75 Mo
<b>Tipos de endurecimiento por precipitación</b>									
6113-8 Mo	S13800	0.05	0.20	0.10	12.25-13.25	7.5-8.5	0.01	0.008	2.0-2.5Mo;0.90-1.35 Al;0.01 N
615 PH	S15500	0.07	1.00	1.00	14.0-15.5	3.5-5.5	0.04	0.03	2.5-4.5Cu;0.158-0.45Nb
614 PH	S17400	0.07	1.00	1.00	15.5-17.5	3.0-5.0	0.04	0.03	3.0-5.0Cu;0.15-0.45Nb

(a) Los valores solos, son valores máximos a menos que se indique otra cosa. (b) Opcional





## 2.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros, y consisten en calentar y mantener las piezas o herramientas de acero a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes. De esta forma se modifica la estructura microscópica de los aceros, se verifican transformaciones físicas y a veces hay también cambios en la composición del metal.

El tiempo y la temperatura son los factores principales y hay que fijarlos siempre de antemano, de acuerdo con la composición del acero, la forma y el tamaño de las piezas y las características que se desean obtener.

Los tratamientos térmicos más usados son:

**El recocido, temple, normalizado, revenido, cementación, nitruración, temple en baño de sales, temple en baño de plomo, etc.**

**RECOCIDO:** con este nombre se conocen varios tratamientos cuyo objeto principal es ablandar el acero, otras veces también se desea además regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Consisten en calentamientos a temperaturas adecuadas, seguidos generalmente de enfriamientos lentos. Las diferentes clases de recocidos que se emplean en la industria se pueden clasificar en tres grupos: Recocidos con austenización completa, recocidos subcríticos y recocidos con austenización incompleta.

**Recocidos de austenización completa o de regeneración.-** En este caso el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y luego el material se enfría muy lentamente. Sirve para ablandar el acero y regenerar su estructura.

**Recocidos subcríticos.-** El calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior, no teniendo tanta importancia como en el caso anterior la velocidad de enfriamiento, pudiendo incluso enfriarse el acero al aire sin que se endurezca. Por medio de este tratamiento se eliminan las tensiones del material y se aumenta su ductilidad.

Se pueden distinguir tres clases de recocidos subcríticos: a) de ablandamiento, b) contra acritud y c) globular.

**Recocido de ablandamiento.-** Su principal objeto es ablandar el acero por un procedimiento rápido y económico. Con este tratamiento no se suelen obtener las menores durezas, pero en muchos casos las que se consiguen son suficientes para mecanizar perfectamente los materiales.

El proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura, que siendo inferior a la crítica  $Ac_1$ , sea lo más elevada posible y enfriar luego al aire. Las durezas que se obtienen en ciertos aceros de herramientas y construcción de alta aleación, después de este tratamiento, suelen ser algunas veces demasiado elevadas para el mecanizado.



**Recocido contra acritud.-** Se efectúa a temperatura de  $550^{\circ}$  a  $650^{\circ}$  y tiene por objeto principalmente aumentar la ductilidad de los aceros de poco contenido en carbono ( menos de 0.40 % ) estirados en frío.

Con el calentamiento a esa temperatura se destruye la cristalización alargada de la ferrita, apareciendo nuevos cristales poliédricos más dúctiles que los primitivos, que permiten estirar o laminar nuevamente el material sin dificultad. El enfriamiento se suele hacer al aire.

**Recocido subcrítico globular.-** En ocasiones para obtener en los aceros al carbono y de baja aleación una estructura globular de muy baja dureza, en cierto modo parecida a la que se obtiene en el recocido globular de austenización incompleta. Se les somete a los aceros a un calentamiento a temperaturas inferiores pero muy próximas a la crítica Ac1, debiendo luego enfriarse el acero lentamente en el horno.

**Recocidos de austenización incompleta ( globulares).-** Son tratamientos que suelen dar a los aceros al carbono o aleados, de más de 0.50 % de carbono, para ablandarlos y mejorar su maquinabilidad. Consisten en calentamientos prolongados a temperaturas intermedias entre la crítica superior y la crítica inferior, seguidos siempre de un enfriamiento lento. El fin que se persigue con estos recocidos es obtener la menor dureza posible y una estructura microscópica favorable para el mecanizado de las piezas.

Unas veces se hace el recocido empleando un ciclo oscilante de temperaturas que son unas veces superiores y otras inferiores a Ac1. Otras veces ( que suelen ser mayoría ) se emplean temperaturas ligeramente superiores a Ac1. Al primero de estos tratamientos se le suele simplemente llamar recocido globular oscilante y al segundo se le llama simplemente recocido globular de austenización incompleta.

**Doble recocido -** Cuando se desean obtener muy bajas durezas se suele dar a los aceros primero un recocido de regeneración y luego otro subcrítico.

**NORMALIZADO.-** Este tratamiento consiste en un calentamiento a temperatura ligera más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento a aire tranquilo. De esta forma se deja el acero con una estructura y propiedades que arbitrariamente se consideran como normales y características de su composición. Se suele utilizar para piezas que han sufrido trabajos en caliente. , Trabajos en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos, y también sirve para destruir los efectos de un tratamiento anterior defectuoso. Por medio del normalizado se eliminan las tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano del acero. Se emplea casi exclusivamente para los aceros de construcción al carbono o de baja aleación.

El normalizado es uno de los tratamientos térmicos más fáciles de efectuar. Se utiliza lo mismo para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas, y sirve para afinar la estructura y eliminar tensiones que suelen aparecer en la solidificación, forja o en otras operaciones posteriores.

Consiste en calentar los aceros a una temperatura superior a la crítica Ac3 o Accm, para que pasen al estado austenítico y dejar luego enfriar las piezas al aire tranquilo. En el normalizado, la velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que en el recocido. Es un tratamiento típico de los aceros al carbono de construcción de 0.15 a 0.40 % de C y rara vez se emplea en los aceros de herramientas, ni en los aleados de construcción. Las temperaturas de normalizado recomendadas para estos aceros son las que se señalan en la siguiente tabla:



Composición % de C	Temperatura
0.10	935°
0.20	910°
0.30	880°
0.40	860°
0.50	840°

**Tabla 2.4 Temperaturas recomendadas para el normalizado de los aceros al carbono.**

El espesor de las piezas ejerce bastante influencia en los constituyentes y características que se obtienen en el normalizado de los aceros.

**TEMPLE.-** El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría luego más o menos rápidamente ( según la composición y el tamaño de la pieza ) en un medio conveniente, agua, aceite, etc.

**AGUA.-** Debe evitarse que el agua se caliente durante el temple, conviene que la temperatura del agua oscile entre 15° y 20°, pues si la temperatura es superior a 30°, se prolonga exageradamente la primera etapa de enfriamiento lo que es un gran inconveniente, porque disminuye la velocidad de enfriamiento en la zona 750° - 500° y se favorece, sobre todo en los aceros de poco poder templante, la formación de estructuras blandas.

**ACEITE.-** Se suelen emplear aceites animales, vegetales y minerales. Antiguamente se usaban sólo aceites de los dos primeros grupos y entre ellos los aceites vegetales y sobre todos el aceite de colza era el preferido. Los aceites animales y vegetales con el uso continuo a temperaturas de 50 ° a 125° se descomponen, espesan y se vuelven gomosos dando temples bastante irregulares. Además suelen resultar caros y de olor desagradable. Los mejores aceites para el temple son los aceites minerales obtenidos en la destilación fraccionada del petróleo, preparando ya en la actualidad muchas destilerías especialmente fabricados para el temple de los aceros.

**Un buen aceite de temple debe poseer las siguientes propiedades:**

Su **viscosidad** debe estar comprendida entre ciertos límites. Si el aceite es demasiado viscoso, la película de aceite próxima a la superficie del metal tiende a carbonizarse, porque las corrientes de convección son muy lentas. Esa carbonización disminuye el poder refrigerante del aceite y limita su utilización. Si la viscosidad es baja, el aceite se adhiere menos a las piezas pero se volatiliza rápidamente con la siguiente pérdida de líquido. Por tanto la viscosidad debe estar comprendida entre ciertos límites, que a la temperatura ambiente son de 5° a 9° Engler y a 50° son de 2° a 4° Engler.

La **volatilidad** no debe ser demasiado elevada porque se pierde aceite con el uso y se espesa el baño, con la consiguiente pérdida en la velocidad de enfriamiento. Además un aceite volátil, al ponerse en contacto con el metal caliente, desprende numerosas burbujas y se forma mucho vapor alrededor de las piezas, disminuyendo la velocidad de enfriamiento y



prolongándose la fase de enfriamiento con vapor, que suele dar lugar a la aparición de puntos blandos.

Las temperaturas de **inflamación y combustión** deben ser lo más elevadas posible, para evitar excesivo humo en el taller y también el peligro de que se inflame el baño. En los aceites corrientes la temperatura de inflamación suele oscilar entre 180° y 275° y la de combustión entre 200° y 325° considerándose las de 215° y 275° como satisfactorias.

Deben tener gran **resistencia a la oxidación**. En los últimos años las refinerías de petróleo han logrado producir aceites que, con relativa baja viscosidad, tienen gran resistencia a la oxidación.

**PLOMO.-** desde hace bastantes años se emplea este metal fundido para el temple las aplicaciones más generales son el temple de herramientas de aceros especiales y el temple de muelles.

Para el temple de piezas muy delicadas como instrumentos de cirugía etc. o para piezas de gran dureza, se empleaba algunas veces el mercurio pero su elevado peso específico y precio limitan sus aplicaciones por lo que en la actualidad casi no se emplea.

**REVENIDO.-** Es un tratamiento que se da a las piezas de acero que han sido previamente templadas. Con este tratamiento que consiste en un calentamiento a temperatura inferior a la crítica Ac1, se disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, quedando además el acero con la dureza o resistencia deseada.

Los aceros después del temple suelen quedar generalmente demasiados duros y frágiles para los usos a que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen por medio del revenido en donde se emplea un enfriamiento generalmente al aire y otras veces en aceite o agua según la composición. El fin del revenido no es eliminar los efectos del temple sino modificarlos, disminuyendo la dureza y resistencia, aumentando la tenacidad y eliminando también las tensiones internas que tienen siempre los aceros templados.

**Tratamientos isotérmicos de los aceros.-** reciben este nombre ciertos tratamientos, en los que el enfriamiento de las piezas no se hace de una forma regular y progresiva, sino que se interrumpe o modifica a diversas temperaturas durante ciertos intervalos, en los que permanece el material a temperatura constante durante un tiempo, que depende de la composición del acero, de la masa de las piezas y de los resultados que se quieren obtener.

**Austempering o transformación isotérmica de la austenita en la zona de 250°-600° .-** Este tratamiento consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y luego enfriarlo rápidamente en plomo o sales fundidas, a temperaturas comprendidas entre 250° y 600°, permaneciendo el acero en el baño a esta temperatura durante el tiempo suficiente para que se verifique la transformación completa de la austenita en otros constituyentes a temperatura constante.



**Martempering.-** Es un tratamiento que ha comenzado a desarrollarse también muy recientemente. Es un temple escalonado en el que el material caliente, a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, se enfría en un baño de sales, también caliente, a temperaturas comprendidas entre 200° y 400°, permaneciendo en él las piezas durante un tiempo que debe controlarse cuidadosamente y debe ser suficiente para que iguale la temperatura en toda la masa, antes de que en ninguna parte de ella se inicie la transformación de la austenita, y luego se enfría al aire. De esta forma se consigue que la transformación de toda la masa del acero se verifique casi al mismo tiempo, evitándose desiguales y peligrosas dilataciones que ocurren en los temples ordinarios, en los que las transformaciones de las distintas zonas del material ocurren en momentos diferentes.

**Recocidos isotérmicos.-** Son tratamientos de ablandamiento que consisten en calentar el acero por encima de la temperatura crítica superior o inferior según los casos ( generalmente de 740° a 880° ) y luego enfriar hasta una temperatura de 600° a 700°, que se mantiene constante durante varias horas, para conseguir la completa transformación isotérmica de la austenita y finalmente, se enfría al aire.

**Temple Superficial.-** Recientemente se ha desarrollado este procedimiento en el que se endurece únicamente la capa superficial de las piezas. El calentamiento se puede hacer por llama o por corrientes inducidas de alta frecuencia, pudiéndose regular en ambos casos perfectamente la profundidad del calentamiento y con ello la penetración de la dureza. Una vez conseguida la temperatura de temple, se enfría generalmente en agua. **Fig. 2.1**

## TRATAMIENTOS EN LOS QUE HAY CAMBIO DE COMPOSICIÓN

En esta clase de tratamientos, además de considerar el tiempo y la temperatura como factores fundamentales, hay que tener también en cuenta el medio o atmósfera que envuelve el metal durante el calentamiento y enfriamiento. Estos tratamientos se suelen utilizar para obtener piezas que deben tener gran dureza superficial para resistir el desgaste y buena tenacidad en el núcleo. Los tratamientos pertenecientes a este grupo son:

**Cementación.-** Por medio de este tratamiento se modifica la composición de las piezas, aumentando el contenido en carbono de la zona periférica, obteniéndose después, por medio de temples y revenidos, una gran dureza superficial.

La cementación que es el más antiguo de todos esos procedimientos de endurecimiento superficial, consiste en aumentar el contenido en carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeándolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Luego se temple las piezas y quedan con gran dureza superficial.

Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos y gaseosos, oscilando la duración de la cementación de 6 a 10 horas cuando se utilizan cementantes sólidos, de 1 a 6 horas, cuando se trata de sales o cementantes líquidos y de 1 hora a varios días utilizando cementantes gaseosos.

Se emplean aceros aleados y sin aleación, de bajo contenido en carbono generalmente de 0.08 a 0.25 % de C y excepcionalmente algunas veces se cementan también aceros hasta de 0.40 % de C.

La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850° y 1000° siendo las temperaturas próximas a 900° las más utilizadas.



**En el proceso de cementación se pueden distinguir dos etapas distintas:**

1ª absorción del carbono por el acero, y 2ª mejoramiento de características por medio de tratamientos térmicos adecuados.

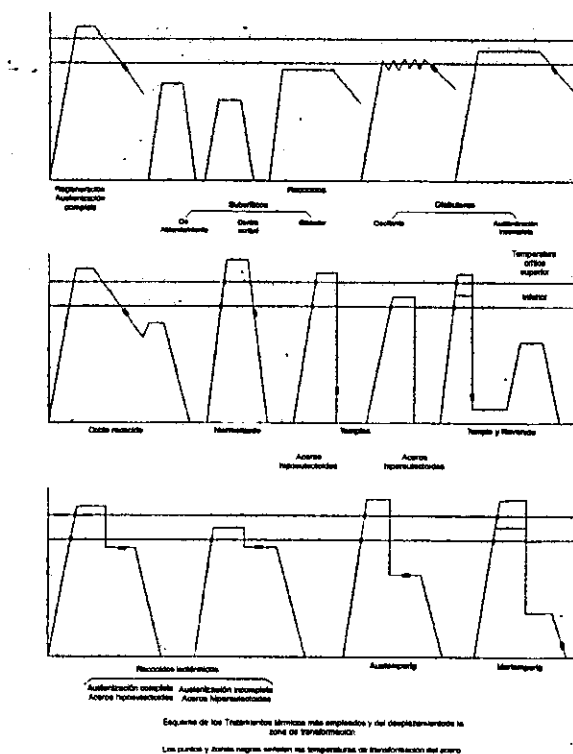
**La cantidad y distribución del carbono absorbido por las piezas depende:**

1ª De la composición del acero sometido a la cementación, 2ª De la naturaleza de la sustancia cementante, y 3ª De la temperatura y de la duración de la cementación.

**Cianuración.-** Es un tratamiento parecido a la cementación, en el que el acero absorbe carbono y nitrógeno en la zona superficial, quedando luego esa zona periférica muy dura después de un temple final.

**Sulfinitación.-** Es un tratamiento que se da a los aceros a 565° aproximadamente en baño de sales de composición especial y que mejora extraordinariamente la resistencia al desgaste. Esa mejora se consigue por la incorporación de azufre a la superficie de las piezas de acero sin que con ello se aumente mucho la dureza.

**Nitruración.-** Es un tratamiento de endurecimiento superficial a baja temperatura, en el que las piezas de acero templadas y revenidas al ser calentadas a 500° en contacto con una corriente de amoníaco, que se introduce en la caja de nitrurar, absorben nitrógeno, formándose en la capa periférica nitruros de gran dureza, quedando las piezas muy duras sin necesidad de ningún otro tratamiento posterior.



**Fig. 2.1 Esquema de Tratamientos Térmicos**



## 2.3 SELECCIÓN DE MATERIALES

En la actualidad se sigue trabajando bajo un plan que consiste en calidad y durabilidad y además de una buena habilidad del ingeniero responsable, también existe otro factor que tiene un papel importante.

Que es la experiencia cumulativa técnica, información en papeles técnicos, para informar a la compañía y procedimientos basados en investigación y comprobación del servicio simulado. En cuanto a filosofía del plan parece cierta ingeniería tan moderna reconoce la importancia de materiales y procesos, investigación y evaluaciones del simulado-servicio como un adjunto indispensable diseñar y desarrollo.

### COMPROMISO Y COSTO

La selección de materiales por cualquier aplicación específica es una serie de compromisos y cuenta mucho la experiencia.

Probablemente el compromiso más común es el costo del artículo y se incurren en los riesgos de fracaso prematuro. En esta condición el diseñador tiene una responsabilidad muy grande. Por lo que el ingeniero debe tener el conocimiento necesario para que realice decisiones adecuadas. Debe de existir confiabilidad del servicio bajo normas esto se logra mediante resultados adecuados de laboratorio y comprobación del servicio simulado

Una debilidad todavía existe en la correlación de una conducta de los materiales en una prueba con respecto a su conducta en servicio. Enterarse de exactamente cómo un material reaccionará en servicio real y verificar que el producto tiene la calidad necesaria que se requiere para que cumpla con su función.

**Fracaso.** Fracaso implicaría fractura real, deformación excesiva, uso inmoderado, o corrosión adversa en una parte. La parte más susceptible a tales fracasos establece la integridad del producto.

**Calidad.** La medida verdadera de calidad del producto es ejecución bajo condiciones de real-servicio, no bajo condiciones artificiales. Determinación directa de calidad normalmente destruye la estructura pero establece integridad. Uniformidad de calidad es una base de apreciación del consumidor. Sostuvo uniformidad se prefiere a perfección intermitente.

Calidad en componentes no es solamente una función de composición de los metales de los que se construyen. Más bien, calidad es propiamente un compromiso equilibrado entre materiales y procesos de la producción.

Cuando se realiza lo anterior se dice que el producto es de buena calidad íntegramente y valdría la pena de realizar el gasto necesario ya que se obtendrán buenos resultados con el producto.

### FACTORES DEL PLAN

Varios factores son específicamente considerados de importancia del plan en la selección de materiales y procesos. Se debe de tomar en cuenta las condiciones ambientales en curso al que el componente se sujeta durante su vida del servicio estructural. Dependiendo del servicio incluiría muchas influencias externas, tal como temperatura, carga (magnitud y tipo), atmósfera corrosiva, radiación, y uso. Además de ambiente, los dictados de una selección de la influencia del mercado competitiva de materiales y procesos industriales.



**Forma.** Probablemente la influencia más importante en la conducta de un material es la geometría de la parte (forma). Normalmente la forma es limitada por circunstancias atenuantes incluso por la función de la parte. El diseñador debe asociar la conducta de materiales con la forma geométrica del producto. Todos los materiales de la ingeniería poseen propensiones inherentes por carácter quebradizo así como por ductilidad por lo que es importante su forma estructural.

Otro aspecto importante en la selección de materiales es su tenacidad como sabemos la tensión se refiere a la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fallar por fractura.

Como se menciona en el capítulo de pruebas destructivas esta prueba consiste en estirar un material hasta su ruptura durante un período relativamente corto, es quizá el más útil de todas las pruebas empleadas en propiedades mecánicas. En ella la muestra se estira a una velocidad de deformación constante, midiéndose, como una variable dependiente, la carga necesaria para producir una elongación especificada.

Como resultados de la tensión se puede graficar una curva de carga contra elongación que generalmente se registran como valores de esfuerzo y deformación unitarios, y son independientes de la geometría de la muestra.

## FACTORES MEDIOAMBIENTALES

**Temperatura elevada.** Un factor mayor externo de ambiente que continuará aumentando en importancia con progreso de la ingeniería es el efecto de temperatura. En cierto sentido, progresó en muchos campos depende de cómo entendamos la conducta de materiales bajo tensión a temperaturas elevadas. Temperaturas elevadas introducen problemas adicionales y, debido a nuestra tendencia que es simplificar problemas complejos.

La necesidad por mayor eficacia y la acumulación de más experiencia nos llevan a realizar pruebas a temperaturas medioambientales y a altas temperaturas se buscan materiales de la temperatura que se requiere manejar y se aumenta mucho conocimiento en la conducta de materiales a temperaturas altas. En unos casos diseñadores evitan el uso de metales exóticos a temperaturas extremas para evitar ciertas reacciones que pudiera realizar el material designado.

La tendencia general en desarrollo de la aleación es mejorar, por modificación, los sistemas de la aleación ahora desarrollados y dirigir estas mejoras hacia un plan específico necesariamente. El diseñador, recíprocamente, reconoce la tontería del bruto igual a fuerza.

Se debe reconocer que deben cambiar ciertos criterios del plan donde intervengan temperaturas elevadas que son un factor importante, pero factores del proceso cambiarían también. Un juego nuevo de reglas debe por escrito procesar las aleaciones más fuertes. Se tiene la opción de poder otorgar con facilidad la forma final y adecuada de un material, en lugar de sus propiedades de la fuerza, desde una variedad ancha de materiales tiene propiedades forma satisfactoria el uso intencional pero posee diferentes forma y características.

Las aplicaciones adecuadas de los metales en proceso a altas temperaturas dependen de la apreciación de ciertos factores de ingeniería. Entre las propiedades más importantes están la resistencia al escurrimiento, la ruptura y la corta duración.





El escurrimiento relaciona el esfuerzo aplicado inicialmente al índice de flujo plástico.

La ruptura por esfuerzo es otra consideración importante a las temperaturas elevadas, puesto que relaciona el esfuerzo y el tiempo para producir roturas, las aleaciones ferríticas son más débiles que las composiciones austeníticas y, en los dos grupos, el molibdeno incrementa la resistencia. Las piezas vaciadas austeníticas son mucho más fuertes que sus equivalentes forjadas.

Para temperaturas muy por encima de 2000°F solo son apropiados los metales refractarios. Se han hecho muchos trabajos con estos metales en relación con los programas atómicos y de cohetes. Todos los materiales refractarios tienen puntos de fusión de más de 3000°F pero cada uno de ellos posee ventajas y desventajas diferentes.

## MATERIALES REFRACTARIOS

Los materiales refractarios no metálicos se utilizan mucho en aplicaciones a altas temperaturas, donde el servicio permite el tipo apropiado de construcción. Las clases más importantes son: Los ladrillos refractarios, los ladrillos de alto contenido de alúmina, los ladrillos de sílice, los ladrillos de magnesita, los ladrillos de cromo, los ladrillos refractarios aisladores entre otros.

**Corrosión.** Otro factor importante del medio ambiente, que continúa en aumentó. El diseñador debe tener en cuenta de que la corrosión es un problema muy grande y de tomar en cuenta de que debe de colocarse una protección al material para tratar de evitar la corrosión. Ya que cada atmósfera corrosiva representa un juego de condiciones que se deben considerar específicamente en cuanto a cada material. Ya que debe existir un cierto equilibrio en los componentes que van a tener contacto con el material a diseñar.

El medio ambiente progresivamente y a través de una acción lenta y acelerada de la naturaleza, química, electroquímica, mecánico-química, o aún biológica, deteriora, degrada y destruye los materiales transformados por el hombre para restituirlos a su forma original. Este fenómeno, al que se le da el nombre de corrosión, se manifiesta más evidentemente en los cuerpos sólidos como son los metales, las cerámicas, los polímeros artificiales, los agregados, y los fibrosos de origen natural.

El fenómeno de la corrosión de la materia sólida consiste básicamente en la pérdida del equilibrio de las fuerzas cohesivas. Estas fuerzas son de naturaleza eléctrica y la cohesión es el resultado del equilibrio de las fuerzas de atracción entre los núcleos atómicos positivos y los electrones con cargas negativas, con las fuerzas de repulsión de los electrones entre sí y de los atómicos entre sí.

La diferencia entre estas dos energías que es del orden de  $10^4$  la cuatro, explica el carácter metaestable y heterogéneo de los metales en los cuales basta con aplicar un pequeño incremento de energía para provocar una inestabilidad en su estructura cristalina.

Una forma más sencilla de definir la corrosión es: "aquel proceso de desintegración que se lleva a cabo en una pieza o una superficie metálica formando el conocido óxido, hollín o herrumbre, de color amarillo rojizo.

Normalmente este proceso se llama "OXIDACIÓN" La razón por la cual los metales, especialmente el fierro en el acero se corroe, es de que el fierro en el acero tiende a volver a su estado natural, así como existen en la naturaleza.



La **CORROSIÓN** es en sí misma el cáncer de los metales ferrosos y no ferrosos, la corrosión es un problema muy serio que debe de ser considerado con toda atención, amplitud, y dedicación debido a que ocasiona: DESTRUCCION DE EQUIPO, ALTO COSTO DE MANTENIMIENTO Y REPOSICION, CONTAMINACION DE PRODUCTOS, PERDIDAS DE PROPIEDADES MECANICAS, CONDICIONES INSEGURAS DE PERSONAL Y APARIENCIA INDESEABLES ETC.

## FACTORES DEL PROCESO

Uno de los factores más importantes en el proceso son indudablemente los tratamientos térmicos que se empleen en la obtención del producto o del acero, al momento de utilizar los tratamientos térmicos adecuados nos dará como resultado un acero con ciertas características que se requieren para tener un acero de alta calidad.

Como sabe un tratamiento térmico es una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, de tiempos determinados y aplicadas a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas.

De acuerdo al procedimiento usado, el acero puede hacerse tan duro que resista los efectos del corte y abrasión o puede ser tan suave que permita maquinado posterior. Con el tratamiento térmico adecuado, se pueden reducir esfuerzos internos, reducir el tamaño de grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil.

Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita.

La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero

El desarrollo de estas características en una aleación frecuentemente se hace a la extensión de fuerza óptima. Tratamiento térmico y función del servicio que se va a realizar verdaderamente. Se puede obtener una estructura que es fuerte y dura pero está susceptible a fractura frágil. Está inestable con respecto a tiempo debido a la naturaleza imprevisible de las tensiones del residuo. También está inestable con respecto a temperatura, decreciente en dureza y creciente en dureza con temperatura creciente. Se puede hacer el producto útil, sin embargo, esta inestabilidad del acero se puede evitar a través de un tratamiento térmico ( temple). Templar acero después de un tratamiento deja una redistribución de carburos y un alivio de tensiones residuales.

## FUENTES DE INFORMACION EN PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Lo más práctico es que los ingenieros consulten archivos de literatura del comercio, artículos técnicos, e informes de compañías. Datos que comprendan las estructuras térmicas del material, químicas, físicas etc.

Además, muchas corporaciones grandes y agencias gubernamentales desarrollan su propio archivo de datos en propiedades de los materiales.

El propósito de esta sección es proporcionar una guía a datos de las propiedades de los materiales que están disponibles a través de literatura técnica. Hay varios métodos que se pueden consultar datos de la propiedad en manuales y otras fuentes de información. Normalmente se da un valor solo por una propiedad, y se debe asumir que el valor es típico. Cuando existe variabilidad de resultados es considerable, se indica el hecho en un rango de valores, (los valores más grandes y más pequeños) y se muestran en una gráfica. Sin



embargo, es raro encontrar valores establecidos ya que se pueden obtener valores malos por ciertos errores que se puedan cometer y provocaría una desviación de la información que se requiere conocer. Se debe de realizar para obtener confiabilidad en el material que se esta seleccionando y para poder calcular la conducta que se llevará acabo durante el servicio.

Para poder seleccionar el material adecuado nos debemos guiar a través de las diferentes normas de control de calidad existentes de fabricación y de servicio poder escoger el material con mayor confiabilidad.

Esto se hace con el fin de poder evitar el fracaso prematuro del producto y realizar el gasto que se requiere con la suficiente confianza de que el material nos va a responder satisfactoriamente durante el servicio.

## ECONOMÍA DE LOS MATERIALES

El costo es un factor primordial en la selección de ciertos materiales, necesitamos darle atención adicional a este factor. El costo básico de un material depende en (1) escasez, como determinado material no tiene mucha demanda por lo cual su costo es elevado, (2) el costo y la cantidad de energía requerida para procesar el material, y (3) el suministro básico y demanda por el material. En general, a materiales a grandes dimensiones.

Cuando a cualquier articulo se le invierte mucho más trabajo en su proceso el costo aumenta es decir que juega un papel importante la oferta- demanda.

Sin embargo, la estructura del precio de muchos materiales de la ingeniería es bastante compleja, y se pueden obtener sólo citas de vendedores con precios verdaderamente accesibles y con la calidad que se requiere. El precio real depende de las características y condiciones que se desean del material, es decir la situación real varía de material a material.

**Se evalúan extras del precio por las situaciones siguientes:**

### **Requisitos Metalúrgicos:**

- **Calidad extra.** De acuerdo a las normas de calidad que se utilicen
- **Química extra.** Composición química no-standard por la calidad de acero.
- **Inspección y comprobación.** Se constituye un cargo de pruebas rutinarias y análisis químico.

### **Características técnicas especiales:**

- Dimensiones: Tamaño y forma.
- Formas especiales, o tamaños.
- Longitud. Requisitos de longitud precisos son costosos.
- Cortante. Tipo de corte que se requiera.
- Tolerancias. Tolerancias de espesor, longitud etc.
- Proceso:
- Tratamiento térmico que se requiera para una buena calidad
- Tratamiento de la superficie etc.



- Cantidad: Que es desea obtener del material
- Carga: Cantidad de peso que se desea que soporte el material o producto.
- Transportación del producto.

### **Dimensiones métricas:**

Productores de los Estados Unidos de acero todavía utilizan el sistema ingles, pero la mayor parte del mundo es ahora en el sistema métrico (SI unidades). Así, habría una extra producir a tolerancias métricas.

De éste detalló inscripción de extras del precio que podemos ver cómo decisiones inadvertidas del diseñador pueden influenciarle significativamente a costo. Se deben usar composiciones normales químicas cuando sea posible.

## **MÉTODOS DE LA EVALUACION POR SELECCION DE LOS MATERIALES**

No existe un buen desarrollo de metodología por selección de los materiales. En parte, ése está debido a la complejidad de las comparaciones y comercio-offs se debe hacer ese. A menudo no se pueden poner en términos comparables así una decisión clara las propiedades que comparamos se puede hacer. En parte está debido al hecho esa investigación pequeña y se ha consagrado esfuerzo erudito al problema.

**Los métodos usados en selección de los materiales se puede clasificar como sigue:**

- 1. Costo vs índice de ejecución**
- 2. Índices de las propiedades del material**
- 3. Análisis del Valor obtenido al adquirir el material**
- 4. Análisis del Fracaso**
- 5. Análisis del costo- beneficio**
- 6. Vida de trabajo útil**
- 7. Funcionamiento y Mantenimiento**
- 8. Peso y volumen de Materiales alternativos**

## **2.4 PRUEBAS MECÁNICAS (DESTRUCTIVAS)**

Las propiedades mecánicas son aquellas propiedades de un material que asociadas a la reacción elástica e inelástica que presenta el material al someterlo a la acción de una fuerza, o que suponen la relación entre esfuerzo y deformación.

Las diversas pruebas mecánicas se utilizan para determinar cómo se comporta un material al aplicarle un cierto tipo de carga. Los resultados de estas pruebas constituyen las propiedades mecánicas del material. Por tanto, las pruebas mecánicas sirven para la determinación de las propiedades mecánicas. Por tanto, las pruebas mecánicas se realizan para la determinación de las propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas determinan cómo responde el material al aplicársele una fuerza, es decir, son la respuesta mecánica de un material a las fuerzas aplicadas. Las



propiedades mecánicas más comunes son la resistencia mecánica, ductilidad y la rigidez del material, aunque también interesa saber cómo se comporta el material cuando se expone a un choque repentino o intenso (impacto), a esfuerzos repetidos cíclicamente en un período dado (fatiga), a temperaturas elevadas (termofluencia), o cuando se somete a acciones abrasivas (desgaste). Las propiedades mecánicas no sólo determinan el comportamiento del material en operación, sino que influyen en la facilidad con que puede ser conformado en un producto de servicio.

En su mayor parte, las propiedades mecánicas serán aquellas que se obtienen experimentalmente por medio de una prueba de tensión.

**Por tanto, la finalidad de determinar el conjunto de propiedades mecánicas es servir al ingeniero para:**

- 1. Predecir el comportamiento del material durante su fabricación,**
- 2. Predecir el comportamiento de los componentes fabricados con cierto material en condiciones reales de servicio,**
- 3. Comparar un material con otros, en el aspecto de diseño, fabricación y servicio.**

Los efectos de temperatura, rapidez de carga e historial de carga influyen significativamente en el comportamiento de un material.

Por otra parte, las pruebas de los materiales se aplican tanto a muestras como a especímenes de prueba o probetas, considerándose lo siguiente:

**Muestra:** es la porción de material tomada de un producto, en cantidad suficiente para obtener una o varias probetas; en determinados casos, la muestra puede ser el mismo producto.

**Probeta (o espécimen de prueba):** es la sección de la muestra, maquinada o no, con las dimensiones o características adecuadas para someterla a una prueba determinada; en ciertos casos, la probeta puede estar constituida por la misma muestra.

La identificación de las muestras o especímenes es requerimiento en toda prueba y deben marcarse de tal manera que pueda identificarse el producto o lote del que han sido tomados, así como, si fuera preciso, su localización y orientación.

## PRUEBAS DE DUREZA

La dureza no es una propiedad fundamental de un material, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. La dureza es el resultado de una combinación de diversas propiedades de un material y no se puede considerar propiedad básica. Por tanto, los números de dureza obtenidos con las pruebas dependen de muchas de las propiedades del material y de las condiciones en que se efectúa la prueba. Ninguna de las pruebas de dureza conocidas en la actualidad, puede separar la dureza de un material de otras propiedades tales como la elasticidad, ductilidad, fragilidad o tenacidad. El valor obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos térmicos. Los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades tales como la resistencia a la tensión. Las pruebas de dureza se utilizan para inspección y control. Los



tratamientos térmicos o el trabajado en frío de un metal pueden generar un cambio de dureza. Cuando se establece el valor de dureza de un tratamiento térmico a un material dado por un proceso determinado, esta estimación proporciona un método de inspección y control simple y rápido para el material y proceso particulares.

**Los diversos tipos de prueba se pueden clasificar como:**

- 1. Pruebas de Dureza por resistencia al corte, rayado o abrasión (esclerométricas)**
  - a. Prueba de Rayadura**
  - b. Prueba de Lima**
- 2. Pruebas de Dureza por rebote (escleroscópica)**
- 3. Pruebas de Dureza por resistencia a la indentación o Penetración.**

#### **PRUEBAS DE DUREZA POR RESISTENCIA AL CORTE O ABRASIÓN**

Este tipo de pruebas se basan en el concepto de que un material duro rayará a uno más blando al empujarlo contra la superficie. Estas pruebas incluyen la prueba de rayadura y la de lima.

#### **PRUEBA DE RAYADURA**

Esta prueba no se utiliza mucho en metalurgia, pero se emplea aún en mineralogía. Se utiliza la escala de Mohs de diez minerales estándar arreglados siguiendo un orden de incremento de dureza. El orden progresivo es 1 talco, 2 yeso, ..., 9 corindón y 10 diamante. Si un material desconocido es rayado en forma apreciable por uno y no por el inmediatamente anterior a éste último, el valor de dureza del material a prueba estará entre esos dos valores de dureza correspondientes a cada mineral de prueba. La principal desventaja es que la escala de dureza no es uniforme, ya que cuando se examina la dureza de los minerales por otro método de prueba, se encuentra que los valores están muy cercanos entre 1 y 9 y que hay gran diferencia en dureza no cubiertas entre 9 y 10.

#### **PRUEBA DE LIMA**

En esta prueba la pieza a prueba se somete a la acción abrasiva de una lima de dureza conocida, para determinar si se produce un corte o desgaste notorio. Las pruebas comparativas con una lima dependen de la forma, tamaño y dureza de la lima; de la presión, velocidad y ángulo de limado durante la prueba; y del tratamiento y composición del material a prueba. La prueba generalmente se emplea en la industria como objeto para el rechazo o aceptación de una pieza tratada térmicamente para determinar si el tratamiento ha sido satisfactorio.

Cuando el acero se trata térmicamente, sobre todo los aceros para herramienta, será suficientemente duro, tal que si se pasa una lima por la superficie ésta no se rayará. No es raro encontrar especificaciones en la industria que indiquen tratamiento térmico hasta que el material tenga dureza a prueba de lima.



## PRUEBAS DE DUREZA POR REBOTE (ESCLEROSCÓPICA)

Este tipo de dureza se mide mediante un escleroscópico Shore, que es un dispositivo para medir la dureza de un material por el rebote de un pequeño cilindro (martillo) metálico que gravita después de haber producido una ligera deformación en la superficie que se desea medir. La altura de caída del cilindro es de unos 250 mm y su peso es de 2.5 gr, con un diamante puntiagudo en su base. El instrumento tiene por lo general un disco auto indicador en el que la altura de rebote se registra. Cuando el cilindro es elevado a su posición de prueba, tiene cierta energía potencia; cuando es liberado, esta energía se convierte en energía cinética hasta que golpea la superficie de la pieza a prueba; algo de energía es absorbida al formar la impresión, y el resto regresa al cilindro al rebotar éste. La altura de rebote se indica por un número sobre una escala arbitraria tal que cuanto mayor sea el rebote mayor será el número y por tanto la pieza será más dura.

La escala del aparato es puramente arbitraria y se calibra considerando las durezas de varios materiales. El escleroscopio aún se emplea para regular la producción, pero la dificultad de interpretar sus resultados no aconseja su uso en investigaciones. Esta prueba es realmente una medida en cierto manera de la resistencia elástica o tenacidad del material, o sea, la energía que puede absorber en el intervalo elástico.

## PRUEBAS DE DUREZA POR RESISTENCIA A LA INDENTACIÓN O PENETRACIÓN.

Estas pruebas se realizan por la impresión en la muestra, que se encuentra fija sobre una base rígida, de un marcador o indentador con geometría específica, bajo una carga estática conocida que se aplica directamente o por medio de un sistema de palanca. Estas pruebas son las más comunes en la industria y se basa en medir la resistencia a la penetración. Dependiendo del sistema de prueba, la dureza se expresa por un número que es inversamente proporcional a la profundidad de la penetración para una carga y penetrador especificados, o proporcional a una carga media sobre el área de impresión. Lo anterior significa que un número de dureza indica carga aplicada por unidad de área de impresión. Los diversos tipos de probadores de dureza o comúnmente llamados durómetros y los métodos comunes para pruebas de dureza se explican a continuación.

### Prueba de Dureza Brinell

El probador de dureza o durómetro Brinell generalmente consta de una prensa hidráulica vertical de operación manual, diseñada para forzar la penetración de un indentador sobre la pieza de prueba.

El procedimiento estandarizado indica que la prueba se realice con indentador esférico o de bola, de acero endurecido o de carburo de tungsteno, de 10 mm de diámetro bajo la aplicación de una carga de 3000 kg por lo menos durante 10 seg para metales ferrosos y de 500 kg durante 30 seg para metales no ferrosos; a veces se utiliza un indentador de bola de 5 mm para materiales delgados. El diámetro de la impresión producida es medido por medio de un microscopio que tiene una escala ocular, generalmente graduada en décimas de milímetro, permitiendo estimaciones de hasta casi 0.05 mm.

El número de dureza Brinell (HB) es la razón de la carga en Kg al área de la impresión en  $\text{mm}^2$  y se calcula por medio de la fórmula:



$$HB = \frac{L}{(\pi D / 2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

**Donde  $L$  es la carga de prueba aplicada en Kg,  $D$  es el diámetro del indentador de bola en mm y  $d$  es el diámetro de la impresión en el material en mm.**

El número de dureza no necesariamente debe ser calculado, ya que existen tablas estandarizadas en las cuales se indica para cada diámetro de impresión medido un determinado número de dureza Brinell.

Los números de dureza Brinell dependen de la carga aplicada, el tiempo de aplicación de la carga y el tamaño del indentador.

El número de dureza Brinell seguido por el símbolo HB sin números sufijos indica condiciones de prueba estándar usando indentador de bola de 10 mm de diámetro y una carga de aplicada de 3000 kg de 10 a 15 seg. Para otras condiciones, el número de dureza y el símbolo HB se complementan por números que indican las condiciones de prueba en el siguiente orden: diámetro del indentador de bola, carga y duración de la carga.

El número de dureza Brinell cuando se usa el indentador de bola ordinario está limitado de 16 a 500 HB aproximadamente. Conforme el material a prueba sea más duro, existe la tendencia de que el indentador se empiece a deformar y las lecturas no serán exactas. El límite superior de la escala puede aumentarse al usar un indentador de bola de carburo de tungsteno en vez de uno de acero endurecido. En este caso es posible llegar a 650 HB aproximadamente. Ahora, cuanto menor es el número de dureza más blando es el material.

## **Prueba de Dureza Rockwell**

En este tipo de prueba se utiliza un instrumento de lectura directa basado en el principio de medición de profundidad diferencial. La prueba se lleva a cabo al elevar a muestra lentamente contra el indentador hasta que se halla aplicado una determinada carga menor. El empleo de la carga menor permite buen contacto del indentador con la muestra, lo cual elimina errores en las lecturas ocasionados por imperfecciones de la superficie.

Esto se indica en el disco medidor o indicador de carátula de probador. Luego se aplica la carga mayor a través de un sistema de palanca de carga. Después de que la aguja del disco llega al reposo, se quita la carga mayor y, con la carga menor todavía en acción, el número de dureza Rockwell es leído directamente en el disco medidor. Además, se tiene lectura directa de la dureza en el cuadrante, lo cual elimina los posibles errores en la medición, pero requiere procedimientos correctos para la prueba y calibración constante. Como el orden de los números se invierte en el disco medidor, una impresión poco profunda en un material duro dará un número grande de dureza en tanto que una impresión profunda en un material blando dará un número de dureza pequeño.

Hay dos tipos básicos de probadores de dureza o durómetros Rockwell: el durómetro estándar para secciones relativamente gruesas y el durómetro superficial para materiales con secciones delgadas; existen también durómetros universales para medir dureza normal y superficial. Los durómetros pueden ser de accionamiento manual o automático. La carga menor es de 10 kg en el durómetro normal y de 3 kg en el durómetro superficial.

Se puede utilizar diversos indentadores y cargas y cada combinación determina una escala Rockwell específica. Los indentadores pueden ser de bolas de acero endurecido de





1/16", 1/8", 1/4", 1/2" de diámetro y un indentador cónico de diamante (brale) de 120° .

Las cargas mayores generalmente son de 60, 100 y 150 kg en el durómetro normal y de 15, 30 y 45 kg en el durómetro superficial.

Las escalas Rockwell más empleadas son la B (indentador de bola de 1/16" y 100 kg de carga mayor) y la C (indentador de diamante y 150 kg de carga mayor), ambas obtenidas con el durómetro normal. Debido a las muchas escalas Rockwell, el número de dureza debe especificarse mediante el símbolo HR seguido de la letra que designa la escala y precedido de los números de dureza.

El funcionamiento de la máquina debe ser verificado frecuentemente mediante bloques de prueba estándar proporcionados por el fabricante. Al hacer una prueba de dureza, se recomienda tomar y promediar por lo menos tres lecturas, para mayor exactitud en los resultados; antes de hacer la prueba se debe verificar la máquina probadora con los bloques patrón que se surten con la máquina o con materiales de dureza conocida.

La palanca de operación debe regresarse suavemente a su posición inicial, ya que al golpear la palanca para quitar la carga mayor puede producir un error de varios puntos en el disco de indicación. Se debe tener cuidado de asentar firmemente el yunque de la máquina y el indentador. Cualquier movimiento vertical en estos puntos resulta en un registro de una profundidad adicional en el medidor y por tanto en una lectura de dureza errónea.

### **Prueba de Dureza Vickers**

En esta prueba, el instrumento utiliza un indentador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluso de 136° entre las caras opuestas. El intervalo de carga es de 1 g a 120 kg; la carga se aplica durante 10, 15, 20 seg y se libera en forma automática. El probador de dureza Vickers funciona bajo el mismo principio de que el probador Brinell, y los números se expresan en términos de carga y área de la impresión. Como resultado de la forma del indentador, la impresión sobre la superficie de la muestra será un cuadrado. La longitud de la diagonal del cuadrado es medida óptica que se hace por medio de un microscopio equipado con un micrómetro ocular que contiene filis móviles. La distancia entre los filis se indica en un contador calibrado en milésimas de milímetro. Existen tablas para obtener el número de dureza Vickers (HV) por medio de la diagonal medida, alternativamente este número de dureza se puede obtener por medio de la fórmula:

$$HV = 1.854 L / d^2$$

***Donde L es la carga aplicada en kg. y d la longitud de la diagonal del cuadrado de la impresión en mm.***

Como resultado de la latitud en las cargas aplicadas, el probador Vickers es útil para medir la dureza de hojas muy delgadas, así como secciones gruesas. Es sensible y se considera como prueba de superficies.

### **Prueba de Microdureza**

Esta prueba implica el uso de impresiones pequeñas. Las cargas de prueba son entre 1 y 1000 g. Hay dos tipos de indentadores empleados: el piramidal de diamante Vickers de base cuadrada de 136°, descrito anteriormente, y el indentador Knoop de diamante alargado.

El indentador Knoop tiene forma piramidal que produce una impresión en forma de diamante (romboidal) y tiene diagonales largas y cortas a una razón aproximada de 7:1. La forma piramidal empleada tiene incluidos ángulos longitudinales de 172°30' y ángulos



transversales de 130°. La profundidad de impresión es de aproximadamente 1/30 de su longitud. Como en la prueba Vickers, la diagonal más larga de la impresión es medida ópticamente con el ocular de un micrómetro de rosca. El número de dureza Knoop es el resultado de la carga por unidad de área de impresión. Por lo general se utilizan tablas para obtener el valor de dureza Knoop (HK) correspondiente a una determinada longitud diagonal medida, alternativamente se puede obtener este número por la siguiente fórmula:

$$HK = 14.229 L / d^2$$

**Donde L es la carga aplicada en kg, y d es la longitud de la diagonal mayor en mm.**

## PRUEBAS DE IMPACTO

Aunque la tenacidad de un material puede obtenerse calculando el área bajo la curva del diagrama esfuerzo-deformación, la prueba de impacto indicará la tenacidad relativa. La prueba de impacto da valores de la tenacidad pero en general los resultados se relacionan con la resistencia al choque de un material con entalladura o muesca, es decir, su aptitud para distribuir las concentraciones de esfuerzo en un punto dado. La entalladura o muesca actúa como un concentrador de esfuerzos, y si el material distribuye los esfuerzos allí concentrados, el valor para el choque es grande.

La prueba de impacto determina la absorción de energía en la ruptura de los materiales. La prueba consiste en aplicar rápidamente un golpe a una probeta con entalladura, con una masa en movimiento, con la suficiente energía cinética para romper o deformar la barra; los resultados se expresan usualmente en función de la energía absorbida por unidad de área de la sección transversal, que se mide por la pérdida de energía cinética de la masa en movimiento, pero no es una prueba del comportamiento al choque. Para las acciones mecánicas muy rápidas, la prueba de impacto utiliza la inercia, y todas las formas de la prueba dependen de la oscilación pendular.

Para la prueba de impacto se utilizan dos tipos de máquinas: la Charpy y la Izod, aunque existen máquinas universales, que hacen uso del principio anterior, si bien se diferencian en la forma de la entalladura en la probeta y la manera de sujetar ésta y de golpearla.

Para las pruebas de impacto se utilizan probetas o muestras con un cierto tipo de muesca. La ASTM ha estandarizado dos tipos de muesca de tipo general que se utilizan en pruebas de flexión por impacto las cuales son: la muesca ojo de cerradura y la muesca en V. Asimismo se utilizan dos tipos de probetas: la Charpy y la Izod.

La probeta tipo Charpy se monta en la máquina de manera semejante a una viga sencilla apoyada en ambos extremos, en tanto que la probeta Izod se coloca en la máquina en posición vertical por su extremo más largo de modo que el extremo corto quede libre y sea por tanto como una viga en voladizo.

La máquina de impacto ordinaria tiene un péndulo oscilante de peso fijo, que es elevado a una altura estándar, dependiendo del tipo de muestra que se pretende probar. A esa altura, con referencia a la parte de donde se monta la probeta, el péndulo tiene una cantidad definida de energía potencial. Cuando el péndulo se libera, esta energía se convierte en energía cinética hasta que golpea a la probeta. La probeta tipo Charpy se golpeará atrás de la muesca en V, en tanto que la probeta tipo Izod, colocada con la muesca en V de cara al péndulo, se golpeará arriba de la muesca en V. En cualquier caso, una parte de la energía del péndulo se utilizará para romper la probeta, provocando que el péndulo se



eleve en el lado opuesto de la máquina a una altura menor que aquella con que se inició su movimiento, desde ese mismo lado de la máquina. El peso del péndulo, multiplicado por la diferencia de alturas indicará la energía absorbida por la probeta, en Lb-ft o en J, o sea, la resistencia al impacto de la probeta con muesca.

De la descripción de la prueba, es obvio que la prueba de impacto a la cual se sujetó la probeta no da la tenacidad verdadera, sino su comportamiento en función de una muesca en particular; sin embargo, los resultados son útiles para propósitos de comparación. Esta prueba se ha utilizado en la industria para garantizar un servicio satisfactorio de las piezas que pueden experimentar cargas por choque o impacto.

La prueba Charpy se adapta bien para determinar los efectos de la temperatura, particularmente por debajo de los 0°C.

## PRUEBA DE TENSIÓN (O DE TRACCIÓN)

### DESCRIPCION

La prueba de tensión es, entre las pruebas mecánicas, la más comúnmente usada para evaluar ciertas propiedades mecánicas de los materiales, a fin de determinar su comportamiento en condiciones de esfuerzo y deformación. Su principal uso es la determinación de propiedades referentes al diseño elástico de elementos de máquinas y estructuras. Además, las pruebas de tensión proporcionan información sobre la resistencia mecánica, rigidez, ductilidad, plasticidad y fractura de materiales bajo esfuerzos de tensión uniaxiales. Esta información puede ser útil en: comparaciones de materiales, desarrollo de aleaciones, control de calidad, y diseño bajo ciertas circunstancias.

Para estas pruebas, el estado de esfuerzo está bien establecido y dicha prueba está estandarizada. Pero es importante considerar que los resultados de las pruebas de tensión de especímenes preparados dimensionalmente de forma estandarizada de porciones seleccionadas de un componente o material no pueden representar totalmente las propiedades de resistencia y ductilidad del producto terminado íntegro o de su comportamiento en servicio en distintos ambientes.

La prueba de tensión, además de proporcionar datos para los proyectos de ingeniería, se emplea extensamente como prueba puramente empírica para evaluar la conveniencia de los materiales para particulares aplicaciones mecánicas.

La prueba de tensión consiste en someter una probeta, maquinada específicamente o de sección completa, a un esfuerzo de tensión creciente, aplicado axialmente, hasta causarle la fractura o ruptura.

Existen normas y estándares para los procedimientos de prueba y para la preparación de diferentes especímenes, y hay muchas variantes de esta prueba especificadas para abarcar las características tan diferentes de los diversos materiales, tales como metales, elastómeros, plásticos, etc.

En general, los métodos estandarizados de prueba establecen que el espécimen de prueba (probeta) preparado dimensionalmente bajo especificación y con dos marcas de calibración que denotan la longitud calibrada original especificada, se monte en dispositivos de sujeción (mordazas mecánicas) de la máquina de prueba y se someta a carga axial de tensión a velocidad constante por medio de un sistema de carga mecánico, hidráulico o



neumático de la máquina, hasta que dicha probeta se fracture o rompa.

A lo largo de la prueba se realizan registros de carga aplicada al espécimen y de la elongación (alargamiento), entre las marcas de calibración, correspondiente a la carga aplicada.

La carga aplicada a la probeta puede ser registrada por la máquina de prueba, mientras que el alargamiento o elongación de la probeta, entre las marcas de calibración, correspondiente a la carga aplicada se puede obtener a partir de una señal procedente de un tipo de extensómetro acoplado a la probeta y registrada en la máquina o se pueden utilizar alternativamente extensómetros de carátula para mediciones directas. Por tanto, las mediciones simultáneas de carga aplicada y de alargamiento se registran ya sea en forma manual o en forma automática por la máquina.

Los resultados inmediatos de esta prueba se utilizan para la obtención de una curva carga-elongación, pero se obtiene un planteamiento más general acerca de las características del material al obtener una curva esfuerzo-deformación. Por tanto, al concluir la prueba o durante ella, los resultados se llevan a una gráfica llamada diagrama esfuerzo-deformación, ya sea en forma manual, o automática con dispositivos de autograficación adaptados a la máquina de prueba.

El estado de esfuerzo y deformación para esta prueba es uniaxial, donde se considera esfuerzo normal y deformación lineal. Los esfuerzos ( $\sigma$ ) serán calculados en base a las dimensiones originales de la probeta, es decir, la carga aplicada por unidad de área original, expresado en Psi, Mpa, Kgf/mm<sup>2</sup>, etc. Las deformaciones ( $\epsilon$ ) serán calculadas como el cambio (aumento) en la longitud calibrada por unidad de longitud calibrada original, expresado en in/in, mm/mm, o en porcentaje. Por tanto se tiene:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$
$$\epsilon = \frac{L_i - L_o}{L_o} = \frac{\Delta L}{L_o}$$

**Donde:**

***P = carga aplicada***

***A<sub>0</sub> = Area original de la sección transversal de la probeta***

***L<sub>o</sub> = Longitud calibrada original***

***L<sub>i</sub> = Longitud calibrada instantánea (al momento de la observación)***

**Nota:** La sección transversal de la probeta se refiere a la región cerca del centro de su longitud. En este apartado, original se refiere a dimensiones o forma de la sección transversal de la probeta al inicio de la prueba.

La deformación en un punto es definida por seis componentes de deformación: 3 componentes lineales y 3 componentes cortantes, referidas a un conjunto de ejes coordenados.

En las pruebas de tensión o en las de compresión es acostumbrado medir sólo una componente de deformación y referirse a ésta como la deformación, ésta es usualmente la componente axial.

Algunas veces se hace referencia a los valores de esfuerzo y deformación en la prueba de tensión como unitarios, denotando condiciones uniaxiales de esfuerzo y deformación.



Alternativamente, en ocasiones el alargamiento o elongación se indica como deformación total,  $e$ .

El diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  representa la relación entre el esfuerzo y la deformación en un material dado, y es una característica importante del material. En la graficación, los valores de esfuerzo son tomados como ordenadas y los valores de deformación como abscisas.

## Máquinas de Prueba

Se encuentran disponibles máquinas para pruebas de tensión con sistemas de carga, ya sea mecánico (de potencia por tornillo), hidráulico o neumático. Estos sistemas de carga difieren principalmente en la variabilidad de la rapidez de aplicación de carga.

Las máquinas modernas de potencia por tornillo están limitadas a un pequeño número de velocidades fijadas de la carrera libre del cabezal. Algunas máquinas de potencia por tornillo, y todas las máquinas hidráulicas, permiten variación en incrementos en todo el rango de velocidades.

Las máquinas de tensión deben ser mantenidas en condiciones de operación adecuada, usadas solamente en el rango de carga apropiado, y calibradas periódicamente de acuerdo a procedimientos estandarizados.

Muchas máquinas están equipadas con dispositivos para registro automático de datos continuos de carga y elongación durante la prueba para la obtención esfuerzos y deformaciones para trazo autográfico de diagramas  $\sigma$ - $\epsilon$ . Estos registradores disponen de un indicador de carga y de elongación en la probeta. La elongación entre las marcas de calibración correspondiente a la carga aplicada se registra a partir de una señal procedente de un tipo de extensómetro acoplado a la probeta y registrada en la máquina. Alternativamente se pueden usar extensómetros de carátula o usar escalas de deformación para el registro manual de la elongación experimentada entre las marcas de calibración.

También se encuentran disponibles máquinas universales de pruebas mecánicas que se emplean para pruebas de tensión, compresión, flexión, fatiga, etc. En general las máquinas de prueba modernas cuentan con sistemas por computadora en donde se dispone de programas en los cuales a partir del ingreso de ciertos parámetros de entrada requeridos se puede obtener la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  y sus puntos críticos, además de tabulaciones de datos de prueba y resultados seleccionados.

Muchas máquinas también están equipadas con dispositivos para la indicación, medición y control de la velocidad de prueba.

## Dispositivos de Sujeción

Son empleados como dispositivos de sujeción mordazas mecánicas de la máquina de prueba cuya función es transmitir la carga aplicada de los cabezales de la máquina a la probeta. El requerimiento esencial para estos dispositivos es que la carga sea transmitida axialmente, esto implica que la línea de centros de acción de las mordazas está alineado con el eje longitudinal de la probeta al inicio y durante la prueba, y que la torcedura sea mantenida al mínimo; y así asegurar un esfuerzo axial de tensión dentro de la longitud calibrada. De otra manera, pueden inducirse esfuerzos que no son considerados en el cálculo del esfuerzo en esta prueba y con ello los resultados pueden incrementarse y ser erróneos para este caso.



**Las máquinas de prueba están equipadas con varios tipos de mordazas mecánicas, como son:**

**Mordazas de cuña**, que son las más comúnmente usadas para probetas largas de metal dúctil y probetas planas y redondas, con extremos lisos. Son de auto ajuste tipo cuña. Para probetas cortas y de muchos materiales es necesario maquinarse probetas con extremos especiales, y usar cierto tipo de mordazas para asegurar una distribución uniforme de carga de tensión uniaxial, tales como:

- Mordazas para probetas de extremos roscado, para probetas de extremos rebordeados, y para materiales frágiles.
- Mordazas para materiales en lámina, las cuales son de autoajuste óptimas para materiales tipo lámina que no pueden ser probados satisfactoriamente con las mordazas tipo cuña.
- Mordazas para alambre, las cuales son también de ajuste tipo cuña o tipo de tambor.
- Mordazas de usos especiales, para pruebas de elastómeros, fibras, telas, y formas tales como cables, tubos, entre otros.

Alternativamente existen dispositivos de sujeción con presión regulada como los son las mordazas de acción hidráulica o neumática, las cuales aseguran la probeta con presiones ajustables y proveen un antideslizamiento adecuado a materiales duros y suaves.

### **Dispositivos para medición dimensional**

- Micrómetros, calibradores y otros dispositivos son usados para medición de dimensiones lineales.
- Extensómetros, los cuales son dispositivos para medir la deformación lineal, que puede ser de tipo lectura independiente o de tipo lectura no independiente que requieren dispositivos auxiliares para lectura de valores de deformación.

## **2.5 PRUEBAS MECÁNICAS (NO DESTRUCTIVAS)**

Una prueba no destructiva es el examen de un objeto efectuado en cualquier forma que no impida su utilidad futura. Aunque en la mayoría de los casos, las pruebas no destructivas no dan una medición directa de las propiedades mecánicas, son muy valiosas para localizar defectos en los materiales que podrían afectar el funcionamiento de una pieza de una máquina cuando entra en servicio. Dicha prueba se emplea para detectar materiales defectuosos antes de que las partes (componentes) sean formadas o maquinadas; para detectar componentes defectuosas antes de ensamblar; para medir el espesor de un metal u otros materiales, para determinar el nivel de líquido o el contenido de sólido o el contenido de sólido en recipientes opacos; para identificar y clasificar materiales; y para descubrir defectos que pudieran desarrollarse durante el procedimiento o el uso. Las partes también pueden examinarse cuando están en servicio, lo que permitirá su remoción previa a la ocurrencia de una falla



### Hay cinco elementos básicos en cualquier prueba no destructiva:

1. **Fuente.-** Una fuente que proporciona un medio de sondeo, es decir, algo que puede usarse con el fin de obtener información del artículo bajo prueba.
2. **Modificación.-** Este medio de sondeo debe cambiar o ser modificado como resultado de las variaciones o discontinuidades dentro del objeto sometido a la prueba.
3. **Detección.-** Un detector que puede determinar los cambios en el medio de sondeo.
4. **Indicación.-** Una forma de indicar o registrar las señales del detector.
5. **Interpretación.-** Un método de interpretar estas indicaciones.

### Los métodos de pruebas o inspecciones no destructivas más comunes son:

- Radiografía.
- Inspección por partículas magnéticas.
- Inspección por penetración fluorescente.
- Inspección ultrasónica.

## RADIOGRAFIA DE METALES

La radiografía de metales se puede realizar mediante rayos X o rayos gamma- rayos electromagnéticos de longitud de onda corta capaces de atravesar espesores de metal relativamente grandes. Los rayos gamma se pueden obtener ya sea de un material radiactivo natural (como el radio) o de un isótopo radiactivo (como el cobalto 60). La radiación gamma es más penetrante que los rayos x, pero su sensibilidad inferior limita su aplicación. No hay forma de que la fuente se pueda regular para examinar espesores variables o con contrastes, y generalmente requiere mucho más tiempo de exposición que el método de rayos x.

Los rayos x se producen cuando la materia es bombardeada por un haz de electrones que se mueven rápidamente. Cuando los electrones se detienen de repente por la materia, parte de su energía cinética se convierte en energía de radiación o rayos x. Las condiciones esenciales para la generación de rayos x son: a) un filamento (cátodo) que proporciona la fuente de electrones que se dirigen hacia el objetivo, b) un objetivo (ánodo) localizado en la trayectoria de los electrones, c) una diferencia de voltaje entre el cátodo y el ánodo, con lo que se regulará la velocidad de los electrones que inciden sobre el objetivo, regulando la longitud de onda de rayos x producidos, y d) un medio de regular la corriente del tubo para controlar el número de electrones que chocan contra el objetivo.

La **figura 2.2** muestra esquemáticamente el uso de los rayos x para examinar una placa soldada. Los rayos x son peligrosos y deben emplearse medidas de seguridad adecuadas para proteger al personal que los maneja.

Una radiografía es una fotografía sombreada de un material más o menos transparente a la radiación. Los rayos x oscurecen la película, de modo que las regiones de menor densidad que permiten fácilmente la penetración de éstos aparecen oscuras en el negativo, comparadas con las regiones de mayor densidad que absorben más radiación. De modo, un orificio o una fractura aparece como un área más oscura, en tanto que las inclusiones de cobre en una aleación de aluminio aparecen como áreas más claras.

Aunque la radiografía de metales se ha utilizado principalmente para revisar piezas fundidas y productos soldados, también puede usarse para medir el espesor de los materiales. La **figura 2.3** muestra una forma sencilla de medir el espesor de un material por



medio de radiación.

La radiación de la fuente se ve influida por el material sometido a prueba. Conforme el espesor aumenta, la intensidad de radiación que alcanza al detector disminuye. Si la respuesta del detector es calibrada con base en espesores conocidos, la lectura del detector se puede usar para indicar el espesor del material revisado. Con un circuito de retroalimentación adecuado, el detector puede emplearse para controlar el espesor entre límites predeterminados.

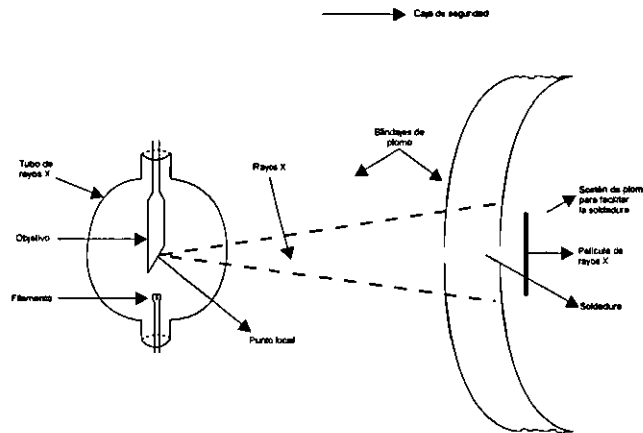


FIG. 1 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL USO DE LOS RAYOS X PARA EXAMINAR UNA PLACA SOLDADA.

Fig. 2.2 Uso de los Rayos X

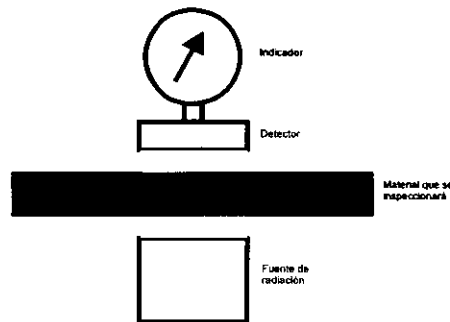


FIG. 2 MEDIDOR DEL ESPESOR DE UN MATERIAL POR MEDIO DE RADIACIÓN

Fig. 2.3

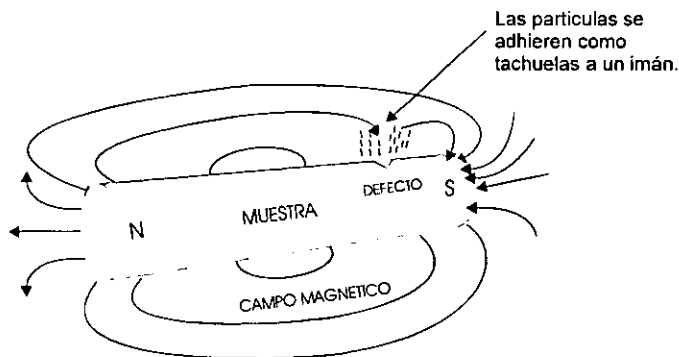
## INSPECCION POR PARTICULAS MAGNETICAS

Este es un método para detectar la presencia de fisuras, recubrimientos, rasgones, inclusiones y discontinuidades semejantes en materiales ferromagnéticos como el hierro y el acero. El método detectará discontinuidades de la superficie demasiado finas para apreciarse a simple vista y también detectará discontinuidades ligeramente por debajo de la superficie. No es aplicable a materiales no magnéticos.





La inspección por partículas magnéticas puede realizarse en diversas formas. La pieza que va a inspeccionarse puede magnetizarse y luego cubrirse con finas partículas magnéticas (polvo de hierro), esto se conoce como método residual. O bien, la magnetización y aplicación de las partículas puede hacerse simultáneamente, lo cual se



Al inducirse un campo magnético dentro de la parte que se inspeccionará y aplicar un revestimiento de partículas magnéticas, las figuras de la superficie se hacen visibles y las figuras, en efecto, forman nuevos polos magnéticos.



Fig. 3 Principio de la prueba Magnaflux

Fig. 2.4

conoce como método continuo. Las partículas magnéticas pueden mantenerse en suspensión en un líquido que se vierte sobre la pieza, o la pieza puede sumergirse en la suspensión (método húmedo). En algunas aplicaciones, las partículas, en forma de polvo fino, se esparcen sobre la superficie de la pieza de trabajo (método seco). La presencia de una discontinuidad se revela por la formación y adherencia de un arreglo característico de las partículas sobre la discontinuidad en la superficie de la pieza de trabajo.

Este arreglo característico de las partículas sobre la discontinuidad en la superficie de la pieza de trabajo. Este arreglo recibe el nombre de indicación.

La suspensión vertida sobre la pieza de trabajo magnetizada contiene partículas magnetizadas fluorescentes. Entonces, la pieza de trabajo se observa bajo luz negra, con lo cual las indicaciones destacan más claramente.

Cuando la discontinuidad está abierta a la superficie, el campo magnético se fuga hacia la superficie y forma pequeños polos norte y sur que atraen a las partículas magnéticas **figura 2.4**

Todas las partes compuestas de máquinas que han sido magnetizadas para su inspección deben someterse a un proceso de desmagnetización. Si estas partes se ponen en servicio sin desmagnetizarse, atraerán limaduras, polvos metálicos, rebabas y otras partículas de acero que pueden rayar, y por tanto dañar, los cojinetes y otras piezas de la máquina. La detección de partes que no han sido desmagnetizadas se logra, por lo general, manteniendo una brújula en el banco de montaje.



## INSPECCION POR PENETRACION FLUORESCENTE

Este es un método sensible no destructivo con el que se pueden detectar pequeñas discontinuidades como fisuras, contracciones y porosidades que afloran a la superficie.

Aunque este método puede aplicarse tanto a materiales magnéticos como a no magnéticos, se usa principalmente en materiales no magnéticos. Se puede recurrir a varias técnicas penetrantes para revisar cualquier material homogéneo que no sea poroso, como metales, vidrio, plástico y algunos materiales cerámicos.

Las partes que van a probarse se tratan primero con un trazador o colorante.

Por lo general, los trazadores son líquidos ligeros, de apariencia aceitosa que se aplican a la prueba por inmersión, rociado o con una brocha, o de alguna otra manera conveniente. El trazador es absorbido dentro de las fisuras y otras discontinuidades por una fuerte acción capilar. Después que el trazador ha tenido tiempo de filtrarse, los residuos restantes sobre la superficie se limpian o se lavan. Esto permite al trazador permanecer en todas las discontinuidades que afloran a la superficie. A continuación, la pieza que se está revisando se trata con un polvo seco o una suspensión de polvo en un líquido.

Este polvo o revelador actúa como una esponja que atrae al trazador fuera del defecto y aumenta el tamaño del área de indicación. A fin de que el proceso de inspección sea eficaz, el trazador debe ser observado fácilmente en el polvo revelador. Un método para facilitar la inspección es usar colores contrastantes para el trazador y el revelador. Una combinación muy común es utilizar un revelador blanco y un colorante rojo.

Otro método consiste en usar un trazador fluorescente. La **figura 2.5** muestra los pasos principales en la inspección por medio de un trazador fluorescente. Los pasos son exactamente los mismos que los descritos con anterioridad, excepto que el líquido penetrante contiene un material que emite luz visible cuando se expone a una radiación ultravioleta.

La inspección por trazador fluorescente se emplea para localizar fisuras y contracciones en piezas fundidas, fisuras en la fabricación y reesmerilado de herramientas de carburo, fisuras y hoyos en estructuras soldadas, fisuras en hojas de turbinas de vapor y de gas, y fisuras en aisladores cerámicos para bujías y aplicaciones electrónicas.

El método más depurado consiste en utilizar ondas de sonido fuera del intervalo auditivo, con una frecuencia de 1 a 5 millones de Hz (ciclos por segundo) de aquí el término ultrasónico. El método ultrasónico es una prueba no destructiva, confiable y rápida que emplea ondas sonoras de alta frecuencia producidas electrónicamente que penetrarán metales, líquidos y muchos otros materiales a velocidades de varios miles de pies por segundo. Las ondas ultrasónicas para ensayos no destructivos generalmente las producen materiales piezoeléctricos, los cuales sufren un cambio en su dimensión física cuando se someten a un campo eléctrico. Esta conversión de energía eléctrica a energía mecánica se conoce como efecto piezoeléctrico. Si se aplica un campo eléctrico alterno a un cristal piezoeléctrico, el cristal se expandirá durante la primera mitad del ciclo y se contraerá cuando el campo eléctrico se invierta. Al variar la frecuencia del campo eléctrico alterno, se puede variar la frecuencia de la vibración de la vibración mecánica (onda sonora) producida en el cristal. El cuarzo es un transductor ultrasónico ampliamente utilizado. Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía a otra.

La figura 2.6 muestra dos métodos de prueba ultrasónicos comunes: el de transmisión continua y el de eco-pulsos. El primero utiliza un transductor en cada lado del objeto que va a revisarse. Si al cristal transmisor se le aplica un pulso eléctrico de la frecuencia deseada, las ondas ultrasónicas producidas se desplazarán a través de la muestra hasta el otro lado. El transductor de recepción situado en el lado opuesto recibe las vibraciones y las convierte en una señal eléctrica que se puede amplificar y observar en el tubo de rayos catódicos de un osciloscopio, un medidor o algún otro indicador. Si la onda ultrasónica viaja a través de la muestra sin encontrar ninguna imperfección, la señal recibida será relativamente grande. Si hay imperfección en la trayectoria de la onda ultrasónica, parte de la energía se reflejará y la señal que recibirá el transductor de recepción se reducirá.

El método de eco-pulso utiliza sólo un transductor que sirve como transmisor y como receptor. Conforme la onda sonora penetra en el material sometido a prueba, parte de ella se refleja de vuelta al cristal, donde se convierte en un impulso eléctrico. Este impulso se amplía

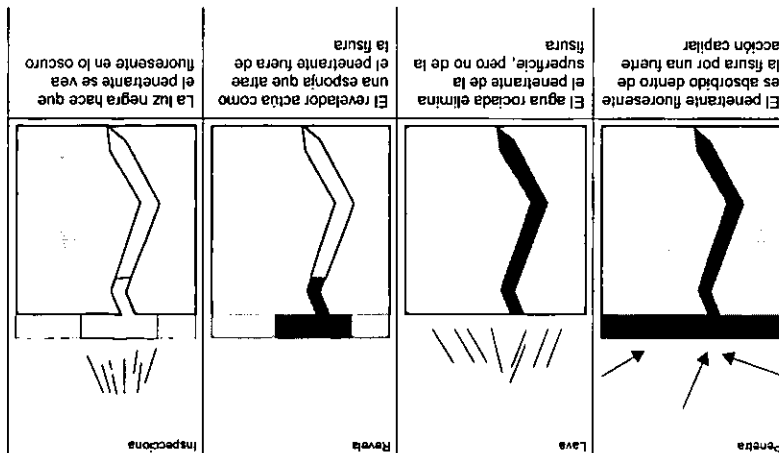
Un método muy antiguo es utilizar ondas de sonido para determinar defectos. Si una pieza de metal es golpeada con un martillo, producirá ciertas notas audibles, las cuales pueden alterarse en resonancia y tono por la presencia de imperfecciones internas. Sin embargo, esta técnica de golpear con un martillo y escuchar el sonido correspondiente es útil sólo para detectar grandes defectos.

Un método más depurado consiste en utilizar ondas de sonido fuera del intervalo auditivo, con una frecuencia de 1 a 5 millones de Hz (ciclos por segundo) de aquí el término ultrasónico. El método ultrasónico es una prueba no destructiva, confiable y rápida que emplea ondas sonoras de alta frecuencia producidas electrónicamente que penetrarán metales, líquidos y muchos otros materiales a velocidades de varios miles de pies por segundo. Las ondas ultrasónicas para ensayos no destructivos generalmente las producen materiales piezoeléctricos, los cuales sufren un cambio en su dimensión física cuando se someten a un campo eléctrico. Esta conversión de energía eléctrica a energía mecánica se conoce como efecto piezoeléctrico. Si se aplica un campo eléctrico alterno a un cristal piezoeléctrico, el cristal se expandirá durante la primera mitad del ciclo y se contraerá cuando el campo eléctrico se invierta. Al variar la frecuencia del campo eléctrico alterno, se puede variar la frecuencia de la vibración de la vibración mecánica (onda sonora) producida en el cristal. El cuarzo es un transductor ultrasónico ampliamente utilizado. Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía a otra.

INSPECCIÓN ULTRASONICA

Fig. 2.5

FIG. 4 PASOS PRINCIPALES EN EL MÉTODO DE INSPECCIÓN POR PENETRANTE FLUORESCENTE.





y hace visible, apareciendo como una indicación o señal sobre la pantalla del osciloscopio. Cuando la onda sonora alcanza el otro lado del material, se refleja de regreso al cristal y se ve como otra señal sobre la pantalla hacia la derecha de la primera señal. Si hay imperfección entre las superficies frontal y posterior del material, se delatará sobre la pantalla como una tercera señal entre las dos indicaciones correspondientes a las superficies frontal y posterior. Como las indicaciones en la pantalla del osciloscopio miden el tiempo transcurrido entre la reflexión del pulso desde las superficies frontal y posterior, la distancia entre indicaciones es una medida del espesor del material.

Por tanto, la localización de un defecto puede determinarse con exactitud por la indicación que aparece sobre la pantalla.

En general las superficies uniformes y lisas son más apropiadas para la prueba de pulso de mayor frecuencia; por tanto permiten detectar defectos más pequeños. La transmisión adecuada de la onda ultrasónica tiene gran influencia en la confiabilidad de los resultados de la prueba. Para partes de mayor tamaño, una película de aceite asegurará un contacto apropiado entre la unidad del cristal de búsqueda y la pieza a prueba.

La inspección ultrasónica se utiliza para detectar y localizar defectos como cavidades de contracción (rechupes), vacíos o fisuras internas, porosidad y grandes inclusiones no metálicas. El espesor de pared se puede medir en recipientes cerrados o en casos en que tal medición no puede hacerse de otra manera.

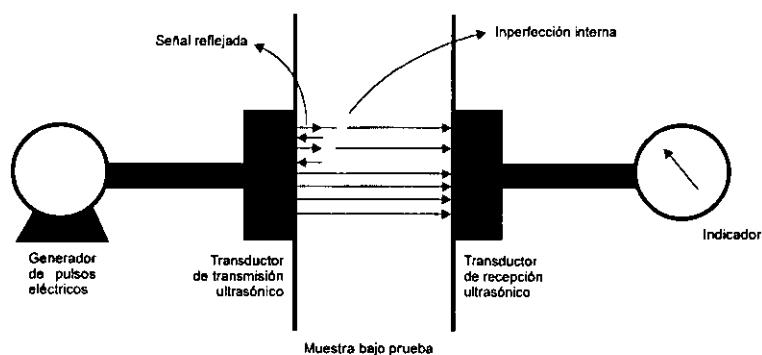


FIG. 5 MÉTODOS DE INSPECCIÓN ULTRASONICA, EL DE TRANSMISIÓN Y EL DE ECO-PULSOS

Fig. 2.6

## METALOGRAFÍA

La Metalografía es básicamente el estudio, a nivel microscópico, de la constitución y estructura de los materiales metálicos (metales y aleaciones). Las características estructurales son estudiadas por microscopía óptica de luz, empleando microscopios metalúrgicos y magnificaciones de hasta 2500x, de manera que las propiedades físicas y mecánicas de un material metálico pueden ser asociadas a su microestructura observada.

En la examinación metalográfica de un espécimen adecuadamente preparado se revelará la microestructura que presenta el material de una localización específica. A partir del examen de la microestructura del material, es posible determinar el tamaño y forma de grano, y el tamaño, forma y distribución de las diversas fases e inclusiones presentes que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del material; y para efectos prácticos, la



microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento en servicio.

Imperfecciones metalúrgicas o microdefectos y condiciones indeseables pueden ser detectadas y analizadas, tal como segregación, microfisuras, inclusiones no metálicas, descarbonización, transformaciones de fase o tratamiento térmico inadecuado, martensita "blanca" sin revenir, corrosión intergranular, etc. Además la examinación metalográfica es útil en la medición de parámetros, tales como profundidad de corteza (o profundidad de capa endurecida), espesor de recubrimientos o enchapados, tamaño de grano, zona afectada por calor, etc. En algunos casos, puede determinarse de manera cualitativa la clase de material y de forma aproximada la composición química del material. La metalografía es el mejor medio para la construcción de los diagramas de fases. Además, se sabe que las propiedades mecánicas de casi todos los metales guardan una relación muy estrecha con su microestructura.

Por tanto, con la examinación metalográfica puede determinarse la clase de material, el método de manufactura y dirección de trabajo mecánico del componente bajo investigación, y revelar imperfecciones del material causadas durante procesamiento; también se puede determinar el tratamiento térmico al cual ha sido sometido, ya sea intencionalmente durante la manufactura o accidentalmente de manera local durante servicio; otros efectos por servicio que son los resultados de las condiciones de operación, tales como corrosión y severo endurecimiento por deformación, también son revelados y su extensión puede ser investigada.

En el ámbito industrial, la metalografía es usada como procedimiento de control de calidad del producto y para controlar procesos industriales, ya que el examen de la microestructura del material es útil para determinar si se satisface las especificaciones del material en relación con trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición general. Alternativamente, la examinación metalográfica puede ser usada para predecir y/o exponer las propiedades mecánicas del material a prueba para ayudar en la determinación de la causa de falla de un componente metálico. Por lo que este tipo de examinación en materiales metálicos es una práctica estándar en un análisis de fallas.

La examinación metalográfica se aplica a un componente antes de ser destinado a un fin para prevenir inconvenientes en su servicio o después de aparecer una falla en operación para establecer la causa de la falla. En la examinación metalográfica puede hacerse un diagnóstico y un pronóstico, el primero tiene por objeto establecer el estado presente y el segundo predecir el estado a alcanzarse con mayor probabilidad en un futuro. Este tipo de examinación también se complementa con el análisis químico para establecer un conocimiento más amplio del material bajo estudio.

La examinación metalográfica durante el servicio de un componente, en la mayoría de los casos, se hace como consecuencia de no haber hecho el examen de control antes de entrar el componente en servicio. Este examen es el más común. Se realiza sobre piezas que no han soportado un determinado servicio, es decir, piezas que en la mayoría de los casos se han deformado, fracturado, desgastado o corroído. En estos casos, lo que se pretende del metalografista es que determine la causa de la anomalía, lo que casi siempre es un problema complejo.

La examinación metalográfica previo al uso de un material (examinación de control) tiende a adelantarse a los resultados prácticos. El conocimiento de la integridad y de la estructura de un metal o aleación permite predecir si puede servir para el uso a que está destinado.

Debe recordarse que un diagnóstico correcto de un material examinado antes de entrar en servicio permite pronosticar sus resultados y por tanto, permite ahorrar mucho tiempo, dinero y disgustos.



## METODOS METALOGRAFICOS

La examinación metalográfica es realizada con el uso de microscopios metalúrgicos, cuyo principio de operación implica reflexión de luz desde la superficie a examinar del espécimen; y es requerimiento que tal superficie (normalmente llamada la microsección) sea plana y esté libre de ralladuras, capas endurecidas por trabajo (o por deformación) y otras imperfecciones superficiales, a tal grado que una preparación adecuada implica un acabado superficial a espejo.

La preparación de especímenes metalográficos descrita en esta sección es también aplicable a otros tipos de estudios, tales como microscopía electrónica, pruebas de microdureza, análisis de imagen y análisis por microsondeo electrónico.

**Un espécimen debidamente preparado es:** 1) una muestra representativa del material bajo estudio; 2) seccionado, esmerilado y pulido para minimizar la cantidad de metal superficial distorsionado o alterado por deformación mecánica o sobrecalentamiento, y con ello permitir que la auténtica microestructura sea revelada por ataque químico; 3) libre de ralladuras y picadura por pulido o manchamiento por líquidos; 4) pulido de manera que las inclusiones y fases sean mantenidas sin relieve; 5) suficientemente plano para permitir la examinación a alta magnificación; y 6) preparado de manera que sus bordes sean preservados y no redondeados para revelar detalles superficiales.

**La preparación de especímenes metalográficos generalmente requiere de cinco operaciones importantes:** (a) seccionamiento, (b) montaje (opcional), (c) esmerilado o lijado, (d) pulido o pulimento, y (e) ataque químico (opcional).

El fin principal de la examinación metalográfica es revelar los constituyentes y estructura de los metales y sus aleaciones por medio del microscopio; en casos especiales, la examinación puede requerir el desarrollo de menos detalle que en otros casos pero, bajo casi todas las condiciones, la selección y preparación apropiada del espécimen es de mayor importancia.

**A continuación se da una discusión detallada de los procedimientos de preparación de especímenes para examinación metalográfica.**

### 1. Selección de Especímenes Metalográficos

En general, la muestra seleccionada y removida del producto deberá ser tal que los especímenes seleccionados de ella deben ser representativos del material que está siendo estudiado. Si todas las características microestructurales deseadas no pueden ser observadas en un espécimen razonablemente pequeño, entonces deben ser preparados más especímenes para revelar todas las microestructuras de las zonas de interés. Muchos estudios metalográficos por lo general requieren más de un espécimen de prueba.

Para estudio en general o trabajo de rutina en pruebas y control de materiales, deben ser seleccionados especímenes de localizaciones que son muy probables de revelar las máximas variaciones en el material bajo estudio. En el estudio de fallas, los especímenes de



prueba deben ser seleccionados de áreas adyacentes a la superficie de fractura o a la iniciación de la falla, de áreas alejadas de la zona de falla para comparación de microestructuras y propiedades originales, y del área de falla o superficie de fractura una vez analizadas. Para el caso de investigación de materiales, la selección de especímenes se deja a criterio del investigador.

Una vez establecida la localización de las muestras metalográficas a ser estudiadas, se debe elegir el tipo de sección a ser examinada. Para el caso de piezas fundidas, un corte de la sección perpendicular a la superficie mostrará las variaciones en estructura desde la parte externa al interior de la pieza. En el caso de metales trabajados en caliente o en frío, deberán ser estudiadas tanto secciones transversales como longitudinales; es decir, se requieren dos secciones, una perpendicular y otra paralela a la dirección de la deformación o trabajado. Algunas investigaciones especiales pueden requerir a veces especímenes con superficies preparadas paralelas a la superficie original del producto.

### **Los cortes transversales o secciones transversales perpendiculares al eje principal del material revelan lo siguiente:**

- Variaciones en estructura del centro a la superficie,
- Distribución de impurezas por toda la sección,
- Descarburación en la superficie de materiales ferrosos,
- Profundidad de imperfecciones superficiales,
- Profundidad de corrosión,
- Espesor de recubrimientos, y
- Estructura de recubrimientos.

### **Las secciones longitudinales paralelas al eje principal del material revelan en general lo siguiente:**

- Extensión de deformación en las impurezas no metálicas,
- Grado de deformación plástica, mostrando la distorsión de los granos, y
- Uniformidad y perfección de algún tratamiento térmico.

Las localizaciones de superficies o secciones examinadas deben ser especificadas en los reportes de resultados y en la descripción de alguna micrografía, de manera que esté determinado qué secciones de material fueron usadas para la examinación.

## **2. SECCIONAMIENTO**

Generalmente los especímenes para examinación metalográfica deben tener una área de examinación de 0.5-1.0 in (12.7-25.4 mm) de lado si es de sección cuadrada, o de 0.5-1.0 in de diámetro si es de sección redonda. La altura del espécimen no deberá ser más grande que la necesaria para el conveniente manejo durante el lijado y pulido mecánico, y para el montaje en el microscopio. Se recomienda que la altura sea inferior al lado o diámetro de la cara o sección a pulir para un mejor sostenimiento y apoyo.

En algunos casos no es posible obtener especímenes con las dimensiones antes especificadas, si el material a ser examinado frecuentemente es más pequeño o más grande; por lo que las secciones pequeñas o irregulares de material removidas deberán ser



montadas en forma especial debido a su tamaño y forma inconveniente de manejo, las muestras más grandes pueden ser montadas o no, según el equipo de montaje disponible.

Las muestras para seccionamiento pueden ser removidas del producto o partes grandes de material usando métodos de corte tales como el aserrado con sierra alternativa o sierra cinta, corte con flama para piezas muy grandes, corte con disco abrasivo y corte con sierra de arco para partes pequeñas. En el seccionamiento o corte de especímenes metalográficos, deberán tomarse precauciones para evitar alteración de la microestructura en el área de interés por sobrecalentamiento o endurecimiento por deformación debido a la acción de corte, por lo que debe mantenerse enfriada la zona de corte en el material por inmersión o flujo de algún refrigerante o agua, y la rapidez de corte debe ser mantenida a un mínimo. En el caso de materiales relativamente frágiles, el seccionamiento puede ser realizado por fracturamiento del espécimen en una localización específica.

El aserrado, ya sea manual o mecánico, puede ser usado en materiales con dureza inferior a 35HRC. Con éste método se produce una superficie áspera con intenso flujo plástico que deberá ser removido en la preparación subsecuente.

Usando máquinas de corte con disco abrasivo se producirá una superficie lisa, frecuentemente dispuesta para esmerilado fino. La selección del disco abrasivo de corte, lubricante, condiciones de enfriamiento, el grado y dureza del metal influirán en la calidad del corte. Una mala selección de las condiciones de corte puede provocar el sobrecalentamiento de la muestra, produciéndose una alteración de la microestructura.

Los discos abrasivos de corte de óxido de aluminio son recomendados para materiales ferrosos, y los de carburo de silicio para aleaciones no ferrosas. Los discos abrasivos de corte son necesarios para seccionamiento de metales con dureza mayor de 35HRC, y deben ser seleccionados de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

El corte con flama altera completamente la estructura del metal en el borde de corte. Si es necesario emplear este método de seccionamiento, se deberá cortar una muestra lo suficientemente grande de manera que se pueda hacer cortes secundarios, eliminando zonas alteradas, al tamaño apropiado por algún otro método.

Una vez concluido el seccionamiento, los especímenes se deben examinar visualmente y remover las virutas por limado o esmerilado apropiado. Finalmente, el espécimen debe ser cuidadosamente lavado antes de proceder a la siguiente etapa de preparación metalográfica.

### 3. MONTAJE

Si es necesario, las muestras o especímenes para examinación metalográfica pueden montarse en un material adecuado o en un dispositivo apropiado de sujeción. El principal uso del montaje es para conveniencia en el manejo de especímenes pequeños o de formas y tamaños difíciles de manipular durante el esmerilado, pulido, e inconvenientes para la examinación posteriores el microscopio. Además, se tiene la ventaja de proteger o preservar los bordes o defectos superficiales durante la preparación metalográfica, y permitir que sean tomadas fotomicrografías de estas zonas. Secciones de alambre, varilla, fleje, lámina, secciones delgadas o irregulares, etc., pueden ser montadas de manera óptima para su manejo y examinación metalográfica.

**En general, el montaje de especímenes puede hacerse de dos formas: 1) Montaje Plástico y 2) Montaje Mecánico.**





Para el caso de Montaje Plástico, los especímenes pequeños o de forma irregular e incómoda son usualmente montados en una matriz polimérica rígida empleando apropiados polímeros termoplásticos o termofijos. La matriz polimérica no es afectada por el ataque químico en la preparación metalográfica ya que los polímeros empleados son inertes al alcohol y a los reactivos de ataque químico comúnmente empleados. Los métodos de Montaje Plástico empleados en los laboratorios metalúrgicos son: **a) Montaje por Compresión** y **b) Montaje en Frío**.

**a) Montaje Plástico por Compresión.** Este método implica en capsular el espécimen en una matriz polimérica empleando prensas especiales de montaje para el moldeo de materiales poliméricos tales como resinas en polvo que requieren calor (arriba de 160°C) y presión (arriba de 4200 psi) simultánea durante el ciclo de moldeo y cura, obteniéndose así una rígida base (o montura) plástica. Los materiales de moldeo pueden ser resinas termofijas en polvo tales como resinas fenólicas, resinas diallyl phtalate y resinas epóxicas, o resinas termoplásticas en polvo. La resina termofija comercial más comúnmente usada es la baquelita, disponible comercialmente en polvo y en diversos colores, y es opaca. La resina termoplástica comercial más común es la lucita, disponible en polvo y es completamente transparente cuando se moldea adecuadamente; esta transparencia resulta útil cuando es requerido observar la sección exacta que se pule o cuando por cualquier otra razón se desea ver por completo el espécimen en la base plástica.

Algunas veces los datos del fabricante de la resina deben ser consultados para seleccionar la magnitud apropiada de la presión de moldeo así como su duración.

Cuando se emplean resinas termofijas, la superficie del espécimen a ser examinada es puesta cara abajo sobre el dado de moldeo en el cilindro de la prensa de montar y llenado con la cantidad adecuada de resina en polvo alrededor del espécimen, y el sistema es sometido a calentamiento gradual y presión adecuados simultáneamente. Una vez que la resina termofija está adherida y curada cuando se alcanza la temperatura adecuada, se libera la presión y calentamiento, y puede extraerse del dado de moldeo mientras está caliente o al enfriarse.

Al contrario de las resinas termofijas, las resinas termoplásticas no sufren cura a la temperatura de moldeo, sino que adquieren estabilidad al enfriarse. Cuando se emplean resinas termoplásticas, el espécimen y la cantidad de polvo adecuada se colocan en el cilindro de la prensa como se mencionó anteriormente, y el sistema se somete a la temperatura y presión adecuada. Una vez alcanzada esta temperatura, el sistema es enfriado colocando apropiados dispositivos de enfriamiento alrededor del cilindro, o automáticamente en unidades de montaje modernas; posteriormente se libera la presión y la base plástica es extraída del dado de moldeo. Si se saca la base todavía caliente, se opacará y se deformará ligeramente.

Las marcas de identificación en las bases plásticas son hechas por rayado con una adecuada herramienta afilada.

**b) Montaje Plástico en Frío.** Cuando el calor y/o presión pueden causar daño al espécimen o cambiar su microestructura y cuando se requiere una base plástica más grande a la que puede ser obtenida por el método anterior, el método de montaje en frío es recomendado. En éste método, la reacción de polimerización, requerida para producir una matriz rígida, ocurre a temperatura ambiente y no se requiere calentamiento o presión alguna. El procedimiento es simple e implica mezclar perfectamente la resina con un catalizador o endurecedor y llenarse un molde cerámico en el que el espécimen (con la superficie a examinar cara abajo sobre una placa de vidrio) es colocado. Generalmente se coloca una etiqueta de identificación en el molde para evitar la necesidad de rayar la base



plástica, lo cual puede ser difícil para este tipo de resina termofija. En este método se utilizan resinas acrílicas, poliéster y resinas epóxicas; éstas últimas son las más comúnmente usadas y ofrecen las ventajas de adherirse firmemente al espécimen y exhibir muy baja contracción. La única desventaja de este método es que algunas resinas pueden requerir varias horas para curar completamente.

Alternativamente, el método de Montaje Mecánico es conveniente para el manejo en las operaciones de preparación metalográfica de especímenes de secciones pequeñas, alambres, chapa metálica, secciones irregulares, etc., mediante el uso de un tipo de dispositivo de sujeción adecuado a la sección a montar. Los especímenes laminares delgados cuando se montan en tal dispositivo, suelen alternarse con laminillas metálicas "rellenadoras" que tienen aproximadamente la misma dureza que los especímenes. Con el uso de laminillas rellenas, se conservará la superficie de las irregularidades del espécimen y se evitará que los bordes se redondeen.

#### 4. ESMERILADO O LIJADO

Es una operación de desbaste o remoción superficial de material empleando papeles abrasivos o lijas.

Comercialmente están disponibles papeles abrasivos o lijas debidamente clasificados para trabajos metalográficos, con designación numérica que indica el tamaño de grano o partícula del abrasivo; clasificándose de manera que entre mayor es el número de grado o designación, más fino es el tamaño de grano o partícula. Se expenden en designaciones entre 40 y 600, y pueden adquirirse en forma de banda o cinta para usarse en máquinas lijadoras de banda, o en forma circular para colocarse sobre un disco giratorio impulsado por un motor, o en forma de hoja rectangular para uso manual sobre una superficie plana y rígida.

Los abrasivos para esmerilado comúnmente usados en la preparación metalográfica de especímenes son partículas de carburo de silicio (SiC), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), esmeril (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) y diamante. Todos excepto el diamante están ligados o adheridos a material de soporte como tela o papel. Los diversos métodos de esmerilado incluyen esmerilado manual o el uso de diversas máquinas lijadoras de banda o de disco giratorio, o máquinas automáticas de lijado.

**El esmerilado o lijado total de un espécimen consiste de dos etapas: a) Esmerilado Burdo y b) Esmerilado Fino.**

**a) Esmerilado Burdo.** En esta etapa, el espécimen con montaje plástico o sin él, es sometido a desbaste superficial de material sobre una máquina lijadora de banda o cinta (giratoria), manteniendo la muestra fría sumergiéndola frecuentemente en agua durante tal operación. Se utilizan bandas de grano 180 y de más grueso. Alternativamente, este proceso puede hacerse sobre papeles abrasivos o lijas con la designación apropiada colocados sobre discos giratorios impulsados por un motor.

El esmerilado burdo o áspero tiene como fin remover toda la resina polimérica de toda la superficie del espécimen metalúrgico y nivelar las superficies de la base plástica si se realizó montaje plástico, aplanar la superficie de corte irregular o dañada y eliminar marcas o rayaduras de herramientas por la acción de corte o cualquier otra imperfección superficial; obteniéndose una superficie plana con sólo rayaduras uniformes producidas particularmente



por la lija empleada.

Se debe asegurar que toda la superficie de la muestra esté siendo esmerilada y que la superficie permanezca casi normal al eje de la base plástica. Esto puede ser logrado por cambio frecuente de la dirección de la muestra sobre la lijadora de banda o disco giratorio. Posteriormente, se recomienda biselar o achaflanar el borde de la base plástica a un ángulo de aproximadamente 45° todo alrededor para evitar el rasgamiento de los paños pulidores (después durante la etapa de pulido mecánico) con bordes afilados; el biselado también tiene la ventaja de eliminar la posibilidad de rompimiento de virutas que puedan rayar la superficie del espécimen. En general, la operación de esmerilado debe realizarse en sentido perpendicular a las rayaduras que se deseen eliminar.

**b) Esmerilado Fino.** Como resultado de las operaciones de seccionamiento y esmerilado burdo, la capa superficial del espécimen metálico experimenta deformación plástica, lo cual alternativamente conduce a distorsión de cristales y microestructura alterada. El esmerilado fino está por tanto destinado a reducir gradualmente el espesor de esa capa distorsionada, y tiene por resultado una zona de deformación nuevamente formada que es más delgada y menos severa que la primera. Ya que la profundidad de la zona de deformación está directamente relacionada al tamaño de partícula (o aspereza) del papel abrasivo, el espécimen debe ser esmerilado usando progresivamente partículas abrasivas más finas. Por consiguiente, este seguimiento disminuye gradualmente el espesor de la capa alterada de metal por trabajo en frío o por sobrecalentamiento conforme el tamaño de partícula del abrasivo disminuye. Generalmente es recomendado una secuencia de esmerilado fino que incluye el uso de una serie de papeles abrasivos de grano 240, 320 400 y 600, en orden progresivo de finura. Dependiendo de la uniformidad de la superficie del espécimen, el uso de algunos de los papeles abrasivos más ásperos pueden no ser utilizados. Los papeles abrasivos se colocan sobre una superficie plana y rígida tal como una placa de vidrio o acrílico en caso de esmerilado manual, o sobre discos giratorios; alternativamente, se pueden utilizar dispositivos automáticos para tal operación.

La operación de esmerilado es hecho por vía húmeda, utilizando una corriente de agua actuando como lubricante para impedir cualquier sobrecalentamiento del espécimen y para eliminar por acción de enjuague el material removido y los granos desprendidos del papel abrasivo, de esta manera previniendo el rayamiento de la superficie que está siendo esmerilada y la acumulación de productos removidos en el papel abrasivo. En el esmerilado manual, la superficie del espécimen es presionada contra el papel abrasivo y el espécimen es movido en línea recta, ya sea hacia adelante o hacia atrás, usando un mínimo de presión. En las operaciones de esmerilado en general, el espécimen debe esmerilarse de manera que las marcas de rayadura causadas por el papel abrasivo utilizado estén a 90° de aquellas formadas por la operación de corte o por el papel abrasivo precedente, es decir en dirección perpendicular a las rayaduras generadas por la operación anterior. Esto facilita el determinar cuándo las rayaduras más profundas del papel abrasivo de grado precedente hayan sido eliminadas y sustituidas por las menos profundas, características del papel abrasivo más fino. Debe ser lavado el espécimen y las manos después de cada paso del esmerilado para asegurar la limpieza absoluta del espécimen e impedir la conservación de abrasivo más grueso, antes de pasar al siguiente grado más fino de papel abrasivo. Al final del esmerilado en cada papel abrasivo, la superficie del espécimen, y la base plástica si la tiene, debe ser completamente plana con un sólo plano de esmerilado y con una serie de rayaduras de esmerilado unidireccionales. Después de completado el esmerilado con la serie de papeles abrasivos indicados y el lavado adecuado, es recomendado examinar los especímenes a baja magnificación (10x) para asegurar que la calidad de la superficie es apropiada antes de proceder a la operación de pulido.



Existen dispositivos para esmerilado automático, los cuales en su mayoría mueven el espécimen alrededor de un disco giratorio cubierto con papeles abrasivos de manera que el espécimen siga una trayectoria adecuada. En algunos dispositivos, el espécimen rota sobre su propio eje también.

## 5. PULIDO O PULIMENTO

La operación de pulido está destinada para eliminar de la superficie a ser examinada del espécimen las rayaduras finas resultantes de la operación de esmerilado precedente, de esta manera produciéndose una superficie altamente pulida, que está libre de rayaduras y con acabado superficial a espejo. La técnica de pulido usada no debe presentar estructura extraña, tal como metal alterado, picadura o manchamiento.

**El pulido de un espécimen puede ser de dos tipos: a) Pulido Mecánico y b) Pulido Electrolytico.**

**a)** El pulido mecánico convencional se realiza sobre discos pulidores giratorios cubiertas con una tela o paño especial, y con el uso de polvo abrasivo para pulir que se aplica en forma de una suspensión diluida generalmente en agua (suspensión de abrasivo); es decir, el paño es cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño. Los especímenes son sostenidos contra el paño en forma manual o mecánicamente. Los dispositivos automáticos para pulido son de dos tipos: a) dispositivos mecánicos, similares a las máquinas lijadoras automáticas; y b) equipo de vibración, en el cual una base de pulido, reemplazando el disco de pulido, vibra en un movimiento complejo para mover el espécimen alrededor de la base la cual está cubierta con un paño de pulir cargado con partículas abrasivas.

La selección de un paño para pulir depende del material a ser pulido y el propósito del estudio metalográfico. Comercialmente están disponibles para propósitos metalográficos paños de afelpado (lanilla o pelillo) variable, desde aquellos que no son afelpados (sin pelillo), como seda, nylon, raso o satín; hasta aquellos de afelpado intermedio, como lona, algodón de poco pelillo, pellón (una mezcla de rayón y fibras de nylon), fieltro, paño de billar; además de aquellos muy afelpados, como los terciopelos. También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir con fines de pulido general, de los cuales el Gamal y el Micropaño son los que se utilizan más ampliamente.

Estos paños son bien extendidos y estirados sobre el disco pulidor, y aseguradamente sujetos usando una abrazadera metálica tipo cinta alrededor de la periferia del disco o empleando adhesivos.

De manera práctica, el pulido preliminar es normalmente hecho con el disco pulidor rotando a 500-600 rpm. , Y velocidades más altas son usadas para el pulido final.

La selección del abrasivo y su tamaño de partícula depende del material a pulir y de la calidad del acabado superficial requerido. Existe gran disponibilidad de abrasivos para efectuar el pulido, los cuales pueden adquirirse como polvo abrasivo clasificado en tamaño de partícula para trabajos metalográficos, tales como óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), óxido de magnesio ( $MgO$ ), óxido crómico ( $Cr_2O_3$ ), óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ), y compuesto (pasta) de diamante. Estos abrasivos, excepto el compuesto de diamante, son normalmente usados en una suspensión de agua destilada. ; pero otros líquidos tales como glicol etileno, alcohol, keroseno o glicerina pueden ser usados si es necesario, como lubricantes.

Los compuestos de diamante para pulido son normalmente los más recomendados para la preparación de especímenes metalográficos en general. El diamante es la única sustancia que puede ser usada para el pulido de materiales duros tales como carburo de boro y tungsteno sinterizado. Los especímenes que tienen constituyentes duros y suaves tal



como grafito en hierro y silicio en aluminio, pueden ser pulidos sin causar relieve, con compuestos de diamante. Estos compuestos para pulido están disponibles en pastas ya sea solubles en agua o en aceite, o en la forma de polvo de diamante seco en tamaños de partícula de hasta  $0.25\mu\text{m}$ . En general, la elección del abrasivo, lubricante y superficie (pañó) frecuentemente es específico para el metal y el fin de la investigación.

Cabe también mencionar que hay tres formas cristalográficas básicas de alúmina, designadas como alfa, beta y gamma. La alúmina tipo alfa y gamma son las más ampliamente usadas como abrasivos para pulido. La alúmina tipo alfa tiene una estructura cristalina hexagonal, tamaño de partícula de  $1\mu\text{m}$  o mayor, y una dureza elevada; este tipo de alúmina es recomendada para pulido preliminar. Por otra parte, la alúmina tipo gamma es muy recomendada para pulido final; tiene una estructura cristalina cúbica, tamaño de partícula de  $0.1$  o  $0.05\mu\text{m}$ , y dureza más baja que el tipo alfa.

En el pulido convencional, el espécimen es sujetado firmemente en contacto con el disco pulidor giratorio y es movido en dirección contraria a la rotación del disco de pulido, y en una trayectoria elíptica alrededor del disco. Durante el pulido, debe ser aplicada una presión firme, con la mano, al espécimen y es proporcionalmente disminuida de acuerdo con los pasos de pulido sucesivamente más finos.

La preparación de alta calidad de la mayoría de especímenes metalográficos puede ser obtenida con el uso de equipo de pulido automático. Este equipo es adecuado para la preparación de varios especímenes simultáneamente.

Por regla general, la acumulación de una cantidad excesiva de polvo abrasivo sobre el disco pulidor es causa de picaduras, metal alterado y una superficie generalmente poco satisfactoria. Por otro lado, el uso de una cantidad demasiado pequeña de abrasivo para el pulido retarda la operación.

**El Pulido Mecánico de especímenes metalográficos se divide en dos etapas: a) Pulido Preliminar, y b) Pulido Final.**

**a) Pulido Preliminar.** Esta operación está destinada a eliminar de la superficie a ser examinada las rayaduras finas resultantes de la operación de esmerilado anterior, de esta manera produciéndose una superficie altamente pulida. El pulido preliminar es usualmente hecho en tres pasos sobre una serie de discos pulidores giratorios, cubiertos con un paño no afelpado (como nylón o seda) que es cargado con una suspensión de abrasivo apropiado; utilizando en cada disco un abrasivo con tamaño de partícula distinto. Las pastas de diamante solubles en aceite (de  $1$ ,  $6$  y  $9\mu\text{m}$ ) son bien adaptadas para esta operación y dan los mejores resultados. En este caso, el aceite (unas cuantas gotas) es aplicado como expansor y lubricante. Alternativamente, pueden ser usadas las suspensiones de óxido de aluminio con tamaño de partícula de  $15$ ,  $6$  (o  $3$ ) y  $1\mu\text{m}$  (Debe considerarse que cada suspensión debe ser usada con el mismo disco designado para tal suspensión todo el tiempo, es decir, una suspensión con partículas de  $6\mu\text{m}$  no debe ser cargada en un disco designado para partículas de  $1\mu\text{m}$ , a menos que se cambie el paño adecuado).

Usualmente se prepara una suspensión de dos cucharadas de alúmina en polvo (con el tamaño de partícula requerido) en aproximadamente  $600\text{ml}$  de agua destilada. Es requerimiento lavar perfectamente el espécimen y las manos entre cada paso de la operación de pulido.

**b) Pulido Final.** Después de esta operación, el espécimen metalográfico debe tener una superficie libre de rayaduras con un acabado superficial a espejo. El pulido final es normalmente hecho sobre un disco giratorio cubierto con un paño afelpado (como micropaño



de rayón sintético, o terciopelo) cargado con una suspensión de alúmina con tamaño de partícula inferior a  $1\mu\text{m}$ . El tiempo de la operación debe ser mantenido a un mínimo absoluto, ya que un periodo de mantención del espécimen muy largo sobre el disco pulidor dará como resultado picadura de la superficie, lo cual afectará su lisura.

Después de completada la operación de pulido final, es requerido lavar el espécimen bajo un chorro de agua, secar ligeramente con algodón, limpiar la superficie a examinar con alcohol y por último secado por insuflación de aire caliente. Finalmente, el espécimen está debidamente preparado para examinación metalográfica.

El microscopio metalúrgico es usado a una magnificación normalmente de 100x para revelar características estructurales como la presencia de porosidad, microfisuras e inclusiones no metálicas. La microestructura no puede aún ser observada mientras el espécimen está todavía en su condición de como fue pulido solamente, excepto para ciertas aleaciones no ferrosas y sólo cuando es usada luz polarizada. Los especímenes pulidos deben ser almacenados en un desecador para evitar corrosión y ser protegida la superficie pulida (microsección) para impedir cualquier rayadura.

## 6. ATAQUE QUÍMICO

La superficie de un espécimen en condición de pulido solamente (sin ataque químico posterior), no mostrará la mayoría de las características estructurales del metal al ser visto bajo el microscopio. Sin embargo, algunas de las características tales como inclusiones no metálicas en acero, grafito en hierro fundido, microfisuras, porosidad, etc., pueden ser observadas en un espécimen pulido sin ataque químico. Por tanto, la examinación microscópica de un espécimen previamente pulido sin ataque químico sólo permite reconocer en general la integridad y la presencia de inclusiones no metálicas. La microestructura, mostrando las distintas fases, fronteras de grano, flujo plástico de cristales, maclaje, etc., sólo puede desarrollarse después de un ataque químico de la superficie a examinar (microsección) del espécimen con un reactivo adecuado.

La operación de ataque químico implica someter la superficie pulida (microsección) a ser examinada microscópicamente a la acción química de un reactivo apropiado bajo condiciones controladas. El propósito del ataque químico es hacer visibles a nivel microscópico las características estructurales del metal o aleación bajo estudio.

En aleaciones polifásicas, las distintas fases no tienen la misma solubilidad en el reactivo químico y por tanto se atacarán a distintas rapideces. Esto conduce a un ataque preferencial (distintas rapideces de solución de las fases en el reactivo de ataque) y/o coloración preferencial de una o más de esas fases, debido a diferencias en composición química y en menor grado, debido a diferencias en orientación; las cuales cada una a su vez establecen el contraste estructural que permite que las distintas fases de una microestructura sean identificables bajo el microscopio. Por otro lado, en metales puros y aleaciones monofásicas, la rapidez de ataque químico es diferente para los diversos granos y está directamente relacionada a su orientación con respecto al plano de la superficie pulida, por lo que el ataque preferencial es principalmente un resultado de las diferencias en la orientación de los granos. (Debe tenerse en cuenta que la rapidez de disolución de cualquier grano difiere a lo largo de los diferentes planos cristalográficos). Debido al ataque químico por el reactivo, las fronteras de grano aparecerán como valles en la superficie pulida. Al chocar con la orilla de estos valles, la luz del microscopio se reflejará fuera del microscopio, haciendo que las fronteras de grano aparezcan como líneas oscuras. En general, el mecanismo de ataque químico para metales puros y aleaciones monofásicas es mucho más bajo que en las aleaciones polifásicas debido a la ausencia de la reacción anódica (esto será cubierto en la



sección sobre corrosión). Por consiguiente, los metales puros y aleaciones monofásicas requieren un tiempo de ataque químico más largo y más reactivos activos para que sus características estructurales sean adecuadamente reveladas.

La selección del reactivo y el tiempo de ataque está determinado por el metal o aleación y la estructura específica que se desea ver.

Antes del ataque químico, el espécimen debe ser perfectamente lavado con agua y limpiar la superficie pulida con alcohol y secar con aire caliente. El ataque químico es realizado ya sea por frotamiento de la superficie pulida ligeramente con un algodón impregnado con el reactivo, o por inmersión del espécimen en el reactivo contenido en un recipiente llenado parcialmente. En el último caso, el espécimen es suspendido por medio de tenazas en el reactivo y es agitado moderadamente para eliminar la adherencia de burbujas de aire que puedan impedir la reacción química. Después del tiempo necesario de ataque químico y cuando el brillo metálico de la superficie pulida desaparece, el espécimen es retirado del reactivo químico y rápidamente enjuagado bajo un chorro de agua; la superficie del espécimen es entonces limpiada con alcohol metílico, y finalmente secado por insuflación de aire caliente. Si la microestructura no es aún satisfactoriamente revelada bajo el microscopio metalúrgico, el espécimen puede ser atacado por un tiempo más largo. No obstante, no debe emplearse más del tiempo recomendado ya que de lo contrario se dará como resultado una microestructura sobreatacada que es mal definida.

## 2.6 TEORÍA DE LA CORROSIÓN

La corrosión del acero es de principal importancia debido a que este material es empleado profusamente en la construcción de equipos, de tanques, piezas estructurales, etc.

La corrosión consiste esencialmente en las reacciones que pueden producirse debido, tanto a las propiedades físicas y químicas del metal como las existentes en el medio ambiente, así también como las propiedades físicas y químicas del producto de las reacciones entre el metal y el medio ambiente.

La corrosión de un metal implica su oxidación; es decir, que el hierro metálico se desintegra o se convierte en polvo (óxido) amarillo-rojizo, la oxidación puede producirse por dos caminos posibles: **QUÍMICO Y ELECTROQUÍMICO**. Químico cuando un producto químico cualquiera ataca y produce la desintegración del metal y Electroquímico cuando la presencia de otro metal o las imperfecciones del mismo metal produce corrientes eléctricas internas y externas que corroe ciertas áreas del mismo metal.

El proceso de la transformación del hierro metálico en un óxido es de carácter Electroquímico.

En el proceso Electroquímico de la corrosión intervienen varios elementos, a saber: el metal, el oxígeno, la humedad o agua del ambiente y los iones de un medio ambiente determinado.

La corrosión no se lleva a cabo en el metal si algunos de los anteriores factores están ausentes en el medio ambiente en donde esté situado el metal.

Por otro lado para llevarse a cabo el proceso Electroquímico se necesita que haya un ánodo, un cátodo y un electrólito o solución acuosa. Anodos y los cátodos existen en todas las piezas del metal, siendo causadas por las imperfecciones de la superficie orientación de las partículas, falta de homogeneidad del metal, fuerzas localizadas o escamas de laminación.



## MECANISMO DE LA CORROSION

La electroquímica puede explicar satisfactoriamente el fenómeno de la corrosión. En soluciones electrolíticas la corrosión se localiza en ciertas áreas (ánodos) produciéndose un flujo de electrones hacia las áreas no corroídas o protegidas (cátodos). Dicho de otra manera, en la oxidación de metales ferrosos, el ánodo es la zona en donde el metal sufre una reacción de oxidación, produciéndose así iones metálicos y una corriente de electrones la cual se dirige al cátodo; en la región catódica se lleva a cabo la reacción de reducción, dicha reacción es generalmente la reducción de iones hidrógeno y oxígeno disueltos presentes en la solución electrolítica para formar hidrógeno atómico. Esta formación de hidrógeno atómico forma una película muy delgada e invisible y la presencia de esta película impide el progreso de la reacción en dos formas: a) aislando o separando el metal de la solución, b) aumentando la tendencia del hidrógeno a formar parte de la solución a medida que se va depositando y oponiéndose así a la tendencia del metal a entrar en eclosión.

Si esta película permaneciera adherida, la corrosión se detendría inmediatamente; por otro lado si el producto de la disolución del metal fuera insoluble se formaría una capa protectora y el ánodo se obstruiría impidiendo el progreso de la reacción. Sin embargo sabemos que en realidad no ocurre debido a que los productos de la disolución del metal en el acero y hierro son solubles, permitiendo así que la reacción se lleve a cabo si la película de hidrógeno atómico antes mencionada es removida.

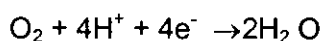
**Existen varias formas de remover esta película de hidrógeno. Si se analizan las reacciones que pueden llevarse a cabo en la región catódica:**

### 1) GENERACION DE HIDROGENO MOLECULAR.

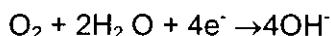


La formación de hidrógeno molecular es una reacción catódica muy común, ya que frecuentemente la corrosión se lleva a cabo en medios ácidos.

### 2) REDUCCION DE OXIGENO (SOLUCIONES ACIDAS).



### 3) REDUCCION DE OXIGENO (soluciones BASICAS O NEUTRAS)



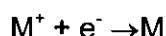




#### 4 ) REDUCCION DE UN METALICO



#### 5 ) DEPOSITO DE UN METAL



La reducción de un ion metálico y el depósito de un metal son reacciones menos comunes y se llevan a cabo en otro tipo de procesos electroquímicos.

La velocidad de una reacción electroquímica puede verse afectada por factores químicos y físicos, se dice entonces que esa reacción esta polarizada (o retardada).

##### A) POLARIZACION POR ACTIVACION

##### B) POLARIZACION POR CONCENTRACION

La polarización por activación está referida a un proceso electroquímico en el cual el paso determinante de la secuencia de reacciones es la transferencia de electrones, la cual se lleva a cabo en la interfase metal-electrolito.

Sé dice que una reacción electroquímica está polarizada por concentración cuando las reacciones están controladas por la difusión de las especies de electrolito.

Generalmente una reacción está polarizada por activación cuando la concentración de especies activas es alta (ácidos concentrados); y una reacción está polarizada por concentración de especies reducibles es baja (ácidos diluidos)

#### FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN

La velocidad y extensión de la corriente depende de las propiedades del metal y de la naturaleza del medio ambiente.

Las propiedades del medio ambiente que influyen fundamentalmente en la corrosión son:

1. - **HUMEDAD RELATIVA** del medio ambiente; es la cantidad de agua que está dispersa en el medio ambiente con vapor, humedad, o rocío etc.
2. - **EL pH**, es decir la cantidad de acidez o alcalinidad que el medio ambiente presenta.

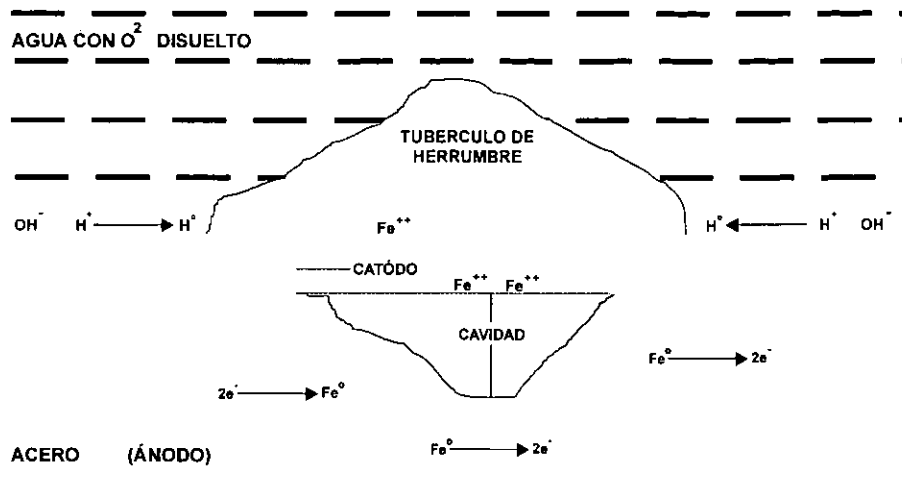


3. - **LA CONCENTRACION DEL OXIGENO** disuelto en el agua.
4. - **LA CONDUCTIVIDAD**; que en conjunto con las sales de la contaminación, oxígeno disuelto y otros productos generan a través del agua ambiental.
5. - **LOS IONES** ya sean cationes (cloruros, sulfatos, fosfatos, etc. ) o aniones (hierro, aluminio, cobre, etc. ) que están presentes en el proceso electroquímico.
6. - **LA TEMPERATURA** del medio ambiente. A mayor temperatura mayor concentración de oxígeno y mayor conductividad del electrolito aumentando así la velocidad de corrosión.
7. - **AL AUMENTAR LA VELOCIDAD DE FLUJO** se provoca una mayor concentración de oxígeno y una mayor concentración de sólidos totales en contacto con el ánodo.

Por otro lado, los factores más importantes del metal que intervienen en la corrosión son los siguientes:

1. - **POTENCIAL DE OXIDACION**, La diferencia de corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo.
2. - **PRESENCIA DE DIFERENTES METALES**. En relación con el hierro tales como aluminio, cobre, magnesio, etc.
3. - **SOBRETENSION** es decir la velocidad de desplazamiento del hidrógeno que se produce en la reacción de oxidación.
4. - **PUREZA DEL METAL** los metales puros deben considerarse casi no corroibles, sin embargo los metales en el mercado son aleaciones fácilmente corroibles.
5. - **EL ESTADO FISICO** de un metal influye en la velocidad de corrosión, básicamente el tamaño de los granos y la orientación de los cristales del metal.
6. - **AREAS RELATIVAS ENTRE EL ANODO Y EL CATODO**, con esto se requiere decir que la corrosión se hace presente cuando el ánodo en área es menor que el cátodo (ejemplo remaches de acero en placas de cobre).
7. - **SOLUBILIDAD** de los productos de corrosión si los productos son insolubles en el agua, se formará una película protectora disminuye así el efecto de la corrosión, de lo contrario la velocidad de corrosión será afectada por el grado de solubilidad.

**En la siguiente figura 2.7 se puede observar el mecanismo de la corrosión:**



### Mecanismo de la Corrosión

Fig 2.7 Mecanismo de la Corrosión

## TIPOS DE CORROSION

El fenómeno de la corrosión lo podemos clasificar de acuerdo a los tipos de formas en los que se manifiesta y a la apariencia del metal que es atacada. Diversas formas se identifican por mera observación visual y algunas pueden ser únicas, pero bastantes otras pueden estar interrelacionadas. Las formas de corrosión que son más comunes a temperatura ambiente son las siguientes:

- CORROSION UNIFORME
- CORROSION GALVANICA
- CORROSION CAVERNOSA O EN HENDIDURA
- CORROSION BAJO PELICULA
- CORROSION POR PICADURA
- CORROSION SELECTIVA
- CORROSION INTERGRANULAR
- CORROSION - EROSION
- CORROSION POR BAJO TENSION (SCO)
- CORROSION POR HIDROGENO
- CORROSION BIOLÓGICA

**CORROSION UNIFORME.** Este tipo de ataque es el más común y normalmente es caracterizado por una reacción electroquímica que procede uniformemente sobre la superficie expuesta, el metal se desgasta uniformemente y eventualmente falla. Cabe aclarar que este ataque desde el punto de vista técnico causa menos problemas que algunos de los otros tipos que se describen más adelante.



**CORROSION GALVANICA.** Cuando dos metales distintos se encuentran inmersos en una solución electrolítica generalmente se establece una diferencia de potencial entre ellos; está produce un flujo de electrones entre ambos metales, uno de ellos se vuelve anódico ya que es el metal menos resistente al ataque en ese medio y el otro se vuelve catódico.

Esta forma se reconoce por la localización del ataque cerca de la unión de ambos metales o aleaciones.

Otra característica importante es la relación de existente entre las áreas catódica y anódica, sería desfavorable una relación de ánodo pequeño y cátodo grande ya que para un flujo de corriente determinado en la celda formada, la densidad de corriente es mayor para un electrodo pequeño que para uno grande; y entre mayor sea la densidad de corriente en el ánodo, mayor será el grado de corrosión.

Los efectos causados por este tipo de ataque son menores a medida que aumenta la distancia del punto en estudio a la unión metálica.

El área afectada puede variar, según sea la conductividad del electrólito, las soluciones con muy baja conductividad (agua pura) el ataque puede manifestarse como una ranura angosta.

**CORROSION CAVERNOSA O EN HENDIDURA.** Este tipo de ataque principalmente es debido a estancamientos de electrólito en zonas determinadas (juntas, agujeros, hendiduras, etc. ) dichas zonas deben ser lo suficientemente anchas como para permitir la entrada del electrólito y lo suficientemente estrechas como para permitir el estancamiento de la solución.

Durante este tipo de corrosión el ataque se localiza en las zonas estancadas, mientras que las demás zonas casi no sufren daño alguno, por lo regular este proceso de corrosión requiere un período de incubación de varios meses, pero una vez iniciado, se lleva a cabo a una velocidad que es cada vez mayor.

**CORROSION BAJO PELICULA (CORROSION FILIFORME).** Esta forma de corrosión es un tipo de corrosión cavernosa; en muchos casos, este tipo de ataque puede ocurrir bajo películas protectoras y se trata de un ataque muy especial, ya que no daña o destruye los componentes metálicos, solo afecta el área superficial.

Bajo películas transparentes, los efectos de este ataque parecen una red de productos de corrosión. Los filamentos consisten en una cabeza activa y un rastro de productos de corrosión.

La variable más importante para que dicho fenómeno se lleve a cabo es la humedad atmosférica. Este tipo de ataque ocurre cuando la humedad está entre 65 % y 90% de humedad relativa; cuando está es menor, el metal no se ve afectado, y cuando es mayor, la corrosión es manifestada por medio de ampollamientos.

El mismo mecanismo de esta forma de corrosión no se ha podido explicar correctamente; se piensa que este ataque es una forma de corrosión cavernosa. Durante el crecimiento, la cabeza del filamento está siendo abastecida de agua por la atmósfera circundante y por la acción osmótica debido a la alta concentración de iones metálicos disueltos.



**CORROSION POR PICADURA.** Esté tipo de ataque se caracteriza por ser sumamente localizado e intenso, teniéndose como resultado perforaciones en la superficie afectada. Esté forma de corrosión es la más destructiva ya que aunque la pérdida global de material causada por el ataque sea mínima, puede causar la falla de un equipo o estructura debido a alguna perforación con extrema rapidez.

Está forma de corrosión generalmente requiere de un período de iniciación, pero una vez que se inició esté proceso de corrosión, esté procede a una velocidad cada vez mayor.

Durante las etapas iniciales de esté proceso, las condiciones para que se desarrolle la picadura son muy inestables. Se ha observado que picaduras recién formadas son inestables y muchas se vuelven inactivas después de poco tiempo de haberse formado. La concentración local particularmente alta en determinado punto, puede variar o anularse debido a varios factores como corrientes de convección; cambiándose así las condiciones y pudiendo así, impedir la formación de la picadura.

Las superficies más propensas a este tipo de ataque son aquellas hechas de aleaciones de acero inoxidable.

**EFFECTOS CAUSADOS POR LA CORROSION EN FORMA DE PICADURA EN DISTINTAS ALEACIONES DE ACERO INOXIDABLE SEGUN SEA EL ELEMENTO QUE SE INCORPORA A LA ALEACION.**

ELEMENTO	EFFECTO CAUSADO EN LA RESISTENCIA EN LA RESISTENCIA AL ATAQUE
CROMO	AUMENTA
NIQUEL	AUMENTA
MOLIBDENO	AUMENTA
SILICIO	DISMINUYE Y AUMENTA CON LA PRESENCIA DE MOLIBDENO
AZUFRE	DISMINUYE
SELENIO	DISMINUYE
CARBON	DISMINUYE
NITROGENO	AUMENTA

**CORROSION SELECTIVA.** Esté tipo de ataque se caracteriza por ser uno de los constituyentes de determinada aleación el que se ve afectado. La selectividad y el grado de ataque estarán determinados por el medio ambiente, debiéndose tomar en cuenta la susceptibilidad de cada uno de los constituyentes de la aleación a determinado medio. El latón es un caso típico. Dicha aleación consiste en un 30% de zinc y 70 % de cobre; cuando está aleación es atacada (por ejemplo por agua caliente), es el zinc el constituyente que se ve afectado. Se ha aceptado un mecanismo que explica esté fenómeno: 1) disolución del metal, 2) se forma iones de zinc en solución, los cuales son más reactivos que los iones cobre. La aleación se debilita hasta que falla.



**CORROSION INTERGRANULAR.** Está forma de ataque de corrosión es causada cuando los límites granulares de un metal son corroídos selectivamente. La causa puede ser la acción galvánica, está resulta de las diferencias de composición existente entre los límites granulares y los granos mismos. Pueden observarse ataques en algunos aceros inoxidable de cromo y níquel que han sido soldados o tratados térmicamente de manera inadecuada. Las zonas son menor contenido de cromo adyacente a las zonas de mal acoplamiento son atacadas (generalmente se necesita más de un 10% de cromo en una aleación para considerar aún acero como inoxidable; si la proporción de cromo disminuye también lo hará su resistencia a la corrosión) debido a que la resistencia a la corrosión ha disminuido en esa zona. Se tienen entonces dos metales con diferentes composiciones en contacto con una relación de áreas desfavorable (ánodo pequeño y cátodo grande) y el resultado es un ataque rápido en el área desprotegida. También reciben ataques intergranulares las aleaciones con base de cobre, tales como los latones.

**CORROSION - EROSION.** Este tipo de ataque es causado por el movimiento relativo de un fluido corrosivo y la superficie metálica. Por lo general, este movimiento es rápido y el fenómeno de abrasión también está involucrado en este tipo de ataque.

La corrosión por erosión se caracteriza por la aparición de bordes, agujeros, zonas desgastadas, etc. Y por lo general muestra un patrón direccional. En muchos casos las fallas en equipos debidas a este tipo de ataque ocurren en un período de tiempo relativamente corto; Siendo muy difíciles de predecir ya que no se pueden correr pruebas experimentales muy exactas.

Muchos metales y aleaciones son susceptibles a daños por este tipo de ataque, la magnitud de los daños depende de la superficie y de la resistencia que este tenga contra algún corrosivo específico.

Todo tipo de equipos expuestos al movimiento de fluidos están sujetos a la corrosión por erosión: tuberías, codos, válvulas, bombas, etc.

**CORROSION BAJO TENSION (SCO).** Los esfuerzos mecánicos a los que son sometidos algunos equipos se manifiestan de alguna manera característica (fatiga, fallas de tensión, etc. ) y la corrosión por su parte se puede manifestar en una de las formas antes descritas. La combinación de estos dos fenómenos produce resultados desastrosos.

Este ataque se manifiesta mediante agrietamientos causados simultáneamente por la presencia de un medio corrosivo específico y un esfuerzo de tensión. Durante la corrosión por esfuerzos la superficie metálica permanece virtualmente intacta, mientras que el ataque se presenta en las grietas formadas. Este agrietamiento tiene serias consecuencias, ya que puede debilitar seriamente al equipo afectado en relativamente poco tiempo, pudiéndose presentar este tipo de ataque dentro de rasgos típicos de diseño de equipo (presiones normales de operación). Las variables más importantes que pueden causar este tipo de ataque son:

Temperatura, composición del electrolito, composición del metal, magnitud del esfuerzo y estructura metálica.

Entre mayor sea el esfuerzo aplicado, menor tiempo tardará en aparecer el agrietamiento; se han hecho estudios para poder determinar el esfuerzo mínimo con el cual se presenta este ataque. En algunos casos se observan agrietamientos con solo el 10% del esfuerzo máximo permisible, siendo cada caso muy particular.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**



Los esfuerzos que pueden ocasionar este tipo de ataque pueden ser debidos a cualquier causa: temperatura, soldaduras o esfuerzos aplicados. Es por eso, que se ha observado este tipo de corrosión en equipos que no han sido sometidos a esfuerzos mecánicos externos muy grandes.

No todos los sistemas metal-medio ambiente son propensos a sufrir este tipo de ataque; por ejemplo, se ha observado que el acero inoxidable se agrieta en presencia de cloruros y cáusticos, pero no sufre ataque alguno en medios con amoníaco, ácido nítrico, sulfúrico, acético o agua pura.

La corrosión por esfuerzos se sabe que se presenta en algunos medios acuosos, en ciertos metales líquidos, sales fundidas y líquidos inorgánicos no acuosos. La presencia de oxidantes normalmente puede tener una marcada influencia en la tendencia al agrietamiento; se ha observado que la presencia de oxígeno u otras especies oxidantes promueve el agrietamiento de aceros inoxidables austeníticos en soluciones de cloruros, y si estas especies oxidantes son eliminadas, no ocurre este agrietamiento.

El mecanismo de acción de este ataque no está del todo esclarecido y la información más útil y confiable se ha obtenido de los experimentos empíricos.

La corrosión juega un papel muy importante en la formación de las grietas; una picadura, cuarteadura o cualquier discontinuidad en la superficie metálica puede actuar como un elevador de esfuerzos. La concentración de esfuerzos en la punta de la ranura es enorme y normalmente se observa que los agrietamientos causados por este tipo de ataque empiezan en la base de la picadura (se pueden encontrar deformaciones plásticas en regiones inmediatas a esta picadura debido a la concentración tan alta de esfuerzos entonces la aleación puede volverse menos resistente al esfuerzo y a la corrosión); el agrietamiento sigue avanzando y debilita gradualmente al equipo hasta que este falla.

**CORROSION POR HIDROGENO.** Este tipo de corrosión está relacionado con el daño mecánico que sufre algún metal causado por la presencia o interacción de este con el hidrogeno. Esta forma de ataque puede clasificarse en tres tipos diferentes:

- 1) AMPOLLAMIENTO POR HIDROGENO
- 2)FRAGILIZACION POR HIDROGENO
- 3)DESCARBURACION

#### 1) AMPOLLAMIENTO POR HIDROGENO

La presencia de este fenómeno es debida a la penetración del hidrógeno en el metal, teniendo como resultado deformaciones locales y en casos extremos, la completa destrucción de la pared del recipiente. Si se analiza una sección de la pared de un tanque protegido mediante protección catódica caso (muy común) expuesto a la atmósfera, y este tanque contiene un electrolito ácido, en la parte interior del tanque se empieza a generar hidrógeno como resultado de la protección catódica.





## 2) FRAGILIZACIÓN POR HIDROGENO

Esté fenómeno es causado por la difusión del hidrógeno a través del metal, teniendo como resultado una pérdida en la ductilidad y resistencia a la tensión del material. El mecanismo de acción de esté tipo de ataque no se conoce a fondo, pero se sabe que la causa inicial de esté tipo de ataque es la misma que en el ampollamiento por hidrógeno: penetración del hidrógeno atómico en la estructura metálica. La gran mayoría de las teorías que tratan de explicar esté fenómeno asocian la acumulación de hidrógeno en microcavidades.

Cuando se aplican corrientes anódicas y se observa que el crecimiento del agrietamiento se acelera, se considera que es un fenómeno de corrosión por esfuerzo en el que el proceso disolución anódica contribuye a la formación de la grieta.

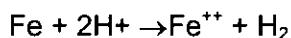


Por otro lado, cuando el agrietamiento es acentuado por corrientes catódicas son atribuidos a la fragilización por nitrógeno.

## 3) DESCARBURIZACION

Existen varias clases de microorganismos que pueden causar la corrosión de tuberías y otras estructuras de acero cuando están enterradas. Para que dicho ataque se lleve acabo, se necesita que el suelo reúna ciertas características tales como alto contenido de materia orgánica, presencia de sulfatos, tiosulfatos, sulfuros, carbonato ferroso y nitratos.

Los microorganismos anaeróbicos contienen la energía necesaria para existir de la reducción de sulfatos de hidrógeno (se necesita materia orgánica para que actúe como donador de hidrógeno). Entonces el hierro tiende a disolverse:



Los iones ferrosos formados reaccionan con el sulfuro de hidrógeno para producir sulfuro ferroso; también se tiene como producto final de la reacción hidrógeno ferroso según la reacción:

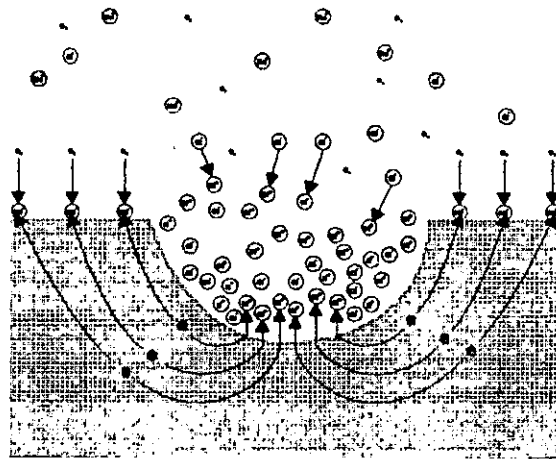


Para existir, otros microorganismos utilizan nitratos o tiosulfatos, substancias que directa o indirectamente causan la corrosión en el acero.

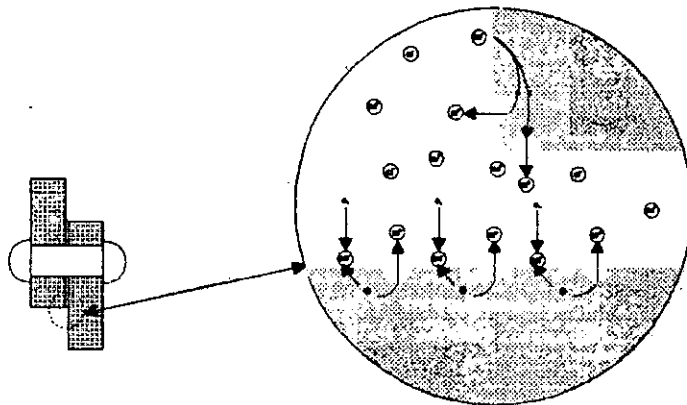
Existen también microorganismos aeróbicos que oxidan el sulfuro o sulfato produciendosé ácido sulfúrico, el cual además de atacar el acero acelera el proceso de corrosión. El color de los productos de corrosión normalmente es oscuro, condición que distingue a estos de los productos normales de cualquier tipo de ataque corrosivo antes mencionado.

A continuación se presentan esquemas **Fig. 2.8** de algunas de las diversas formas de corrosión que se anunciaron anteriormente:

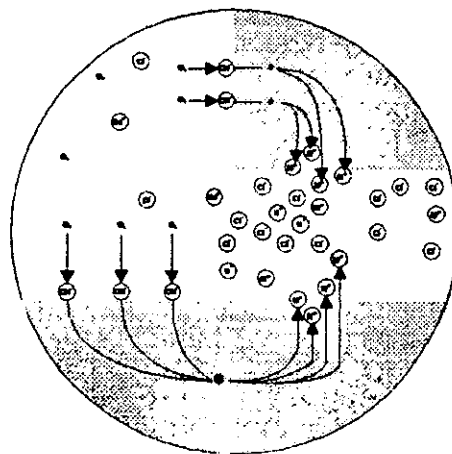




**CORROSIÓN POR PICADURA**



**CORROSIÓN CAVERNOSA ETAPA INICIAL**



**CORROSIÓN CAVERNOSA ETAPA AVANZADA**

**Fig 2.8**



## **METODOS DE CONTROL DE LA CORROSION**

La natural tendencia de los metales a oxidarse o a corroerse es un proceso natural que debe reconocerse como evitable.

### **NO EXISTE UN METODO QUE PUEDA CONSIDERARSE COMO UNIVERSAL.**

Cada caso de corrosión es diferente cada situación debe considerarse y estudiarse en forma individual e independiente; y la metodología a aplicarse deberá basarse en diferentes factores tales como los que se darán a conocer y que son los siguientes:

### ***CALIDA AMBIENTAL, USO TIPICO, GRADO DE SEVERIDAD EN LA CORROSION, COSTOS FACILIDAD DE APLICACION, ETC.***

Los métodos más generalizados para efectuar un control sobre la corrosión, según sean las necesidades de la situación específica; son las siguientes:

- 1. -DISEÑO ADECUADO DEL EQUIPO.-** Realmente la eficacia de un sistema de recubrimiento para protegerlo está íntimamente ligado con el diseño de la estructura. No es muy difícil proteger una superficie plana o lisa a la cual se le puede aplicar una capa continua de espesor apropiado. sin embargo el problema se complica cuando la estructura presenta diversos ángulos, esquinas, soldaduras, remaches o bordes etc.
- 2. -USO DE MATERIALES CON ALTA RESISTENCIA A LA CORROSION.-** Sabemos que en la mayoría de los casos, cualquier material puede ser sustituido por otro de mejor calidad y de mayor resistencia a la corrosión está alternativa está supeditada a los factores económicos normales y ala condición de tolerar la más de las veces el sacrificio de las propiedades físicas, tales como dureza de fatiga de trabajo, resistencia química, etc.
- 3. -MODIFICACION DEL MEDIO AMBIENTE.-** Esté método consiste en controlar las emisiones de humo, vapores o gases corrosivos así como también las descargas, salpicaduras, exposiciones de ácidos, álcalis o productos químicos. El uso de controles de contaminación, como el uso de inhibidores de corrosión en sistemas de abastecimiento de agua, torres de enfriamiento, etc. Son los más comunes que suelen utilizarse.
- 4. -PROTECCION CATODICA.-** La protección catódica es un procedimiento mediante el cual, se alteran con dispositivos externos las características eléctricas de la estructura que se pretende proteger, la aplicación de los sistemas de protección catódica está supeditada a ciertas características de la estructura por proteger y del medio que la rodea.



- 5. PROTECCION POR AISLAMIENTO O POR RECUBRIMIENTO.-** En esta clasificación se entra al terreno de las pinturas y recubrimientos tradicionalmente conocidos, tales como los alquidáticos, vinílicos, uretánicos, etc.

El procedimiento de control de corrosión a base de recubrimientos es el más conocido, empleado y el más experimentado. Pero, sin embargo, la selección correcta de un recubrimiento es una cuestión que requiere un especial cuidado y atención.

- 6.** Debe entenderse por principio "que no existe un recubrimiento bueno para todo" un recubrimiento excelente para proteger contra cierto medio puede ser pésimo en otro. Para poder hacer una buena selección de un recubrimiento se debe hacer por principio de cuentas una identificación correcta del medio o agente corrosivo que pueda actuar con base en lo anterior se pueden determinar las características deseables del material de recubrimiento. Si varios metales satisfacen los requerimientos establecidos, se deberá tener en consideración los factores que influyan en el costo.

Cuando se procede ordenada y racionalmente, y se cuenta además con el apoyo de personal técnico de criterio experimentado y con un laboratorio especializado se reducen a un mínimo las posibilidades de falla.

## **2.7 DESGASTE**

La calidad de la mayoría de los productos de metal depende de la condición de sus superficies y del deterioro de la superficie debido al uso. Este deterioro es importante también en la práctica de la Ingeniería, suele ser el factor principal que limita la vida y el desempeño de las componentes de una máquina. El desgaste se puede definir como el deterioro no intencional resultante del empleo o del ambiente; puede considerarse esencialmente como un fenómeno de superficie.

El desgaste es una de las influencias más destructivas a que están expuestas los metales, y la importancia de la resistencia al desgaste no necesita ampliarse.

El desplazamiento y la separación de las partículas mecánicas de una superficie mecánica puede producirse por contacto con: a) otro metal (desgaste adhesivo metálico), b) un abrasivo metálico o uno no metálico (abrasión), o c) líquidos o gases en movimiento (erosión). La erosión se acompaña generalmente por alguna forma de corrosión.

Los tipos de desgaste mencionados pueden subdividirse en desgaste por fricción rodante o por fricción deslizante y, además, de acuerdo a sí puede utilizarse o no la lubricación.

En la mayoría de los casos ocurren el desgaste abrasivo y el adhesivo. Cada forma de desgaste está afectada por una variedad de condiciones, incluyendo ambiente, tipo de carga aplicada, velocidades relativas de las piezas que se acoplan, lubricante, temperatura, dureza, terminado de la superficie, presencia de partículas extrañas, y composición y compatibilidad de las piezas de acoplamiento implicadas. Como en la mayoría de las aplicaciones mecánicas el desgaste rara vez puede evitarse por completo aun con la mejor lubricación, es práctica común utilizar un metal duro y uno relativamente suave en forma conjunta. El material más suave se emplea (como en un cojinete) para la pieza más económica de reemplazar.



## **MECANISMO DE DESGASTE**

En el desgaste adhesivo, también llamado rayado, erosión, prendimiento y ludimiento de las superficies, pequeñísimas salientes producen fricción por interferencia mecánica, con movimiento relativo de las superficies en contacto que incrementan la resistencia para movimiento ulterior. Si la fuerza de impulso es suficiente para mantener el movimiento, las partículas interlazadas se deforma. Si son de un material frágil, pueden arrancarse de lo cual se llega a la conclusión de que la resistencia al desgaste se mejorará evitando el contacto metal-metal e incrementando la dureza para resistir el mellado inicial, aumentando la tenacidad para resistir la separación violenta de las partículas metálicas, e incrementando la uniformidad de la superficie para eliminar las salientes.

## **FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DESGASTE**

La lubricación es un factor de contribución importante para la resistencia al desgaste, sobre todo en desgaste adhesivo. En lubricación de "película gruesa", una película de lubricación suficientemente gruesa elimina por completo el contacto metálico, y el desgaste metálico se reduce a una cantidad despreciable; sin embargo, ésta es la condición ideal y se da con más frecuencia la "Lubricación límite". Esta es la condición de contacto metálico intermitente que ocurre cuando la película de aceite no puede mantenerse continuamente.

Muchos métodos pueden utilizarse para minimizar el peligro de adhesión.

Uno es emplear capas delgadas de material duro de revestimiento. La utilización de por lo menos un metal que forme alguna clase de película de lubricación o un revestimiento delgado, de óxido, sulfuro o fosfuro estrechamente adherible suele ser útil.

El óxido de aluminio es muy efectivo para evitar la soldadura. Para piezas que funcionan bajo presiones tan altas que la deformación elástica permite contacto íntimo, el mejor método preventivo es un lubricante que se combine con la superficie del metal a fin de formar un producto de "corrosión" de suficiente resistencia para mantener las superficies separadas. El uso de materiales de límite elástico alto minimizará la adherencia debido al contacto íntimo producido por deformación plástica.

El impacto es un factor en el desgaste, ya que la carga aplicada repentinamente puede producir flujo plástico y un cambio en forma, un diseño adecuado debe proporcionar una resistencia a la cedencia comprensiva en la superficie, superior al esfuerzo comprensivo producido por las cargas aplicadas con impacto y superficie soporte, de manera que no ocurra flujo subsuperficial.

La falla se incluye en un estudio de desgaste, ya que es una deterioración gradual debida al uso. Un diseño adecuado para eliminar las concentraciones de esfuerzos en muescas y ángulos agudos incrementará la resistencia a la fatiga.

Como las fallas por fatiga se deben siempre a esfuerzos tensiles, un esfuerzo residual comprensivo en la superficie proporcionará protección adicional. Esto puede llevarse a cabo por endurecimiento superficial como carburación y por picamiento con un chorro de perdigones.

## **PROTECCION CONTRA EL DESGASTE**

Hay disponibles muchos materiales y métodos para proteger el desgaste. La selección de un material y proceso específicos requiere un análisis concienzudo de las condiciones reales de servicio, un conocimiento de la aplicabilidad y limitaciones del material



y procesos particulares, y datos referentes al costo implicado. La falta de datos de Ingeniería disponibles para comparaciones impone la necesidad de que el ingeniero o técnico que selecciona los materiales para soportar el desgaste tenga un buen juicio.

### **Varias técnicas para proporcionar protección a la superficie contra el deterioro son:**

**Electrodeposición.-** La resistencia al desgaste de una pieza de metal puede mejorarse electrodepositando un metal más duro sobre su superficie. Los metales que más a menudo se electrodepositan sobre materiales base son el cromo, el níquel y el rodio. El revestimiento con indio se ha utilizado para reducir el desgaste de cojinetes de plomo.

**Anodizado.-** La formación de una cubierta de óxido por anodizado puede utilizarse para mejorar la resistencia al desgaste de ciertos metales. El proceso de anodizado se aplica generalmente a aluminio, manganeso, zinc y sus aleaciones. En el anodizado, la pieza es el ánodo, y capas de óxido se forman en el metal base. Como la capa de óxido más nueva se forma siempre adyacente al metal base, a fin de que el proceso continúe, las capas de óxido previamente formadas deben ser suficientemente porosas para permitir que los iones de oxígeno pasen a través de ellas.

**Difusión.-** Diversos procesos mejoran la resistencia al desgaste por difusión de algún elemento dentro de las capas de la superficie, a saber: carburación, Cianuración, Carbonitruración, Nitruración, Cromado, Siliciado.

**Rociado metálico.-** El rociado metálico o rociado por llama se ha utilizado por muchos años en la recuperación de piezas para reconstruir, dimensiones que están fuera de tamaño y para separar superficies gastadas. Se ha incrementado su empleo en aplicaciones en donde se requieren recubrimientos resistentes al desgaste.

Las cubiertas rociadas pueden aplicarse por diversos métodos: metalizado, revestimiento metálico por llama, utilizado para depositar mediante un arco de plasma, el cual puede depositar casi todos los materiales inorgánicos.

**Revestimiento duro.-** La producción de una capa superficial dura y resistente al desgaste sobre metales, por soldadura, se conoce como revestimiento duro.

Este método es relativamente fácil de aplicar, requiriendo sólo las aleaciones de revestimiento duro en la forma de varillas de soldar y una llama de oxiacetileno o arco eléctrico. Las ventajas del revestimiento duro son: a) puede aplicarse a áreas sujetas a desgaste, b) están disponibles compuestos duros y resistentes al desgaste, y c) proporciona el uso efectivo de aleaciones caras y una protección a fondo.

**Tratamiento térmico selectivo.-** Los métodos empleados para tratamiento térmico selectivo son el endurecimiento por inducción y el endurecimiento por flama, mismos que constituyen, esencialmente, métodos de endurecimiento poco profundo para producir una superficie externa endurecida y un núcleo relativamente tenaz.



## 2.8 FRACTOGRAFÍA

### PRINCIPIOS Y PROCEDIMIENTOS

La fractografía es la ciencia que estudia la superficie de fractura como parte de la ciencia de la metalurgia. Los dos principales beneficios metalúrgicos de la fractografía son: a) es una herramienta útil en análisis de fallas, y b) proporciona un medio de correlacionar la influencia de la microestructura en el modo de fractura del material.

El estudio de las características de superficie de fractura por fractografía óptica (con microscopio de luz) es ampliamente practicado, particularmente cuando una baja magnificación de la superficie de fractura es adecuada. Este estudio puede ser logrado con equipo relativamente simple.

### PREPARACIÓN Y PRESERVACIÓN DE ESPECÍMENES DE FRACTURA

Cuando una fractura ocurre y al ser sometida a examinación en laboratorio, varios pasos importantes deben ser seguidos si es requerido que los aspectos de la superficie de fractura sean preservados.

El daño mecánico puede originarse a partir de varias causas, incluyendo el permitir simplemente que la superficie de fractura sea golpeada con otros objetos. Esto puede ocurrir durante el acontecimiento de la fractura (como es frecuentemente observado en fallas por fatiga) o en la remoción de una pieza fracturada de sus alrededores o al transportarla de un lugar a otro. Hay también una tendencia de la gente a sobreponer las dos mitades de fractura; esto debe ser evitado, particularmente considerando las características microscópicas examinadas en microfractografía. Los detalles sutiles de superficies de fractura son fácilmente dañados.

El daño químico (corrosión) a una fractura puede ser prevenido en diversas formas. Ya que la identificación de material externo presente en una superficie de fractura puede ser importante en la interpretación total de la causa de fractura, es recomendado no usar recubrimiento preventivo de corrosión en fracturas. Si el análisis de materia externa sobre la superficie de fractura no será requerido ( por ejemplo, en análisis de fracturas producidas en laboratorio), un método satisfactorio de preservar la fractura y evitar corroerse es aplicar un recubrimiento. En campo, la fractura puede ser recubierta con un grado adecuado de grasa para ejes.

### LIMPIEZA DE FRACTURAS METÁLICAS

En numerosos procedimientos de limpieza han sido desarrollados, cada uno adecuado para un metal particular o preferencia de un laboratorio particular. La mayoría de las partes fracturadas que han sufrido exposición extensiva a condiciones ambientales corrosivas generalmente requerirán alguna limpieza. Las técnicas de limpieza comúnmente empleadas incluyen:

- **Insuflación de aire seco**
- **Tratamiento con solventes inorgánicos**
- **Tratamiento con ácidos o soluciones alcalinas**
- **Limpieza ultrasónica con detergentes a base de agua o solventes**
- **Aplicación y retiro de replicas plásticas.**



Ya que la identificación de material externo presente sobre una fractura puede ser importante, muchos laboratorios examinan la superficie de fractura original antes y después de la limpieza. Cepillos de alambre, discos para lijado, pastas removedoras de oxidación o métodos similares nunca deben ser usados para limpiar superficies de fractura.

## **SECCIONAMIENTO DE FRACTURAS**

Frecuentemente es necesario la porción que contiene una fractura de la parte total o reducir el tamaño del espécimen a ser examinado a un tamaño conveniente en manejo.

Para partes grandes, un método común de remoción de especímenes es el corte con flama. El corte debe ser realizado a una distancia suficiente de la fractura de manera que la microestructura del metal subyacente a la superficie de fractura no sea alterado por el calor de la flama y de manera que el metal fundido del corte con flama no sea depositado sobre la superficie de fractura.

El corte por aserrado y corte con disco abrasivo pueden ser usados para partes en un amplio rango de tamaños. El corte en seco es preferible, ya que los refrigerantes pueden corroer la fractura o eliminar materia ajena de la fractura. Un refrigerante puede ser requerido sin embargo, si un corte en seco no puede ser realizado a una distancia suficiente de la fractura para evitar daño por calor. Frecuentemente la fractura puede ser seccionada por aserrado manual. La temperatura y corrosión pueden ser mantenidas a un mínimo usando este método.

## **ABERTURA DE FISURAS SECUNDARIAS**

Cuando una fractura primaria se ha dañado o corroído a un grado que impide proporcionar suficiente información, es deseable abrir algunas fisuras secundarias para exponer sus superficies de fracturas para examinación y estudio. Estas fisuras pueden proporcionar mayor información que la fractura primaria. Esta práctica debe ser usada con precaución sin embargo, ya que el modo de propagación de una fisura secundaria no necesariamente es el mismo que el de la fractura primaria. Una fisura secundaria puede iniciarse por corrosión bajo esfuerzo y propagarse por fatiga, o viceversa. En este caso, el análisis de la fisura puede ser confuso en cuanto a la causa inicial de la falla.

Para evitar cortar, una fisura puede ser forzada a abrirse, formando una región de "fractura en laboratorio". Para aceros, esta práctica de abertura de fisuras puede ser facilitada por inmersión del espécimen en nitrógeno líquido hasta que sea uniformemente enfriado. Esto hace al espécimen frágil, y de esta manera menor energía es requerida para completar la fractura.

## **EFEECTO DE LA INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA**

Muchos de los métodos de inspección no destructivos no son enteramente no destructivos. Los líquidos penetrantes usados para la detección de fisuras pueden corroer las fracturas en algunos metales y ciertamente depositarán compuestos externos sobre las superficies de fractura, los cuales pueden conducir a mal interpretación de la naturaleza de la fractura.

Incluso la inspección con partículas magnéticas, la cual es frecuentemente usada para localizar fisuras en partes ferrosas pueden afectar la examinación posterior.



## FOTOGRAFIA DE PARTES FRACTURADAS Y SUPERFICIES DE FRACTURA

La fotografía de una superficie de fractura debe ser precedida por una examinación detallada del espécimen en la condición como fue recibido para determinar cuales características son las más importantes, cuales aspectos son ajenos ( tales como suciedad o daño mecánico post fractura) y si un tratamiento especial de la superficie será requerido. Esta operación debe iniciarse con examinación visual a simple vista seguido de inspección con lentes magnificadores y estudio con un microscopio estereoscópico de bajo poder.

Las observaciones realizadas en estas inspecciones deberán ser registradas para revisión posterior y determinación de las probables causas de fractura. Una lista debe ser realizada de las características meritorias de fotografía con la magnificación que será probablemente requerida.

El siguiente paso deberá ser la fotografía general de la parte fracturada entera y de las piezas rotas, registrar su tamaño y condición y mostrar como la fractura esta relacionada con los componentes de la parte.

### DISPOSICIONES PARA FOTOGRAFIA DE PARTES FRACTURADAS

Si es posible, es preferible llevar las partes o ensambles al laboratorio para fotografiado, donde factores tales como iluminación pueden ser adecuadamente controlados. Para partes grandes papel de fondo el cual esta disponible en blanco o en colores y en rollos de varios tamaños puede ser usado para proporcionar un fondo inconfundido.

Una disposición factible para fotografiar especímenes y partes pequeñas es con una cámara de enfoque montada verticalmente sobre un pedestal amplificador ( o equivalente ). Los lentes de longitud focal mayor que convenientemente dan la magnificación deseada para cubrir el área de imagen deben ser elegidos.

### CARACTERISTICAS FRACTOGRAFICAS REVELADAS POR MICROSCOPIA DE LUZ

#### MARCAS EN SUPERFICIES DE FRACTURA POR TENSION EN ESPECIMENES NO MUESCADOS

La apariencia macroscópica de una superficie de fractura frecuentemente a sido usada para apreciar el grado de ductilidad y tenacidad presentes en un metal. De acuerdo a los conceptos de mecánica de fractura, la tenacidad es la propiedad critica del material asociada con sobrecarga o fractura rápida. La superficie de fractura contiene marcas que indican las cantidades de alta energía ( dúctil o tenaz ) y baja energía ( frágil ) de extensión de fisura que produjo la fractura.

Las marcas de superficies de fractura por tensión han sido clasificadas en tres zonas de acuerdo a la configuración: a) zona fibrosa, b) zona radial y c) zona de labio de corte;



**Fig. 2.9.** Representación esquemática de zonas dentro de una fractura de tensión de un espécimen cilíndrico no muescado. Las superficies de las zonas fibrosa y radial usualmente son normales al eje de tensión, como se muestra. La superficie de labio de corte siempre está a 45° del eje de tensión.

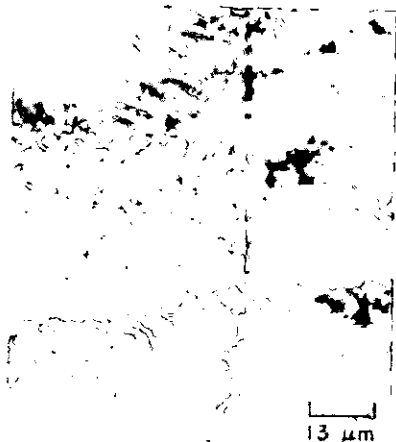




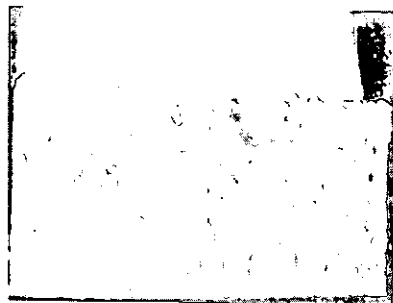


## MARCAS DE TRINQUETE

Son características microscópicas que pueden ser vistas en fracturas por fatiga en ejes y resortes de hoja plana, y pueden también ocurrir en fracturas dúctiles en sujetadores sobrecargados por torsión. En fracturas por fatiga las marcas de trinquete son el resultado de múltiples orígenes de fisuras por fatiga, cada uno produciendo una zona de fisura por fatiga separada. Conforme dos fisuras próximas se unen, un pequeño escalón es formado. Los escalones pequeños son las marcas de trinquete aunque las marcas de trinquete son más aparentes en las periferias de fracturas en ejes, la apariencia escalonada es característica cuando las fisuras por fatiga proceden de varios orígenes y subsecuentemente se unen para formar un principio de fisura principal. Ver **figura 2.12**



Fractografía de luz 750x  
**Fig. 2.11.** Estrias de fatiga en una placa de aleación de aluminio 7075-T651. Note que las finas estrias verticales estrechamente espaciadas a la izquierda del escalón vertical.



Fractografía de luz 7 1/2 x  
**Fig. 2.12** Marcas de trinquete en una placa de aleación de aluminio 7075-T6. La apariencia escalonada de estas marcas es característica siempre que las grietas por fatiga emanen de varios sitios y después se unan para formar un frente de grieta principal.

## DISCONTINUIDADES

Las fracturas se originan a partir de una amplia variedad de discontinuidades dentro de la estructura metálica tales como pliegues y costuras de conformado primario del metal, contracción y cavidades por gas en estructuras fundidas, desgarres, inclusiones, segregación de impurezas e imperfecciones en soldaduras.

## INTERPRETACIÓN DE FRACTOGRAFÍAS ÓPTICAS

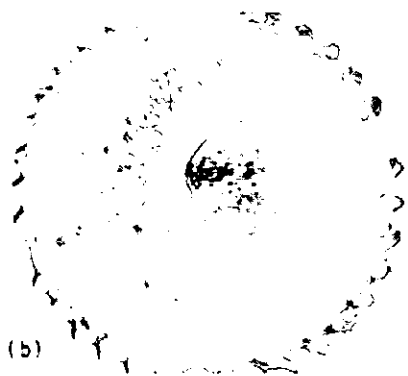
Un conocimiento simple de cómo interpretar una superficie de fractura debe ser obtenido de manera que las fractografías significativas puedan ser tomadas a partir de las cuales describir el proceso de fractura la fractografía puede proporcionar información referente a las condiciones de esfuerzo, los efectos de temperatura y ambiente químico y el origen de la fractura y como la fisura progreso hasta la ruptura final.



## ESTADOS DE ESFUERZO

La información referente a los esfuerzos que causaron una fractura puede ser conocida a partir de una examinación informal de la parte fracturada.

En muchos tipos de fractura, el plano general de fractura es perpendicular al máximo esfuerzo de tensión principal. Estos tipos, llamados fracturas del grupo I en la siguiente discusión, incluyen clivaje y otras fracturas frágiles, fracturas dúctiles (también llamadas coalescencia de microcavidades y ruptura "dimpled") bajo condiciones de deformación plana (en secciones gruesas), fracturas por fatiga (al menos en las etapas intermedias), y fisuras por corrosión bajo esfuerzo.



Fractografía de luz casi 2x  
(b) Superficie de fractura del eje, mostrando la deformación rotatoria característica de una fractura por sobrecarga de torsión simple en un metal dúctil. Si hay una componente de flexión combinada, la región de fractura rápida final estará fuera del centro de la sección. Este tipo de fractura no debe ser confundido con una resultante de fatiga por flexión rotativa, la cual no tiene la gran distorsión observada aquí.

Fig. 2.13. Eje ranurado de acero 6118 que fracturó por una sobrecarga torsional simple.

Fotografía

Casi 2x

(a) Fotografía del eje mostrando la deformación de las ranuras en la región de fractura, lo cual no debería ocurrir si la fractura fuera causada por fatiga. El eje de 28mm de diámetro, fue hecho de acero 6118 y tuvo una dureza de 23 HRC. Siendo hecho de un metal dúctil, fue torsionado en torsión pura con una sobrecarga simple, produciendo la fractura sobre el plano de corte transversal mostrado en (b).

Otros tipos de fractura se propagan a lo largo de planos de esfuerzo cortante máximo. Estos tipos, llamados fracturas del grupo II, incluyen fracturas dúctiles bajo esfuerzo plano (esto es, en secciones delgadas o cerca de las superficies libres), fracturas de corte, y las primeras etapas de fracturas por fatiga en metales puros o relativamente libre de impurezas. En un material dúctil los esfuerzos cortantes causan considerable deformación antes de la fractura aunque la deformación no siempre es notoria ya que la forma de la parte no es cambiada excepto por el flujo en la superficie. La **figura 2.13a** es una fotografía mostrando la deformación en un eje fracturado. Las fracturas por sobrecarga simple torsional (grupo II) de un material usualmente

ocurre en el plano de corte transversal en línea recta a través del cilindro y exhibe una apariencia de remolido indicada (**figura 2.13b**). El área de rotura final estará en el centro de la barra. Un material frágil en torsión pura se fracturará en un plano perpendicular a la componente de esfuerzo de tensión, el cual está a 45° del eje del espécimen (fractura del grupo I). Una fractura de tipo espiral es una característica de este tipo de carga y material, y puede ser demostrada mediante el retorcimiento de una pieza

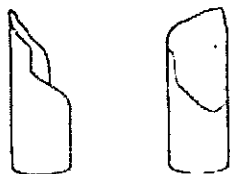
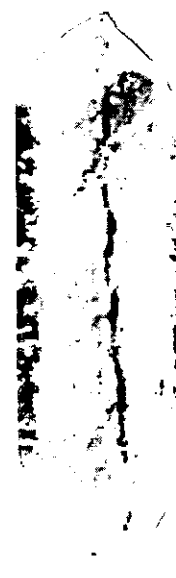


Fig. 2.14. Fractura frágil torsional de un gis. La fractura sigue la dirección a 45° del esfuerzo de tensión máximo.





Fractografía de luz casi 0.95x  
**Fig. 2.15** Una fractura por fatiga torsional en un eje de acero 1037 endurecido por inducción de 25 mm de diámetro que finalmente fracturó en corte longitudinal. Ningún punto de origen es visible ya que las superficies se friccionaron conforme la grieta se propagó.

de una pieza de tiza hasta la fractura (ver **figura 2.14**). La distribución de esfuerzos elásticos en torsión pura es máxima en la superficie y cero en el centro. De esta manera, la fractura normalmente se origina en la región más esforzada (la superficie) en torsión pura. Las fracturas torsionales longitudinales son algunas veces observadas (por ejemplo **figura 2.15**), ya que los planos longitudinales tiene la misma magnitud de esfuerzo cortante como los

planos transversales y los planos longitudinales normalmente tienen menor tenacidad, debido a la forma y distribución de inclusiones.

## ORIGENES DE FISURA

Un interés en la localización exacta del punto de origen de una fractura deriva de la importancia de determinar que inicio la fractura. La examinación inicial de una fractura esta relacionada con el reconocimiento de todas las características que pueden indicar el origen de la fisura.

Aspectos muy notorios de fracturas. Algunas indicaciones de la dirección de propagación de la fisura pueden ser vistos por examinación de los aspectos muy notorios de una parte fracturada. Están relacionados con el orden en el cual los eventos ocurrieron, algunas veces llamado secuencia de fractura. Los fragmentos de una estructura fracturada pueden ser reensamblados en yuxtaposición aproximada sin dejar que la superficie de fractura se toque, y posteriormente las indicaciones deberán ser buscadas.

Primero, una fisura propagándose rápidamente en lamina o placa frecuentemente se bifurcará con forme de propaga pero casi nunca se unirá a otra fisura para continuar como una sola fisura. Segundo, si una fisura propagándose se une a una fractura preexistente, normalmente se unirá a un ángulo de 90°, no en un ángulo llano. Tercero, es casi imposible para una fisura intersectante cruzar y propagarse más allá de una fractura preexistente. Estas consideraciones conducen a las siguientes directrices útiles referentes a los orígenes de fisura:

- La dirección al origen de fisura es siempre opuesto a la de la bifurcación de la fisura, como se muestra en la **figura 2.16**
- Si una fisura se une a otra a casi 90°, ésta ocurrió después y el origen no debe ser buscado en está sino en la fisura anterior. Esto es conocido como método de unión en T de localización de origen de fisura (ver **figura 2.17**)

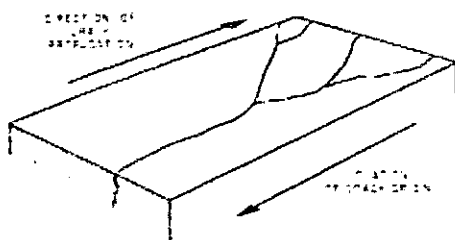


Figura 2.16 Representación esquemática de la información dada por la bifurcación de fisura respecto a la localización del origen de fisura.

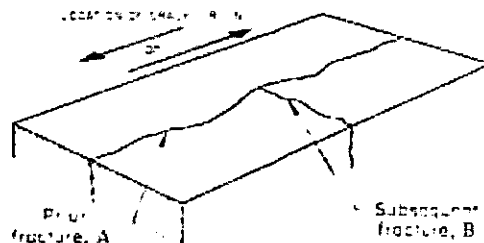
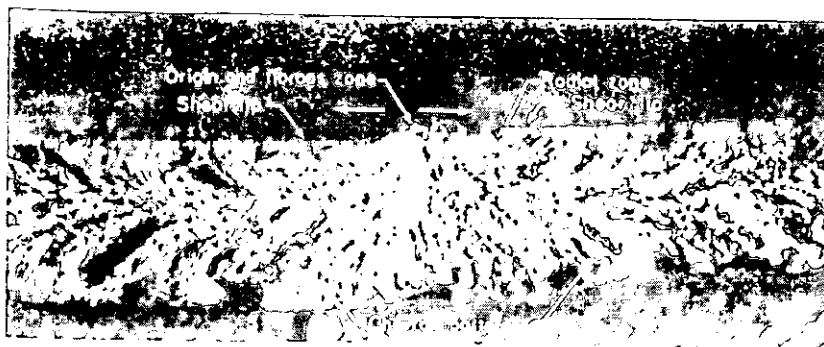


Fig. 2.17 Representación esquemática del método de determinación de la unión en T en el cual la superficie de fractura es investigada para localizar el origen de fisura. Ya que B no atraviesa a A pero se unen a casi 90°, B ocurre después y no puede contener el origen de fisura.



La sección inicial de fractura (conteniendo el origen de fisura) transfiere su carga original a secciones contiguas, en total posibilidad de sobreesforzarlas. Siestas secciones no contienen imperfecciones, las fracturas siguientes (asumiendo una materia normalmente dúctil) serán precedidas por una cierta cantidad de deformación plástica.



Fractografía de luz 6x  
El labio de corte se incrementa en ancho con el incremento de la distancia desde el origen. Las marcas radiales abajo del origen y los patrones chevron a la izquierda y derecha también indican las direcciones de fractura.

Fig. 2.18. Fractura en un recipiente a presión soldado dacero 4340 desplegando un origen plano en la parte superior con un labio de corte iniciando en cada lado de éste.

Las marcas fibrosas, surcos de desgarre y marcas de playa pueden también indicar la localización de un origen de fisura. Las marcas chevron también pueden ser utilizadas. Donde la cobertura de tales marcas es ligera, el origen está generalmente en el lado cóncavo de la curva del principio de la fisura.

En general, la región de inicio de fisura será plana y faltará alguna zona del labio de

corte en la superficie libre. La zona del labio de corte aparece a alguna distancia del origen y será más grande conforme la distancia se incrementa (ver figura 2.18).

## PROGRESO DE LA FRACTURA

Muchos tipos de fracturas incluyendo la mayoría de fracturas en servicio, ocurren por una secuencia que implica inicio de la fisura propagación de fisura subcrítica (debido a la extensión de grieta dúctil, fatiga, fatiga corrosión, fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo o fragilización por hidrogeno), y fractura rápida la cual ocurre cuando la sección transversal restante no puede soportar más tiempo la carga aplicada. Los procesos de fractura dejan marcas reveladoras en las superficies de fractura las cuales permiten localizar los sitios de inicio, discernir la dirección de propagación y forma del principio de grieta, y distinguir la zona de fractura rápida. Esta información puede ser conducida hacia un entendimiento de los niveles de esfuerzo y condiciones que condujeron a la fractura.

## CAMBIOS DE FRACTURA DURANTE LA PROPAGACIÓN DE LA FISURA

Varias influencias pueden afectar el crecimiento de una fisura, causando que está progrese después por un mecanismo de fractura diferente del vigente cuando el fisuramiento inicio. Estas influencias incluyen: a) Diferencias locales en microestructura; b) Cambios en el factor de intensidad de esfuerzo,  $K$ ; c) cambios en el ambiente químico o térmico; d) diferencias en el estado de esfuerzos.

Cambios causados por diferencias locales en estructura. La microestructura ejerce una gran influencia en la apariencia de fractura local; la presencia de dos o más tipos de microestructura, pueden dar como resultado diferentes mecanismos de fractura siendo



implicados, y una apariencia de fractura diferente. Un ejemplo simple es una fractura en una parte de hierro fundido blanco endurecida por temple. La fractura es por clivaje a través de toda la zona endurecida por temple y es fibrosa en la zona perlítica.

Otra diferencia en estructura es aquella de capa endurecida y núcleo en partes carburizadas, endurecidas por flama y endurecidas por inducción la diferencia en propiedades entre tales estructuras pueden causar una fisura que procede por mecanismos de fractura completamente diferentes en regiones adyacentes.

## **MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO Y SU APLICACIÓN EN FRACTOGRAFIA**

### **CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE MICROSCOPIOS ELECTRONICOS DE BARRIDO**

Un microscopio electrónico de barrido ( SEM) es una combinación de dispositivos óptico-electrónicos, de vacío y de control electrónico para hacer chocar un haz de electrones en un punto preciso sobre la superficie de un espécimen y recobrar y desplegar los electrones secundarios emitidos desde el espécimen. El SEM fue desarrollado inicialmente para obtener información referente a la topografía superficial y fue diseñado para complementar las capacidades del microscopio de luz y del microscopio electrónico de transmisión. Sin embargo, el desarrollo de una variedad de capacidades relacionadas han convertido al SEM en una herramienta que puede ser usada para la caracterización total del material.

El SEM es capaz de obtener magnificaciones de 5 a 240,000 x, pero su límite superior útil en fractografía es quizás 30,000 x. Tiene un límite de resolución tan bajo como 5 nm ( 0.2 micropulgadas) dependiendo del equipo utilizado y de las técnicas especiales de preparación de superficies y de las técnicas empleadas. La profundidad de campo es alrededor de 300 veces la del microscopio de luz. Esto corresponde a una profundidad de campo útil de más de 1 mm ( 0.04 pulg) a 100 x y de alrededor de 10 micras (400 micropulgadas) a 10,000 x. Los especímenes pueden ser inclinados cuando mucho 45° en cualquier dirección y aún estar en foco la distancia de trabajo de la apertura del objetivo al espécimen es generalmente de 10 a 25 mm ( 0.4 a 1.0 pulg ).

Un arreglo típico de los componentes de un microscopio electrónico de barrido para uso en fractografía esta integrado de:

.Un disparador de electrones en la parte superior de una columna emite electrones desde un filamento calentado y los acelera en un flujo constante hacia la columna. El espécimen que esta siendo examinado esta cerca de la parte inferior de la columna. Los electrones pasan a través de dos o más lentes electromagnéticos que enfocan el flujo de electrones en la forma de un pequeño rayo de manera que el punto de impacto en el espécimen es de tamaño mínimo la resolución del instrumento es una función del tamaño del punto mínimo.

### **PREPARACIÓN DE ESPECIMENES**

Hay tres requerimientos principales de un espécimen para examinación por microscopía electrónica de barrido. El espécimen debe ser suficientemente pequeño para entrar en la cámara del SEM esto frecuentemente requiere el seccionamiento de la parte fractura. El espécimen debe estar limpio para prevenir contaminación del microscopio y la aplicación de un recubrimiento reductivo puede ser necesaria. Cuando partículas no metálicas tales como suciedad, está, presentes en la superficie de fractura una concentración de carga eléctrica ocurrirá. Esto severamente obstaculiza la examinación



superficial. Los recubrimientos conductivos satisfactoriamente eliminan este problema de manera que un análisis de superficies de fractura minucioso puede tener lugar.

## ESTEREOGRAFIA

Debido a su gran profundidad de campo en microscopio electrónico de barrido produce una imagen tridimensional realista y realiza la interpretación cualitativa de una topografía de fractura relativamente fácil. Si es deseable incrementar el efecto tridimensional, pares estereográficos de fotografías pueden ser tomados de la misma área en el espécimen.

## INTERPRETACION DE FRACTOGRAFIAS DE MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO

A bajas magnificaciones las características en fractografías de microscopio electrónico de barrido (SEM) se parecen grandemente a los aspectos de la fractura evidentes a simple vista; pero a altas magnificaciones, mayor detalle es visible el cual necesita ser categorizado e interpretado si la fractografía tiene que ser relacionada a los micromecanismos de fractura que estuvieron activos.

Es importante darse cuenta de que las características microscópicas generalmente difieren ampliamente dentro de un área pequeña. Las principales categorías de características de fractura son las siguientes:

- Características de clivaje (lengüetas, micromaclas y localización de orígenes de fisuras por clivaje)
- Características de cuasiclivaje
- Hoyuelos a partir de coalescencia de microcavidades
- Surcos de desgarre
- Estrías por fatiga
- Facetas de granos separados, es decir, fractura intergranular
- Características de fractura mixta  
Incluyendo combinaciones binarias de características de clivaje, hoyuelos, desgarres, estrías por fatiga y características de fractura intergranular
- Características de fracturas resultantes de ambientes químicos y térmicos.

## CARACTERISTICAS DE CLIVAJE TRASGRANULAR

En características de clivaje la trayectoria de fractura sigue un plano transgranular que es normalmente un plano cristalográfico bien definido. Este plano es uno de los planos  $\{100\}$  es la mayoría de metales BCC. La característica de clivaje es producida normalmente a baja temperatura, bajo una condición de alto esfuerzo triaxial, es decir, en la raíz de una muesca, o a una alta rapidez de deformación, como por ejemplo, por cargas de impacto, o como resultado de factores ambientales.

La **figura 2.19a** da tres vistas, a magnificación creciente, de un área en una fractura por impacto exhibiendo características que son típicas de clivaje. Es aparente que el plano de fractura cambia de orientación de un grano a otro, como resultado, el tamaño de grano promedio puede ser medido sobre la fractografía y relacionado a las mediciones al tamaño del grano sobre una sección metalográfica en cambio de orientación de un grano a otro conduce a una bifurcación de la fisura a lo largo de diferentes planos y a una apariencia total



muy caótica de la superficie de la fractura. A más alta magnificación muchas características típicas de clivaje pueden ser identificadas en la **figura 2.19b**, la evidencia de cambio en orientación entre el grano a y el grano b es particularmente evidente debido a los patrones de río que inician en el grano b en la interface. Los patrones de río, los cuales representan escalones entre diferentes facetas de clivaje locales del mismo plano de clivaje general, son bien definidos.



Fractografías de SEM  
1560x (a); 3900x (b); 7800x (c)

El espécimen fue inclinado en el microscopio electrónico de barrido a un ángulo de 40° del haz electrónico. Los planos de clivaje seguidos por la fisura muestran diversos alineamientos, influenciados por las orientaciones de los granos individuales. El grano A, en el centro de la fractografía (a), muestra dos conjuntos de lenguetas (ver las puntas de flecha en la fractografía b) como resultado de clivaje local a lo largo de los planos {112} de micromaclas creadas por deformación plástica en la punta de la grieta principal sobre los planos {100}. El grano B y muchas otras facetas muestran los escalones de clivaje de patrones de río. Las uniones de los escalones apuntan en la dirección de propagación de grieta del grano A al grano B, a un ángulo de casi 22° del plano horizontal. Los detalles de estas características son evidentes en la fractografía (c).

Fig. 18. Fractura por clivaje en un espécimen de impacto muescado de un acero 1040 rolando en caliente fracturado a -196°C, mostrada a tres magnificaciones.

## CARACTERÍSTICAS DE CUASICLIVAJE

En aceros que han sido templados para formar martensita y después revenido para precipitar una fina red de partículas de carburo, el tamaño y orientación de los planos de clivaje disponibles dentro de un grano de austenita previa pueden ser mal definidos. Los planos de clivaje real han sido reemplazados por facetas más pequeñas de clivaje mal definidas, las cuales normalmente son iniciadas en partículas de carburo o inclusiones grandes. Las facetas de clivaje pequeñas han sido referidas como planos de cuasiclivaje ya que, aunque parecen planos de clivaje con patrones de

río irradiando desde los sitios de iniciación, hasta recientemente no han sido claramente identificados como planos cristalográficos las características de cuasiclivaje tienden a ser más redondeadas, indicando una absorción de energía un poco mayor que la de clivaje real.

Las facetas de cuasiclivaje en una superficie de fractura de una espécimen de acero 4340 templado y revenido fracturado por impacto a -196°C (-321°F) son mostradas en la **figura 2.20** Las facetas de clivaje mal definidas están conectadas por surcos de desgarre y hoyuelos poco profundos.

El cuasiclivaje, o clivaje en microestructuras complejas es más difícil de identificar que el clivaje encontrado en aceros bajo carbono compuesto de ferrita y perlita. Cuando la identificación es incierta, es esencial relacionar las características de fractura con la microestructura, incluyendo el tamaño de grano de austenita previa, el tamaño de placa de martensita, y la distribución, tamaño, espaciamiento y fracción de volumen de finas partículas de carburo precipitadas durante revenido.



Si la temperatura de fractura es elevada de niveles muy bajos (por ejemplo, temperatura del nitrógeno líquido) a niveles más altos, el mecanismo de fractura cambia de fractura frágil o por clivaje a fractura dúctil por iniciación, crecimiento y coalescencia de microcavidades. A baja magnificación, la superficie de fractura puede exhibir regiones fibrosas y de clivaje. Las regiones fibrosas son normalmente observadas a) Cerca de la superficie libre en una zona del labio de corte, o b) en el origen de fractura en el centro de un espécimen de tensión liso (no muestreado). Las regiones de clivaje son típicamente observadas en las superficies lisas de fracturas lisas de deformación plana y en regiones de alta velocidad de

**HOYUELOS FORMADOS POR COALESCENCIA DE MICROCAVIDADES**

Fig. 2.21c Hoyuelos y facetas de clivaje mostrados en tres aspectos de una fractura de impacto Charpy a temperatura ambiente en un espécimen de acero 1040 roitado en caliente, inclinado en el microscopio electrónico de barrido a un ángulo de 30° del haz de electrones.

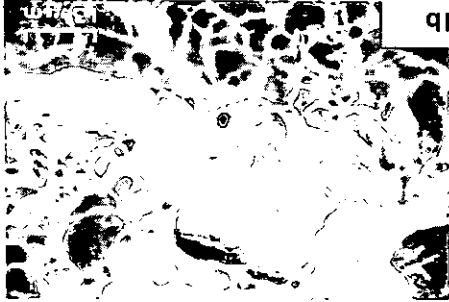


Fig. 2.21b

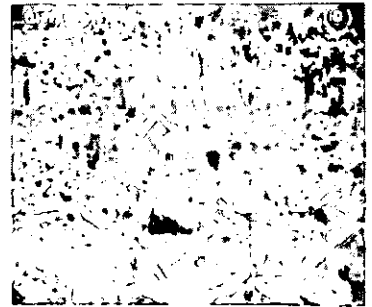
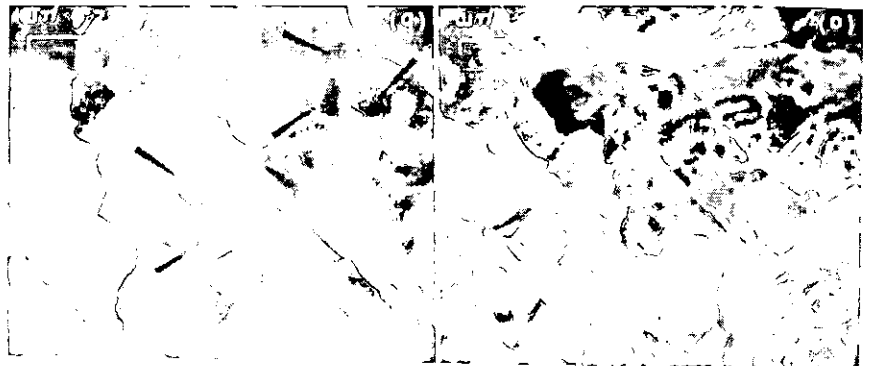


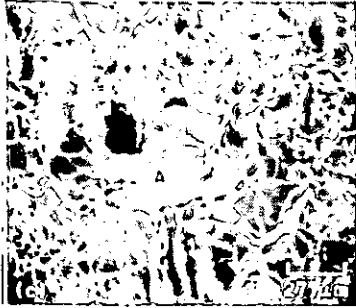
Fig. 2.21a

Fig. 2.20 Cuasiclivaje en la superficie de una fractura de impacto en un espécimen de acero 4340. La misma área es mostrada en ambas fractografías, pero a diferentes magnificaciones.

Fractografías de SEM  
1650x (a); 4140x (b)

Las facetas de clivaje pequeñas en plaquetas de martensita contiene patrones de río y están separados por surcos de desgarre. Los hoyuelos poco profundos marcados por las puntas de flecha son, también visibles. La dirección de propagación de fisura es desde el fondo hasta la parte superior en cada fractografía. El espécimen fue tratado termicamente por una hora a 843°C, templado en aceite y revenido por una hora a 427°C. La fractura fue por impacto Charpy a -196°C.





de la superficie de fractura en esta vista es resultado de clivaje, y la porción inferior es resultado por coalescencia de microcavidades. Las facetas de clivaje en la **figura 2.21a y b** están a una distancia considerable de la muesca, la cual esta debajo de la región mostrada en la fractografía. En la vista de magnificación intermedia de la región de coalescencia de microcavidades (**figura 2.21 c**), la faceta a no puede ser realmente identificada como una característica de fractura por clivaje; puede ser resultado de una fractura a lo largo de una frontera de grano o incluso probablemente una superficie de microcavidad que

se ha extendido. Alrededor de esta faceta es una región de fractura dúctil, la cual se origino en la interfase entre la matriz y una partícula de carburo (en el hoyuelo profundo).

## DESGARRAMIENTO

El desgarramiento indica un mecanismo de fractura local que es frecuentemente encontrado en una discontinuidad en el avance de fisura por otro mecanismo de fractura. Ocurre cuando pequeñas regiones o ligamentos se fracturan con flujo plástico o extricción. El desgarramiento es frecuentemente observado cuando pequeñas áreas no fracturadas quedan detrás del principio de fisura principal. La ocurrencia del desgarramiento es acompañada por la formación de surcos de desgarre, los cuales son típicamente marcados y de esta manera producen contraste brillante en la imagen del SEN. El desgarramiento también puede producir áreas con parte superior plana sin rasgos distintivos teniendo algunas de las características de la desunión de planos de deslizamiento local, similares a la faceta a de la **figura 2.21 c**.

## ESTRIAS POR FATIGA

**Las ventajas ofrecidas por el uso del SEM incluyen:**

- Identificación y evaluación más fácil del origen de la fractura por fatiga, si esta cercano a una superficie libre a un borde, o en el fondo de una muesca por una ranura.
- Mejor diferenciación entre etapas I y II del progreso de la fractura por fatiga visualizando la fractura total a baja magnificación no obtenible con un TEM.
- Estimaciones de rapidez de crecimiento de fisura las cuales son usadas en evaluación de mecánica de fractura de cargas o para estimación del número total de ciclos para falla.
- Análisis cuantitativo más simple de superficie de fractura para determinar qué porciones de superficies de fractura resultaron de coalescencia de microcavidades, de separación intergranular y de fractura por clivaje.



La principal desventaja de microscopía electrónica de barrido para la investigación de fracturas por fatiga es que las estrías por fatiga no son muy bien definidas como por microscopía electrónica de transmisión. Esta falta de resolución ocurre ya que una estría representa solo un pequeño desplazamiento superficial, el cual frecuentemente desaparece en la imagen electrónica. Sombreado la superficie de fractura con una película de oro-paladio de diez nm de espesor, es posible realzar el contraste de las estrías marcadamente. Los espaciamientos de estrías tan pequeños como 25 nm han sido medidos en aleaciones de aluminio con el SEN. Con microscopios electrónicos de barrido que tienen resoluciones mayores de 10 nm, espaciamientos tan pequeños como 10 nm pueden ser resueltos

Es deseable rebelar tanto como sea posible de los detalles superficiales dentro de todas las fisuras secundarias asociadas con la bifurcación de fisuras por fatiga.

Esto puede ser mejor logrado con el espécimen orientado con la dirección de propagación de la fisura apuntando hacia el colector electrónico secundario para obtener máxima penetración del haz de electrones primarios en la profundidad de las fisuras secundarias.

## FRACTURA INTERGRANULAR

La fractura intergranular es simplemente descrita como separación de fronteras de grano puede ocurrir por separación frágil catastrófica, o por separación mas coalescencia de microcavidades en las interfaces de granos. Tales fracturas son consideradas como el resultado de una reducción severa en la energía de frontera de grano por un mecanismo de absorción Gibbsiano ( termodinámico). En su forma más simple, la segregación de impurezas metálicas o de gas- metal pueden alterar la energía libre de frontera de grano. Además, la energía de frontera de grano puede variar sobre un rango de temperatura, conociendo ha transiciones de fractura de frágil a dúctil y fracturas frágiles o dúctiles térmicamente inducidas. Variaciones en segregación en fronteras de grano pueden también conducir a mecanismos mixtos de fractura, caracterizados por la apariencia de áreas con hoyuelos en una fractura intergranular.

La fractura frágil intergranular en la ausencia de un ambiente agresivo puede ser el resultado de segregación de una impureza térmicamente activada, la cual permite que los granos se separen a lo largo de planos interfaciales lisos. Típicos ejemplos de fracturas implicando segregación en las fronteras de grano son mostradas por el tungsteno **fig. 2.22a**, iridio **fig. 2.22b** y una aleación de tungsteno-renio en la **figura 2.22c**.



Fractografía de SEM  
1620X  
Fig. 2.24 Fractura intergranular en una aleación de Cobre CDA No. 715 (Cu-Ni, 30%) que llegó a ser fragilizado por oxidación en fronteras de grano durante exposición prolongada en vapor a alta temp. En un intercambiador de calor. La penetración de fisura (la cual fue cíclica, como capas intergranulares de óxido formado, roto y reformado) produjo finas estrías que podrían ser confundidas con estrías de fatiga

La razón de los mecanismos mixtos de fractura son tan diversas como las fracturas en las cuales han sido observados. Sin embargo, es útil identificar los mecanismos de fractura individuales que contribuyen a tales mezclas y establecer las circunstancias que pueden conducir a su ocurrencia individual. Estas circunstancias establecen límites. La ocurrencia de mecanismos de fractura mixtos usualmente indica que las influencias

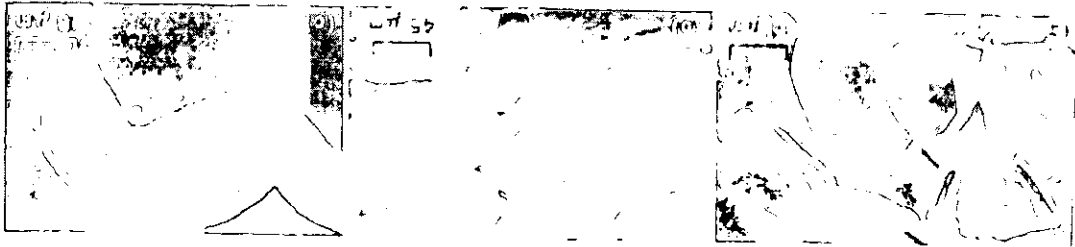
Fractografía de SEM  
Ambas a 2000x  
Fig. 223. Facetas de Clivaje y hoyuelos entremezclados en dos vistas de una fractura por esfuerzo-corrosión en una aleación Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo de dos fases enfrizada por pasos expuesta a una solución de 3.5% NaCl. Facetas de Clivaje formadas en la fase alfa, y hoyuelos mal desarrollados, tales como en los sitios marcados A, formados en la fase beta



Una fractura que ocurre por operación de dos o más mecanismos de fractura entremezclados es generalmente clasificada como una fractura de modo mixto. Esto no debe ser confundido por la operación sucesiva de diferentes mecanismos de fractura los cuales pueden ser analizados secuencialmente y por tanto no requieren especial discusión. La ocurrencia de fractura por mecanismos mixtos frecuentemente indica a) que los factores comunes que determinan el mecanismo operativo, tal como estado de esfuerzo, historia de carga, microestructura y ambiente, favorecen ambos mecanismos; y b) que el mecanismo de fractura local esta determinado por una combinación de desviaciones en esos factores y la influencia de variables secundarias, tales como orientación de grano local.

## CARACTERÍSTICAS INDICATIVAS DE MECANISMOS MIXTOS DE FRACTURA

Fractografías de SEM  
700X(a); 220X(b); 560X(c)  
(a) Rodillo de Tungsteno sintetizado de 1.5 mm del diámetro llegado a su fin, recristalizado por 100 h, a 10<sup>4</sup> torr y 2600°C, y fracturado en tensión. (b) Lamina de Iridio recocida por 50 h, en helio purificado a 1700°C y roto por flexión. (c) Aleación de W-3%Rh que fue Preparada en la misma forma como el rodillo de W sintetizado en la fractografía (a). Microcavidades ("Burbujas") en fronteras de grano resultaron de segregación de potasio (una impureza)





interactuantes han causado que la fractura se aparte de cualquiera de los mecanismos limitantes los mecanismos de fractura mixtos pueden resultar de causas completamente diferentes, y precaución debe ser tomada al inferir la causa de fractura a partir de las características de fractura solamente.

## **CARACTERISTICAS DE FRACTURAS RESULTANTES DE AMBIENTES QUIMICOS Y TERMICOS**

Para un metal o aleación específica, ciertos mecanismos de fractura, tales como clivaje, coalescencia de microcavidades, fatiga y separación intergranular, están frecuentemente asociados con particulares estados ambientales y de esfuerzo.

La acumulación de experiencia con tales fracturas resulta de estados conocidos de ambiente y esfuerzo hace posible comprobar, con la ayuda de fractografía, las causas de fracturas ocurriendo bajo condiciones de servicio no conocidas. Algunos casos en los cuales el ambiente causó una respuesta de fractura específica que puede ser caracterizada a través de fractografía con microscopio electrónico.

## **USO DE FRACTOGRAFIA PARA ANÁLISIS DE FALLAS**

### **ASPECTOS DE FALLA QUE PUEDEN SER RESUELTOS POR FRACTOGRAFIA**

La examinación de una fractura inicia con examen visual el cual establece: a) si hay evidencia de abuso mecánico, b) si hay indicaciones de excesiva corrosión, c) si al parte esta deformada d) si el origen de la fisura puede ser fácilmente identificado, e) si la dirección de propagación de fisura puede ser fácil mente reconocida y f) si hay fracturas secundarias evidentes. Frecuentemente es útil tener una parte no dañada del mismo diseño que el de la parte fracturada disponible durante esta etapa de la examinación. Los resultados de este examen permitirán que muchas conclusiones sean formuladas con respecto a las condiciones de servicio existentes al momento de la fractura y después de ocurrida. Estos resultados pueden ser después ampliados por una examinación de la superficie de la fractura a bajas magnificaciones con un microscopio estereoscópico y después a alta magnificación por microscopía electrónica de barrido, microscopio de transmisión, metalografía, o alguna combinación de estas técnicas de examinación. Una inspección a baja magnificación es importante para identificación de aquellas áreas que necesitan inspección adicional a alta magnificación. Las características sobresalientes son registradas en fractografías de magnificación apropiada para propósitos de reporte.

Debe tenerse cuidado en el manejo de partes fracturadas a ser estudiadas y en la preparación de especímenes. La evidencia que puede ser útil al establecer el origen o mecanismo de fractura puede ser fácilmente alterada o destruida por descuido al reunir las partes fracturadas o realizar el análisis de fallas.

Origen de fisura y trayectoria de propagación de fisura. Establecer el origen de una fractura es esencial en el análisis de fallas, y la localización del origen puede tener una gran influencia al determinar que medidas deben ser tomadas para prevenir una repetición de la fractura. Por ejemplo si el origen de fisura esta en la superficie, alteración superficial por tales medios como endurecimiento superficial, granallado, trabajo en frío y protección contra corrosión pueden eliminar la repetición del problema. Si el origen es subsuperficial, resistencial total más alta, una sección transversal mayor o menos discontinuidades internas pueden ser necesitado. Las características que ayudan a identificar el origen de fisura, tales como marcas fibrosas o concéntricas, marcas radiales y marcas de playa, y las características de la superficie de fractura que muestran la dirección de propagación de



fisura (y a la inversa, la dirección hacia el origen), tales como marcas chevron, bifurcación de fisura y patrones de río, han sido tratados en otras secciones.

Tipo de carga. El diseño de una parte prevé un modo específico de carga en servicio. Sí o no la carga fue como lo esperado es de primordial interés al estudiar una fractura. Mucho puede ser aprendido en cuanto al tipo y magnitud del esfuerzo aplicado a partir de la inspección fractográfica. Obviamente, si el tipo de esfuerzo que causó la fractura es radicalmente diferente del tipo que fue previsto, un cambio de tratamiento en servicio o un nuevo diseño pueden ser requeridos.

Las fracturas por fatiga resultan de crecimiento progresivo de una o más fisuras por fatiga generadas por carga cíclica. Las fisuras pueden iniciar en cualquiera de las diversas discontinuidades superficiales o subsuperficiales. Usualmente la naturaleza repetitiva de los ciclos de carga es reflejada en un crecimiento de manera escalonada de la fisura por fatiga, produciendo las marcas microscópicas paralelas conocidas como estrías por fatiga. Estas pueden ser reconocidas siguiendo las directrices descritas en la sección sobre interpretación de fractografías de SEM.

La ausencia de estrías por fatiga no debe ser interpretado como prueba definitiva de que la parte no sufrió carga cíclica, ya que las estrías son a veces ocultadas o borradas por corrosión. Algunos materiales (aceros de alta resistencia, por ejemplo) forman estrías muy finas las cuales son fácilmente ocultadas o destruidas por roce y numerosos factores ambientales. Como las distintas estrías son dependientes del ambiente al cual la superficie de fractura a sido expuesta y no en su formación. Si la evidencia muestra que una fractura ocurrida por fatiga cuando no fue anticipada, la aplicación de servicio fue evidentemente errónea y debe ser corregida. Para lograr esto, el esfuerzo máximo debe ser reducido o el material debe ser mejorado. En aceros, por ejemplo, a lo más el límite de fatiga es casi la mitad a la resistencia a la fluencia, y puede ser mucho menor si la superficie esta descarburizada o tiene pequeñas discontinuidades.

La orientación del esfuerzo principal aplicado no siempre puede ser explícitamente deducido a partir de una inspección de la superficie de fractura, pero ciertas aproximaciones pueden ser realizadas. Si los hoyuelos son equiaxiales, la fractura probablemente resultó de tensión simple y el eje de esfuerzo probablemente fue normal al plano aproximado de la fractura. Si los hoyuelos están elongados, la fractura fue producida ya sea por corte o por desgarramiento. En una fractura por corte la magnitud del esfuerzo aplicado puede ser cualitativamente inferida a partir de la examinación fractográfica. Las evaluaciones semicuantitativas de niveles de carga pueden ser obtenidas a partir de mediciones de espaciamiento de las estrías, o macroscópicamente, a partir de la fisura crítica antes del comienzo de la fractura rápida. Una evaluación depende del notar si o no la parte a sufrido gran distorsión o flujo plástico evidente. La deformación apreciable resulta solo de un esfuerzo que es alto respecto a la resistencia a la fluencia del material. Otras indicaciones son proporcionadas por las proporciones relativas de diversas características de fractura.

Material de la parte. Muchas preguntas referentes a la relación del material con la fractura pueden ser respondidas a través de fractografía; otras técnicas adicionales requeridas, tales como pruebas mecánicas, metalografía, análisis químico, análisis por microsondeo electrónico, análisis por difracción de rayos x y espectroscopia de Auger. Cuando estas investigaciones son realizadas con equipo auxiliar en un microscopio electrónico de barrido o en uno de transmisión, pueden ser consideradas como procedimientos fractograficos.

La fragilidad o ductilidad pueden ser reveladas por fractografía. En general, una aleación dúctil se fracturara por coalescencia de microcavidades y una aleación frágil se fracturara por clivaje transgranular o por separación intergranular esto es una simplificación excesiva (la mayoría de las fracturas exhiben una combinación de características), pero es la premisa básica.



La examinación metalográfica de secciones normales a la superficie de fractura revelarán la naturaleza de la microestructura y si el tratamiento térmico fue satisfactorio. Si subsecuente sobrecalentamiento ocurrió, una micrografía revelará el efecto que este tuvo. Si las fronteras de grano contienen películas frágiles contribuyendo a fractura intergranular, una micrografía puede mostrarlas.

Las fractografías a alta magnificación mostrarán si en el metal hubo pocas o muchas inclusiones. Las micrografías también revelarán inclusiones, pero las fractografías darán mayor información referente a sus formas, ya que el proceso de fractura usualmente separa la mayor parte de la partícula de inclusión de su cavidad original, permitiendo una vista casi tridimensional.

Si la segregación de elementos o fases de aleación ocurrió en una aleación la fractografía puede a veces detectar el patrón de segregación como una desviación del arreglo normal de las características de fractura. El grado de éxito al identificar segregación dependerá un poco de que tan grande es el patrón de segregación. Si el patrón es extremadamente fino su descubrimiento puede requerir el uso de metalografía en análisis por microsondeo electrónico.

El estudio de la superficie de fractura revelará si discontinuidades por procesamiento condujeron a la iniciación de la fractura. Pliegues y costuras de piezas forjadas son fácilmente reconocidas ya que las superficies de estas imperfecciones tienen ninguna de los rasgos característicos de fractura. Porosidad por contracción en piezas fundidas exhibe contornos de dendritas dentro de las cavidades de contracción que son únicas en forma y que no deben ser confundidas con fractura.

Las soldaduras son también fuentes potenciales de fisuras; las fisuras pueden ocurrir ya sea dentro o en la superficie del metal de soldadura, o pueden formarse en la zona afectada por calor del metal base.

Forma y superficie de la parte. La sobrecarga puede producir notable distorsión de una parte. El examen visual de una parte, a simple vista y con un microscopio estereoscópico de bajo poder, debe incluir una examinación crítica para evidencia de distorsión. Sin embargo, esto dará prueba de sobrecarga solo si la parte tiene alta ductilidad y resistencia a la fluencia relativamente baja. Con partes hechas de aceros de alta resistencia, la prueba de que sobrecargas estuvieron muy por arriba del límite de diseño es más difícil de establecer.

## **AMBIENTES QUIMICOS**

El fisuramiento por corrosión por esfuerzo es proceso de falla mecánico- ambiental en el cual esfuerzo de tensión continua y ataque químico se combinan para iniciar y propagar la fractura en una parte metálica. El fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo es producido por la acción cinérgica de esfuerzo de tensión continuo y un ambiente corrosivo específico, causando falla en menos tiempo que serían los efectos separados del esfuerzo y del ambiente corrosivo.

La falla por fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo frecuentemente es causada por exposición simultánea a un ambiente químico al parecer poco severo y a un esfuerzo de tensión muy por debajo de la resistencia a la fluencia del metal. Bajo tales condiciones, finas fisuras pueden penetrar profundamente en la parte mientras la superficie exhibe solo ligeros signos de corrosión. Por tanto, puede no haber indicaciones microscópicas de una falla inminente.



## EXAMINACION MACROSCOPICA

Microscópicamente, las fracturas producidas por fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo siempre aparecen frágiles, exhibiendo poca o ninguna ductilidad aún en materiales muy tenaces en esta forma se parecen a fracturas por corrosión- fatiga. Muchas fisuras por corrosión bajo esfuerzo transgranulares característicamente cambian de planos de fractura conforme se propagan, produciendo fasetas planas. Estas facetas planas y las facetas de grano de fisuras por corrosión bajo esfuerzo intergranulares son observables a baja magnificación.

Las superficies de fractura usualmente contienen regiones fácilmente identificables de inicio de fisura, propagación de fisura lenta y ruptura final. La ruptura final usualmente ocurre por sobrecarga de tensión. De esta manera, el área de fractura final frecuentemente muestra alguna evidencia de ductibilidad tal como un labio de corte o un patrón de espiga emanando de la zona de fisuramiento lento.

El área de crecimiento de fisura lento frecuentemente contiene productos de corrosión o esta manchada o de otra manera decolorada con respecto al área de fractura rápida final. Sin embargo, la presencia de manchamiento o productos de corrosión sobre la superficie de fractura es por ningún medio prueba positiva de fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo algunas fracturas por fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo no están manchadas o decoloradas, especialmente en materiales con buena resistencia a la corrosión; además, muchas fracturas pueden corroerse antes que la inspección pueda realizarse.

Las zonas de propagación lenta de fisuras por corrosión bajo esfuerzo generalmente son mucho más rugosas en apariencia que aquellas de fisuras por corrosión- fatiga y no contienen marcas de playa por fatiga evidencia macroscópica de trabajo en frío. Sin embargo, si el componente de esfuerzo es eliminado o el ambiente llega a ser inactivo, la propagación de fisura se interrumpirá hasta que esos factores llegan hacer otra vez operantes. Esto a veces dará como resultado marcas macroscópicas similares en apariencia a las marcas de playa características de fracturas por fatiga.

Ambos tipos de fractura pueden, iniciar en picaduras por corrosión u otros concentradores de esfuerzo en la superficie de la parte sin embargo, si el ambiente es suficientemente corrosivo y si los esfuerzos de tensión están presentes, el fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo puede ser iniciado incluso en superficies lisas, mientras que la corrosión- fatiga siempre es iniciada en un concentrador de esfuerzos.

Las fracturas causadas por cualquiera de estos mecanismos siempre inician en la superficie de la parte o en la misma localización donde la especie agresiva puede ponerse en contacto con el metal. Por consecuencia, si es encontrado que la fisura tiene un origen subsuperficial, el fisuramiento por corrosión-fatiga y corrosión bajo esfuerzo normalmente pueden ser eliminados como posibles causas de falla.

Las fisuras producidas por corrosión bajo esfuerzo y por algún proceso de daño por hidrogeno generalmente tienen características de fractura microscópicamente burdas, las cuales usualmente están decoloradas por reacción con el ambiente. Estos mecanismos son fácilmente reconocidos como macroscópicamente diferentes de corrosión-fatiga, pero identificar el mecanismo exacto por macroexaminación solamente no siempre es posible. Estas fisuras no siempre tienen distintos orígenes; puede haber mucha picadura en la región de iniciación de fisura, y la fisura puede exhibir bifurcación en esta región.

La correlación cuidadosa de la topografía de superficies de fractura microscópica con características de superficies de fractura macroscópicas es esencial. La región de inicio de fisura y las direcciones del crecimiento de fisura deben ser identificadas exactamente de manera que la información referente a la secuencia de eventos y los micromecanismos de fractura, observados por microscopía electrónica, pueden ser correlacionada con las circunstancias de iniciación de fisura y los mecanismos de propagación de fisura.





Frecuentemente, varios mecanismos de fractura diferentes son observados en una sola superficie de fractura. Por consiguiente, la identificación correcta del mecanismo de fractura iniciante y de algunos cambios en el micromecanismo durante la propagación de la fractura es de vital importancia para llegar a un correcto entendimiento de la falla.

Es difícil distinguir entre fallas de servicio por fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo y otro daño por hidrogeno solamente a partir de evidencia microfractografica. Las fracturas de ambos tipos siguen principalmente trayectorias intergranulares aunque el fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo es a veces transgranular, y las superficies de ambos tipos de fractura pueden estar sustancialmente corroídas. Además, la evolución de hidrogeno durante el fisuramiento por corrosión bajo esfuerzo puede ser un factor en el proceso de fisuramiento, de manera que la combinación de fragilización por hidrogeno y corrosión en la punta de la fisura pueden contribuir a producir separación de las fronteras de grano.

## **EXAMINACION MICROSCOPICA**

La examinación por microscopía de luz y microscopía electrónica pueden ser usadas para observar características muy pequeñas en superficies corroídas, para evaluar las microestructuras de las partes metálicas, y para observar la manera en la cual, y la extensión a la cual, el metal fue atacado por el agente corrosivo.

Superficies corroídas. Visualizando la superficie limpiada con un microscopio estereoscópico muestra grandes características topográficas tales como picadura, fisuramiento y patrones superficiales que pueden proporcionar información acerca del mecanismo de falla, si la corrosión fue el único fenómeno implicado; el tipo de corrosión, y si otros mecanismos, tales como desgaste y fractura, también fueron operantes.

Si las características no pueden ser claramente observadas usando un microscopio estereoscópico, un microscopio electrónico de barrido frecuentemente puede resolver las características, especialmente en superficies muy rugosas.

Microestructura. La examinación microscópica de secciones pulidas o pulidas y atacadas pueden revelar no solo Características microestructurales y daño adicional tal como fisuramiento, sino también en la manera en la cual el agente corrosivo a atacado al metal (tal como ataque en fronteras de grano o selectivo).

Es deseable conservar los productos de corrosión si poseen suficiente cohesión y dureza para ser pulidos. Un método de mantener el material superficial en su lugar es impregnar la muestra con una resina de tipo vaciable, la cual es dejada endurecer antes de que los especímenes sean cortados. Pulir sobre paños no felpados con abrasivos de diamante es recomendado para asegurar la calidad máxima de retención de bordes.

## CAPÍTULO 3



# MECANISMOS DE FALLA Y TIPOS DE FRACTURA



# MECANISMOS DE FALLA Y TIPOS DE FRACTURA

---

## 3.1 DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Cuando un material se tensa por debajo de su límite elástico, la deformación resultante es temporal. La supresión del esfuerzo da como resultado un retorno gradual del objeto a sus dimensiones originales. Cuando un material se tensa más allá de su límite elástico tiene lugar una deformación plástica o permanente, y no regresará a su forma original por la sola aplicación de una fuerza.

La posibilidad de que un metal sufra deformación plástica es probablemente su característica más relevante en comparación con otros materiales. Todas las operaciones de formado, como son troquelado, prensado, hilado, laminado o rolado, forjado, estirado y extrusión, se relacionan con la deformación plástica de los metales. Varias operaciones de maquinado, como fresado, torneado, corte con sierra y punzado también se relacionan con la deformación plástica. El comportamiento de un metal cuando se deforma plásticamente y el mecanismo mediante el cual ocurre son de interés esencial para perfeccionar la operación de trabajo.

Se puede obtener información respecto al mecanismo de deformación plástica al estudiar el comportamiento de un monocristal sujeto a esfuerzo y aplicando más tarde este conocimiento a un material policristalino.

La deformación plástica puede tener lugar por deslizamiento, por maclaje o mediante una combinación de ambos procesos.

## 3.2 DISLOCACIONES

La deformación plástica no recuperable de las substancias cristalinas, se realiza principalmente a través de los movimientos de imperfecciones cristalinas denominadas dislocaciones. El aumento de esfuerzo requerido para continuar la deformación plástica, producida por interacciones entre numerosas dislocaciones, se denomina endurecimiento por trabajo. Las dislocaciones pueden existir en cristales debido a fallas de crecimiento, pero en general la acción de un esfuerzo omitiéndolas de manera sucesiva.

Al aplicar un esfuerzo cortante  $\tau$  en un plano cristalino, se produce un desplazamiento atómico con respecto a las posiciones originales ( $\delta$ ) esto se ilustra en la **figura 3.1** si el desplazamiento es pequeño, la deformación es elástica; Esto es, al eliminar el esfuerzo los átomos retroceden y ocupan sus posiciones originales. Sin embargo si el desplazamiento es tan elevado que traslade al átomo 1 a una posición intermedia entre los átomos dos y cuatro, pasa a ocupar ahora una posición de equilibrio metaestable con respecto a aquéllos y puede colocarse con igual facilidad en la posición sobre el átomo 4 o sobre su vecino original al átomo 2.

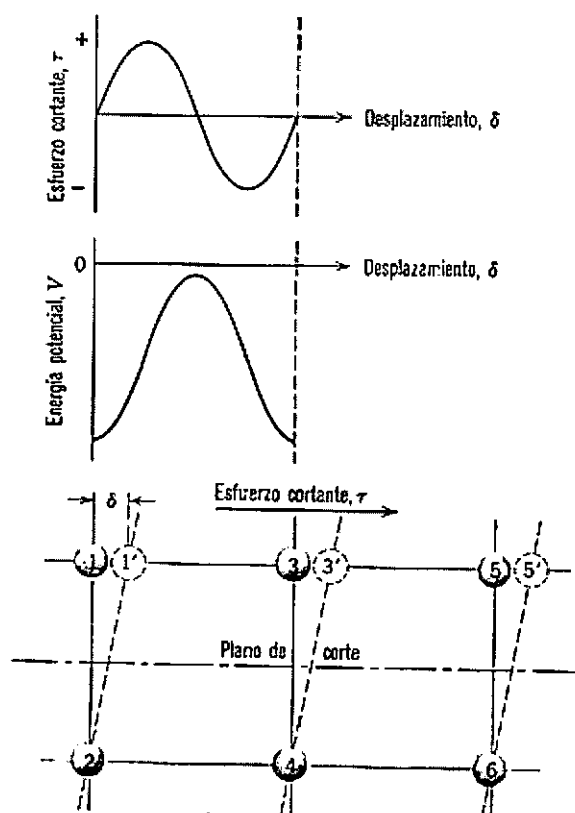
Puede observarse en la **figura 3.1**, la cual muestra la variación cualitativa de esfuerzo cortante  $\tau$  y energía potencial  $V$  con el desplazamiento  $\delta$ , que en el punto intermedio no se requiere ningún esfuerzo cortante para producir un desplazamiento en cualquier dirección. Esta situación es inestable, y un desplazamiento cualquiera disminuirá la energía total. Si bajo la influencia del esfuerzo cortante, el átomo 1 se coloca sobre el átomo 4, la simetría de la red cristalina se restaura, pero los átomos en ambos lados del plano de



corte tendrán vecinos inmediatos diferentes de los originales. En esta situación decimos que el cristal se ha deslizado o que ha sufrido deformación plástica.

Si dos planos atómicos completos y perfectos se deslizan uno sobre el otro, el esfuerzo cortante deberá sobrepasar la fuerza de atracción entre cada átomo en un plano y su vecino inmediato en el plano adyacente.

Sin embargo, los valores experimentales medidos en monocristales del tipo CCC son del orden de  $10^1$  a  $10^3$  lb/pulg<sup>2</sup>. El comportamiento plástico de materiales cristalinos depende en el movimiento e interacción de las dislocaciones. Antes de tratar los aspectos macroscópico y microscópico de cedencia y deformación plástica, consideramos brevemente el movimiento de dislocaciones.



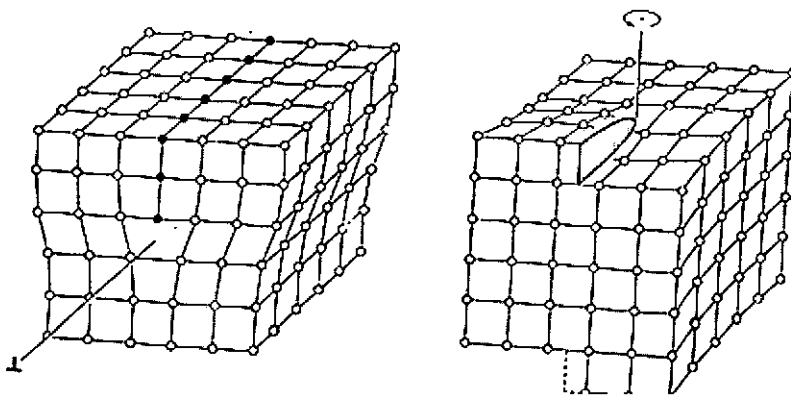
**Figura 3.1** Variación de esfuerzo cortante  $\tau$ , y energía potencial  $V$ ,  
Con el desplazamiento  $\delta$ .



## GEOMETRIA DE LAS DISLOCACIONES

Podemos considerar que, en general, una dislocación tiene dos componentes, una de borde y otra de tornillo.

Como se observa en la **figura 3.2** se ilustra la geometría de las irregularidades de la red cristalina descrita por estas dos componentes, éstas se consideran como dos clases de dislocaciones simples. Con objeto de simplificar, se representa una dislocación por líneas de dislocaciones, las que describe el centro de la dislocación, y están representadas en la **figura 3.2**



**Fig. 3.2 Geometría de las dislocaciones simples: a) dislocación de borde y b) dislocación de Tornillo se indican las líneas usadas normalmente para la representación de las dislocaciones así como los símbolos para éstas  $\perp$  y  $\ominus$**

El vector de Burgers  $b$  es una propiedad de la dislocación (ver la **figura 3.3**). Este describe simultáneamente la magnitud y dirección del deslizamiento. Un circuito de átomos alrededor de la dislocación, está incompleto por una distancia igual al vector de Burgers, en contraposición al de los átomos de un cristal perfecto, que estaría completo. La longitud del vector de Burgers es una distancia atómica integral ya que la red cristalina debe tener continuidad a través de las regiones deslizadas y sin deslizar.

Si examinamos el movimiento de una dislocación de borde y una de tornillo (**figura 3.3a y b**) se observa que la línea de la dislocación representa el límite entre las regiones deslizadas y sin deslizar del cristal. Bajo esta condición, una línea de dislocación deberá interceptar la superficie del cristal o cortarse a sí misma en su interior. A través del cristal la línea de la dislocación puede extenderse como una dislocación pura de borde, en una regiones, como una dislocación de tornillo en otras y como un híbrido de ambas regiones diferentes a las anteriores. El vector de Burgers de una dislocación de borde es perpendicular a la línea de la dislocación, el de una dislocación de tornillo es paralela a la línea de la dislocación, y el de una dislocación híbrida hace un ángulo con la línea de la dislocación. Como se muestra en la **figura 3.4**, un circuito de dislocaciones cerrado tiene características de borde en algunas regiones, y de tornillo en otras, pero su vector de Burgers es el mismo en todos los puntos a lo largo de la dislocación. El vector de Burgers y



la línea de la dislocación de una de borde o mixta, definen el plano de deslizamiento. En condiciones normales estas dislocaciones están obligadas a moverse en este plano de deslizamiento. Por otro lado, el vector de Burgers y la línea de la dislocación de una pura de tornillo, son paralelos y no definen un plano único. La dislocación de tornillo queda entonces en libertad de moverse en cualquiera de los diferentes planos en los cuales esta contenido el vector de Burgers.

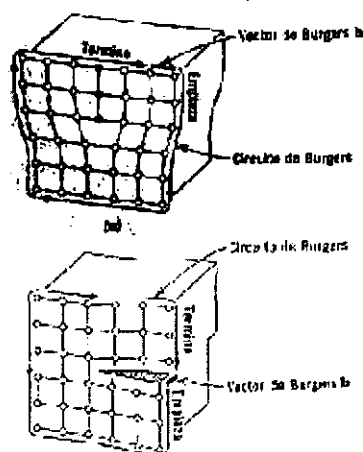


Fig. 3.3 Vector de Burgers y circuito de Burgers: (a) Una dislocación de borde; (b) Una dislocación de tornillo.

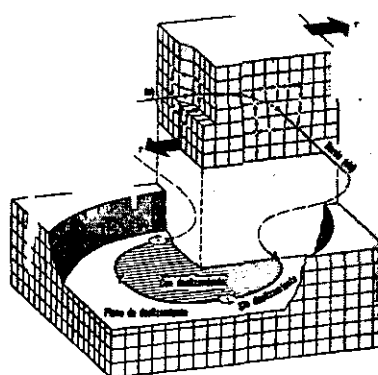


Fig. 3.4 Geometría de un circuito de dislocación cerrado mostrando en una sección separada, regiones con dislocaciones puras de borde y de tornillo.

## MOVIMIENTO DE DISLOCACIONES

Como el caso más simple de movimiento de dislocaciones consideramos el movimiento en un monocristal de la dislocación de borde de la **figura 3.5**

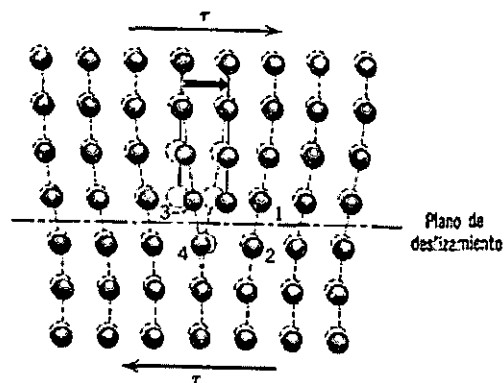


Fig. 3.5 Cambios de Ordenación atómicos

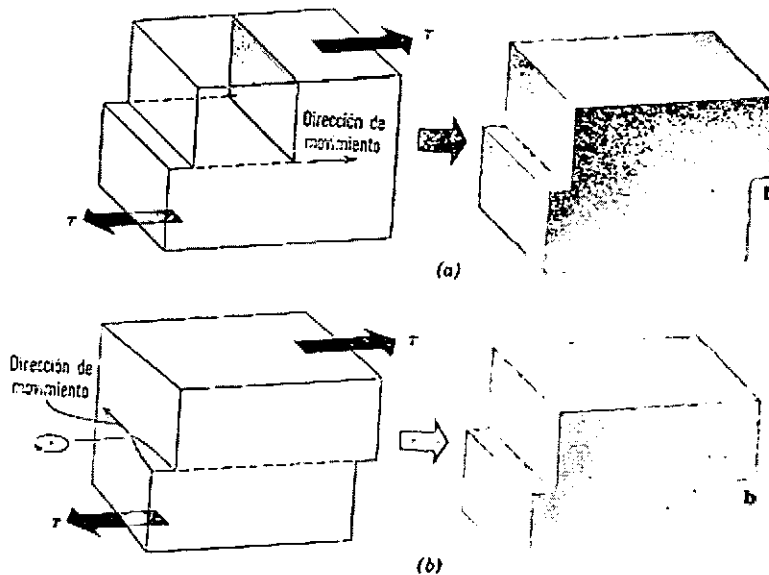
la cual se mueve hacia la derecha bajo la influencia de un esfuerzo cortante  $\tau$ . Este deberá realizar un trabajo para separar al átomo 1 de su vecino inmediato, el átomo 2; al



mismo tiempo, sin embargo, el átomo 3 se desplaza a una posición más cercana a la distancia de equilibrio con su vecino y inmediato, el átomo 4, cediendo así una cantidad de energía elástica almacenada casi igual a la que se almacena al desplazar el átomo 1.

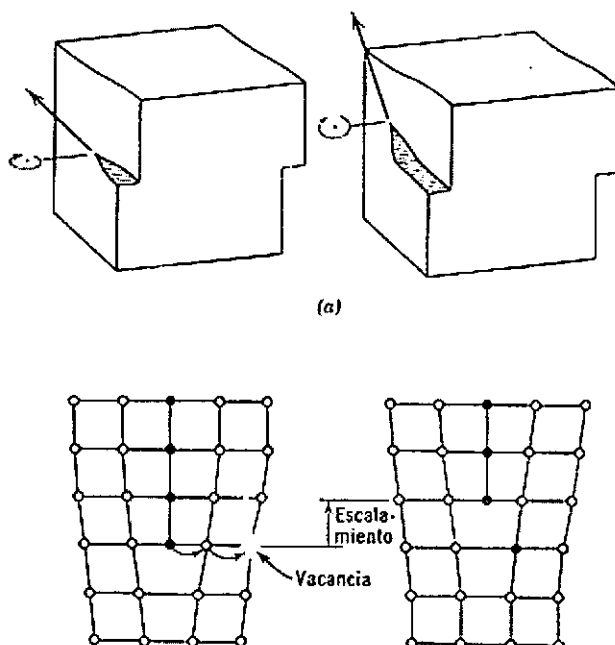
Si el esfuerzo mueve la dislocación hacia la derecha, ésta emerge de la superficie del bloque y da origen a un escalón (ver **figura 3.6**). En este momento la dislocación se ha desplazado a través del plano de deslizamiento dando origen a una unidad de deslizamiento.

Note que la dislocación de borde de la **figura 3.6** se mueve en dirección paralela a su vector de Burgers, mientras que la dislocación de tornillo lo hace en forma perpendicular.



**Fig. 3.6 La creación de un escalón de deslizamiento por: (a) Una dislocación De borde y (b) Una dislocación de Tornillo, a medida que cada una Recorre el plano de deslizamiento bajo la acción de un esfuerzo cortante.**

bajo ciertas circunstancias es posible que las dislocaciones eviten los obstáculos cambiándose a otros planos de deslizamiento. La **figura 3.7a** ilustra este cambio efectuado por una dislocación de tornillo durante su deslizamiento; el proceso se denomina deslizamiento cruzado. Una dislocación de borde o mixta está por lo general restringida a moverse en un plano que contiene la línea de la dislocación y el vector de Burgers. Sin embargo, si puede eliminarse la hilera inferior de átomos de la mitad de plano extra en una dislocación de borde, o si se agrega una hilera extra de átomos, la mitad de plano terminará entonces en un plano paralelo contiguo y la dislocación estará entonces en libertad de moverse en este nuevo plano. Este proceso denominado escalonamiento de dislocaciones se realiza por difusión de vacancias a la dislocación y por translación de átomos de la hilera inferior en la mitad extra de plano hacia vacancias adyacentes, del mismo modo, la dislocación puede hacer un escalonamiento descendente produciendo vacancias en el volumen inferior adyacente a la mitad de plano. Debido a que la concentración de equilibrio de vacancias aumenta con la temperatura, la posibilidad de escalonamiento de dislocaciones es sensible a una variación de este parámetro el escalonamiento de una dislocación de borde se ilustra en la **figura 3.7b**.



**Fig. 3.7 (a) Deslizamiento cruzado de una dislocación de tornillo y (b) escalamiento de una dislocación de borde.**

A continuación se hace un resumen de varias interacciones simples entre las dislocaciones de borde paralelas.

1. Dos dislocaciones de borde paralelas, con signos iguales y en un mismo plano de deslizamiento o en planos cercanos, se rechazan. Dos dislocaciones de borde paralelas, del mismo signo, pero en planos muy separados uno del otro, se atraen o rechazan dependiendo de que el ángulo entre la dirección de deslizamiento y una línea uniendo las dos dislocaciones, sea respectivamente mayor o menor a 45 grados.

2. Dos dislocaciones paralelas, con signo opuesto y en el mismo plano de deslizamiento o en planos muy cercanos, se atraen: a) Si están en el mismo plano se acercan, aniquilando una a la otra y dejan una red cristalina perfecta; b) si están en planos vecinos se atraen y aniquilan, pero dejan una hilera de vacancias o una de átomos intersticiales.

3. Los átomos de soluto intersticiales, de tamaño pequeño, emigran a la región bajo tensión de una dislocación de borde ya que allí contribuyen a disminuir la energía de deformación; en forma similar, los átomos sustitucionales pequeños emigran a la región de compresión de la misma dislocación, en donde reemplazando a un átomo de la matriz, de mayor tamaño, disminuyen la energía de deformación. Por el contrario, debido a que no hay un cambio en volumen asociado con una dislocación de tornillo, no existe una tendencia similar a la anterior para la localización de los átomos de soluto.

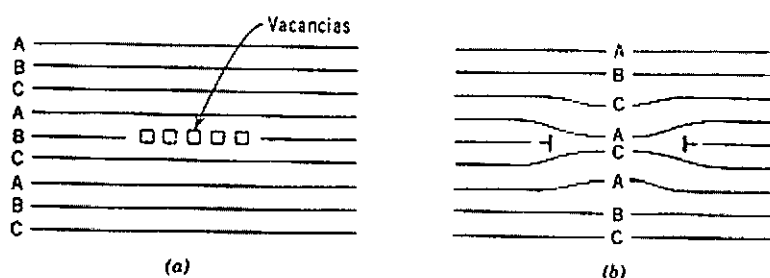
Las dislocaciones paralelas, en planos diferentes, pueden encontrarse y reaccionar para formar una dislocación inmóvil.





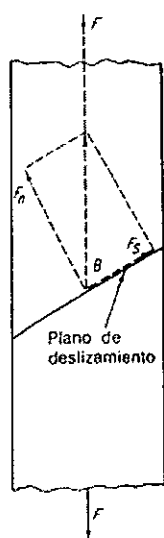
La condensación de vacancias puede también dar origen a dislocaciones inmovilizadas. Debido a que la solubilidad de equilibrio de vacancias disminuye al disminuir la temperatura, una red cristalina puede sobresaturarse al ser enfriada. Si el régimen de enfriamiento es muy rápido para permitir que las vacancias se difundan a regiones receptoras, tales como superficies, límites de granos, o dislocaciones, éstas pueden precipitar en grupos los cuales una vez que alcancen un cierto tamaño se acumulan para formar circuitos prismáticos de dislocaciones (**figura 3.8**).

En materiales CCC estos circuitos están inmovilizados y encierran un área de falla de apilamiento perpendicular al plano en el cual está contenido el circuito.



**Fig. 3.8 (a) Acumulación de grupos de vacancias para formar, (b) Circuitos de dislocaciones, encerrando un área a través de la cual el orden de apilamiento difiere del orden característico en el cristal.**

### 3.3 DESLIZAMIENTO



Si el monocristal de un metal es esforzado tensilmente más allá de su límite elástico, se alarga en forma ligera, aparece un escalón sobre la superficie indicando un desplazamiento relativo de una parte del cristal con respecto al resto y la elongación se detiene. Al aumentar la carga se producirá movimiento en otro plano paralelo y dará como resultado otro escalón.

Es como si delgadas secciones vecinas del cristal se hubieran deslizado una sobre la otra como cartas de baraja. Cada alargamiento sucesivo necesita un esfuerzo aplicado mayor y resulta en la aparición de otro escalón, que es realmente la intersección del cristal. El aumento progresivo de la carga eventualmente produce fractura del material.

Las investigaciones han demostrado que el deslizamiento ocurría en ciertos planos de átomos en el cristal y a lo largo de ciertas direcciones en estos planos. El mecanismo mediante el cual un metal es

**Fig. 3.9 Componentes de Fuerza sobre un plano de deslizamiento**

deformado plásticamente se mostró de esta manera, que era un nuevo tipo de flujo, ampliamente distinto del flujo de líquidos o gases. Es un flujo que depende de la estructura perfectamente repetitiva del cristal que permite que los átomos en una cara de un plano de deslizamiento se rompan por esfuerzo cortante de sus vecinos originales de la otra



cara, llevando su propia mitad del cristal con ellos y por último unirse otra vez en un nuevo conjunto de vecinos casi tan perfectamente como antes.

La investigación de la orientación del plano de deslizamiento respecto al esfuerzo aplicado indica que el deslizamiento se presente como resultado de un simple esfuerzo cortante. La descomposición de la carga tensil axial  $F$  en la figura 3.9 da como resultado dos cargas: una tangencial o rasante ( $F_s = F \cos \theta$ ) a lo largo del plano de deslizamiento es  $A/\sin \theta$ , donde  $A$  es el área transversal perpendicular a  $F$ .

los esfuerzos resultantes son:

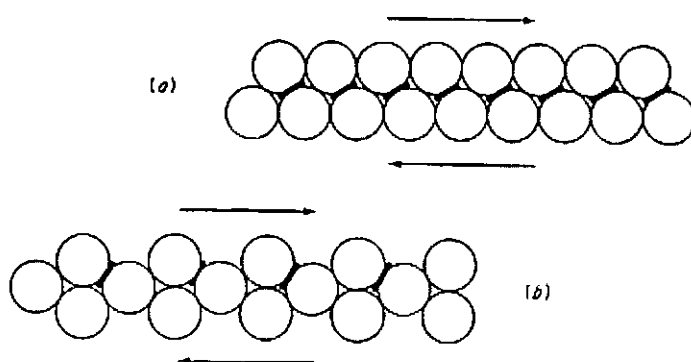
$$\text{Esfuerzo Cortante } S_s = \frac{F \cos \theta}{A / \sin \theta} = \frac{F}{A} \cos \theta \quad \sin \theta = \frac{F}{2A} \sin 2\theta \quad (3.1)$$

$$\text{Esfuerzo Normal } S_n = \frac{F \sin \theta}{A / \sin \theta} = \frac{F}{A} \sin^2 \theta \quad (3.2)$$

De la ecuación es evidente que el esfuerzo cortante sobre un plano de deslizamiento será máximo cuando  $\theta = 45$  grados.

Un factor más importante para determinar el movimiento de deslizamiento es la dirección y sentido del esfuerzo cortante sobre el plano de deslizamiento. El deslizamiento ocurre en direcciones en que los átomos están más empaquetados, ya que esto requiere la mínima cantidad de energía.

Las filas de empaquetamiento compacto estaban más separadas entre sí que las filas no compactamente empaquetadas; por tanto, pueden deslizarse entre sí con menos interferencia. También cabría esperar, ya que los átomos no están unidos por enlace directo si no que se mantienen juntos simplemente por los electrones libres, que estas filas de átomos compactamente empaquetados podrían deslizarse entre sí en forma muy fácil sin separarse. En la **figura 3.10** se ve que los átomos de una fila en a) están más juntos y las filas se hallan más apartadas verticalmente que las de b) de manera que se necesita menor fuerza para un desplazamiento horizontal dado, como lo sugiere la pendiente de las barras negras entre los átomos. Además se necesita menor desplazamiento para mover los átomos a posiciones inestables, de donde tenderán hacia posiciones estables cuando éstas se hallan cercanas entre sí, como en la figura 3.10 a.

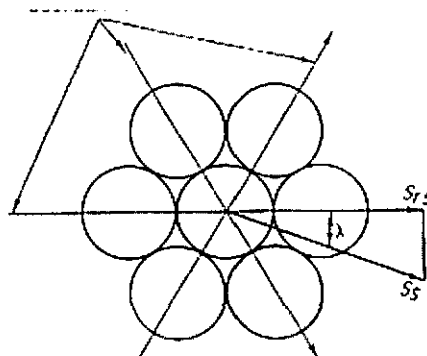




**Fig. 3.10 El flujo plástico se presenta cuando planos de átomos se deslizan Uno sobre el otro. Los planos de empaquetamiento compacto hacen Esto más fácil a) que los planos alineados en otra dirección b).**

La **figura 3.11** muestra el empaquetamiento de átomos sobre un plano de deslizamiento. Hay tres direcciones en que los átomos están compactamente empaquetados: las direcciones de deslizamiento fácil. El esfuerzo de corte  $S_s$  sobre el plano de deslizamiento, que se derivó previamente, podría no coincidir con una de estas direcciones de deslizamiento fácil y tiene que resolverse en la dirección de deslizamiento más cercana para determinar el esfuerzo  $S_{rs}$ . Como lo muestra el diagrama los esfuerzos están relacionados con el coseno del ángulo  $\lambda$  y el esfuerzo cortante es

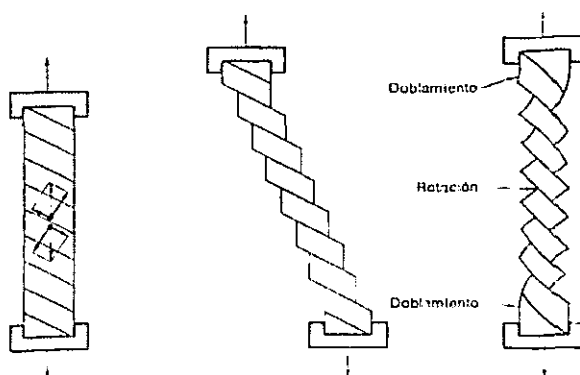
$$S_{rs} = \frac{F}{2A} \text{sen}2\theta \cos \lambda$$



**Fig. 3.11 descomposición del esfuerzo cortante Dentro de una dirección de deslizamiento.**

La investigación ha demostrado que los cristales de un metal dado, orientados en forma diferente, empezarán a deslizarse cuando se aplique cualquier esfuerzo axial, pero la componente crítica del esfuerzo cortante, es decir, el esfuerzo necesario para iniciar el deslizamiento, siempre es el mismo.

Si los planos de deslizamiento son paralelos o perpendiculares a la dirección del esfuerzo aplicado, no puede haber deslizamiento y el material se deforma por maclaje o se fractura. Conforme avanza la deformación y la carga de tensión se conserva axial, tanto el plano de deslizamiento como la dirección de deslizamiento tienden a girar sobre el eje de tensión. (fig.3.12)

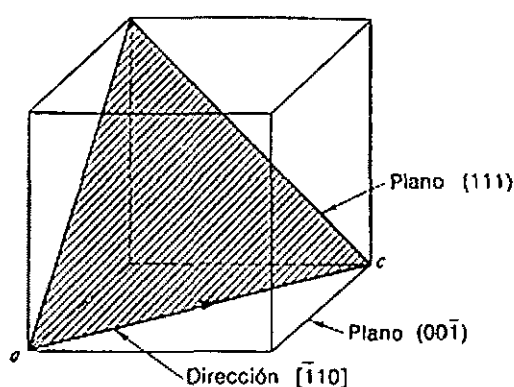


**Figura 3.12 representación esquemática de deslizamiento en tensión. A) Antes de la deformación) con los extremos no constreñidos, c) con los extremos constreñidos.**

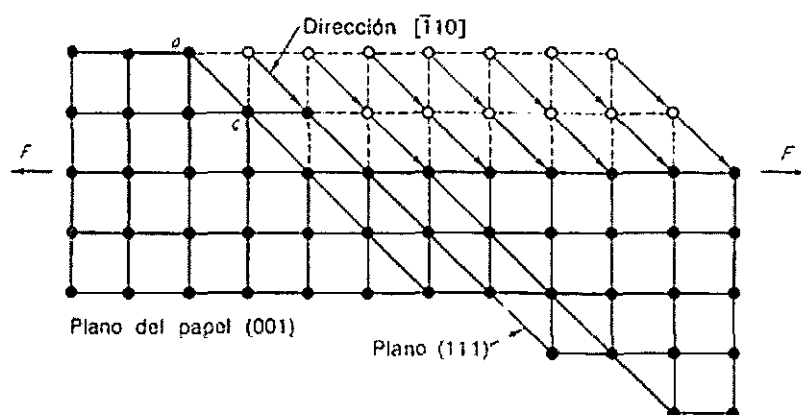


## MECANISMO DE DESLIZAMIENTO

Las porciones del cristal en cualquier lado de un plano específico de deslizamiento se mueven en direcciones opuestas y al alcanzar el reposo los átomos se encuentran en posiciones próximas al equilibrio, de tal forma que hay un cambio menor en la orientación de la red. De este modo, la forma externa del cristal cambia sin destruirlo. Los métodos sensibles de rayos X muestran que ha ocurrido algún doblamiento o torcimiento de los planos de la red y que los átomos no están en sus posiciones exactamente normales después de la deformación. **Figuras 3.13 y 3.14** muestran esquemáticamente el deslizamiento en una red f.c.c (cubica centrada en la cara).



**Fig. 3.13** Plano de deslizamiento y dirección de deslizamiento en una red f.c.c.



**Fig. 3.14** Diagrama esquemático de Deslizamiento en un cristal f.c.c.

El plano (111) **fig 3.13** que es el de población atómica más densa, corta el plano (001) en la línea ac. Si se supone que el plano (001) es el del papel y se toman juntas muchas celdas unitarias (**fig 3.14**), el deslizamiento se aprecia como un movimiento a lo largo de los planos (111) en la dirección de empaquetamiento 110, recorriendo una distancia de una dimensión o unidad reticular o múltiplo de esa dimensión. La serie de escalones formados suele aparecer bajo microscopio como un grupo de líneas aproximadamente paralelas.



Del diagrama de deslizamiento esquemático en la figura 3.14 puede suponerse, al principio, que el movimiento es uno simultáneo de planos de átomos que se cruzan entre sí. Sin embargo esto requiere que la fuerza tangencial tenga el mismo valor sobre todos los puntos del plano de deslizamiento. Las vibraciones de los átomos y las dificultades para aplicar una fuerza uniformemente distribuida hacen que esta condición no sea factible de obtener. Una suposición más razonable es que los átomos se deslicen consecutivamente, empezando en un sitio o en unos cuantos sitios en el plano de deslizamiento y que después se muevan hacia afuera sobre el resto del plano.

### 3.4 MACLAJE

En ciertos materiales, particularmente metales c.p.h., el maclaje es uno de los principales medios de deformación. Esto puede causar un extensivo cambio en la forma o colocar planos potenciales de deslizamiento en una posición más favorable para el deslizamiento. El maclaje es un movimiento de planos de átomos en la red, paralelo a un plano específico (de maclaje) de manera que la red se divide en dos partes simétricas diferentemente orientadas. La cantidad de movimiento de cada plano de átomos en la región maclada es proporcional a su distancia del plano de maclaje, de manera que se forma una imagen especular a través del plano de maclaje. Las figuras 3.15 y 3.16 ilustran esquemáticamente el maclaje en una red f.c.c.

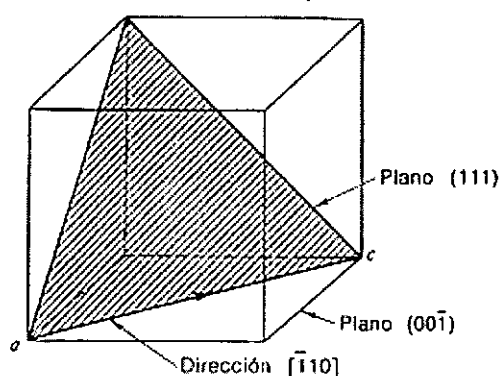


Fig. 3.15 Diagrama de un plano de maclaje y la dirección de maclaje en una red f.c.c.

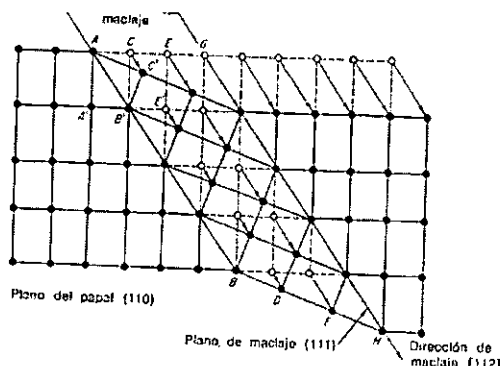


Fig. 3.16 Diagrama esquemático de maclaje en una red f.c.c.

En la figura 3.15, el plano de maclaje (111) corta al plano (110) a lo largo de la línea AB', que es la dirección de maclaje. La figura 3.16 muestra el mecanismo de maclaje. El plano del papel es el (110) y se toman juntas muchas celdas unitarias. Cada plano (111) en la región de maclaje se mueve tangencialmente a la dirección [112]. El primero CD, se mueve un tercio de una distancia interatómica; el segundo, EF, se mueve dos tercios de una distancia interatómica; y el tercero, GH, se mueve un espacio entero.

Si desde el átomo A' se traza una línea perpendicular al plano de maclaje (AB') se tendrá otro átomo, C', exactamente la misma distancia del plano maclado, pero del otro lado. Lo mismo es cierto para todos los átomos en la región maclada que refleja la porción no



maclada del cristal. Como los átomos terminan en espacios interatómicos, se ha cambiado la orientación de los átomos o la distancia entre ellos. Generalmente la región maclada comprende el movimiento de un gran número de átomos y suele aparecer microscópicamente como una línea o banda ancha.

El plano y la dirección de maclaje no son necesariamente los mismos que los del proceso de deslizamiento. En los metales f.c.c. el plano de maclaje es el (111) y la dirección de maclaje es la [112]; en los b.c.c. es el plano (112) y la dirección [111].

### **Al metalurgista le interesan dos tipos de maclaje:**

1. Maclajes mecánicos o de deformación; prevalecientes principalmente en metales c.p.h. (magnesio, zinc etc) y en los metales b.c.c. (tungsteno, hierro etc.)

2. Maclajes de recocido, prevalecientes principalmente en metales f.c.c. (aluminio, cobre, latón, etc). Estos metales han sido previamente trabajados y luego recalentados. Los maclajes se forman debido a un cambio en el mecanismo de crecimiento normal.

## **DESLIZAMIENTO CONTRA MACLAJE**

1. La cantidad de movimiento: en el deslizamiento, los átomos se mueven un número entero de espaciamentos interatómicos, en tanto que en el maclaje los átomos se mueven cantidades fraccionarias, dependiendo de su distancia desde el plano de maclaje.

2. La apariencia microscópica: el deslizamiento aparece como líneas delgadas en tanto que el maclaje aparece como líneas o bandas anchas.

3. La orientación reticular: en el desplazamiento hay muy poco cambio en la orientación reticular, y los escalones son visibles sólo en la superficie del cristal. Si los escalones se eliminan por pulido, no habrá evidencia de que ha habido deslizamiento. Sin embargo, en el maclaje como hay diferente orientación reticular en la región maclada, la eliminación de los escalones por pulido superficial no destruirá la evidencia del maclado. adecuadas soluciones de ataque, sensibles a las diferencias en orientación, revelarán la región maclada.

## **3.5. CLIVAJE**

Fractura es la separación de un cuerpo en dos o más partes, y puede tener características dúctiles o frágiles. La fractura frágil ocurre por una propagación rápida de la fisura después de poca o ninguna deformación plástica.

En materiales cristalinos ésta se propaga a lo largo de ciertos planos cristalográficos característicos denominados planos de clivaje, la superficie de este tipo de fractura en materiales cristalinos tiene una apariencia granular debido a los cambios de orientación de los planos de clivaje entre cada grano fig. 7.1a. También puede propagarse siguiendo una



trayectoria a lo largo del límite de los granos en lugar de hacerlo en los planos de clivaje. En este caso se le da el nombre de fractura intergranular y puede atribuirse a la existencia de películas frágiles segregadas en los límites de grano. En ambos casos la fractura se produce en una dirección perpendicular a la componente máxima del esfuerzo de tensión.

La fractura dúctil se produce después de una deformación plástica extensa, y se caracteriza por una propagación lenta de la fisura por medio de un proceso de deformación y coalescencia de huecos. La superficie de este tipo de fractura tiene una apariencia característica opaca y fibrosa (fig 7.1a).

La presencia de muescas, así como el uso de bajas temperaturas o velocidades de deformación elevadas, puede dar origen a una transición de fractura dúctil o frágil en metales de transición con estructuras CC.

En cualquiera de estos materiales la fractura dúctil se caracteriza por una gran absorción de energía anterior a la fractura, mientras que la frágil requiere muy poca absorción de energía. Por lo tanto es importante evitar el uso de estos materiales bajo condiciones que inducen un comportamiento frágil.

Por lo que podemos establecer que clivaje es la separación (fractura) de un cristal sobre un plano cristalográfico de bajo índice, o también es el plano o conjunto de planos cristalográficos característicos sobre los cuales ocurre fácilmente la fractura por clivaje.



Fig. 3.16 (a) Fractura dúctil (en copa) en aluminio  
(b) Fractura Frágil en un acero dulce

### 3.6 FRACTURAS FRÁGILES

Las fracturas frágiles son fracturas que comprenden las pequeñas y las no plásticas deformaciones permanentes.

Los metales frágiles se encuentran en el uso diario y en tareas de ingeniería, los cuales, usados y manejados adecuadamente resultan ampliamente satisfactorios para diversos tipos de servicio. La dureza de las herramientas de acero, de hierro inquebrantable y muchos otros materiales comúnmente son usados dentro de sus limitaciones con óptimos resultados. Sin embargo, si una herramienta, tal como un metal corriente, es doblada, bruscamente formara una fractura frágil; podría ser tan pequeña o no perceptible (la deformación) que las piezas podrían ser reemplazadas y regresadas justo a su lugar anterior.



En general, esta característica de gran dureza, hace a los metales son susceptibles a ser quebrantados, a pesar de que trabajos de investigación se atreven a sobre estimar la útil fuerza de esos materiales desafiando el peligro de las fracturas frágiles.

Por el contrario generalmente, los metales más débiles tienen un comportamiento comúnmente dúctil. El hierro colado es una excepción; este material es quebrantable por que contiene un gran número de finos fragmentos de grafito, éstos actúan como una concentración intensa de tensiones y limita la capacidad del metal para deformarse, cualidad necesaria para un comportamiento dúctil.

Esos, y por supuesto, otros son conocidos como quebrantables, aunque funcionen óptimamente en aplicaciones propias de los metales frágiles donde es casi nulo o no existe el peligro de fractura.

Claro que otros metales comunes- particularmente el acero de bajo y medio carbón, ampliamente usados en la industria son considerados por sus propiedades maleables y se utilizan habitualmente en aplicaciones donde la habilidad de ajustarse por deformación plástica es necesaria. No obstante, bajo la combinación de ciertas circunstancias, esos aceros dúctiles pueden fracturarse de manera total. Esta completa e inesperada conducta ha sido causa de muchos desacuerdos en el pasado, y aún todavía.

Las fracturas frágiles pueden ocurrir aisladas pues hay fuerzas extendidas y residuales sin carga agregada o con alguna combinación aplicada de fuerzas residuales.

( no necesariamente surgen de la fuerza aplicada precisamente en una parte de la estructura).

## **FRACTURAS FRAGILES EN ACEROS NORMALMENTE DUCTILES**

Las fracturas frágiles en aceros normalmente dúctiles han ocurrido primero en largas y continuas estructuras "de cajas " tales como: cajas de vigas, buques de presión, tanques, pipas, barcos, puentes y otras estructuras limitadas, frecuentemente unidas a construcciones soldadas.

Este fue un problema extremadamente serio durante la Segunda Guerra Mundial, cuando alrededor de 250 barcos se fracturaron o tronaron; 19 de ellos se fracturaron en dos. En algunos casos las fracturas ocurrieron en barcos nuevos que nunca habían sido puestos a la mar. Una de las más famosas fracturas frágiles fue la catástrofe del Great Boston Molasses Tank Disaster ( el desastre del gran tanque de melaza en Boston en 1919.

Aparentemente el problema de las fracturas frágiles en metales normalmente dúctiles surgen a partir de la combinación de ciertas circunstancias. La ausencia de alguna podría impedir que este tipo de problemas ocurrieran.

Los factores que deben estar presentes simultáneamente y en orden de causalidad (en fracturas frágiles de acero normalmente dúctil) son los siguientes:

1.-Una concentración de tensiones puede ser un defecto de soldadura, el reestallido de una fuerza o de cierta muesca, tal como una esquina afilada, un orificio o algo parecido. La concentración de fuerzas debe ser lo suficientemente grande como para formar una "grieta crítica" en términos de fracturas mecánicas.

2.-Una fuerza de tensión extendida, también debe ser de tal magnitud que proporcione una deformación plástica microscópica que desemboque en una concentración de fuerzas.





Una de las mayores dificultades es que las fuerzas extensibles no necesitan forzosamente ser aplicadas en la estructura, pueden surgir a partir de una tensión residual, completamente dentro de la estructura. En este caso, la tensión no es muy obvia ni de fácil control, como en otras. La parte de la estructura puede estar completamente libre de cargas sólo reposada sobre un desnivel, escaño o suelo, por ejemplo y de repente la fractura frágil puede aparecer.

3.-La temperatura debe ser relativamente baja para el metal que nos concierne.

El problema es que la definición de metal/temperatura y su interrelación es inexacta, mucho muy sujeta al tipo de pruebas usadas para tratar de entender si el acero, particularmente, es objeto de fracturas frágiles bajo ciertas condiciones sin embargo, a pesar del tipo de prueba usada para establecer la ductibilidad/quebrantabilidad en la transición de temperatura bajo ciertas condiciones podría estar sobre la temperatura del lugar.

Como es evidente, La ausencia de alguno de los cuatro factores-- concentración de tensiones, altas concentraciones de fuerzas extensibles, temperaturas relativamente bajas, susceptibilidad del acero- que contribuyen a producir fracturas frágiles de acero dúctil, pueden también prevenir este problema, para ello, aunque los cambios a veces son limitados, lo que se puede hacer es:

1.-Las características de tensión frecuentemente se observan marcas, tales como: esquinas filosas, orificios, líneas, etc. O en defectos de soldadura, arcos hundidos, etc.

2.- Las fuerzas extensibles se encuentran común e inevitablemente durante trabajos de carga o resistencia, dependiendo del tipo o parte de la estructura. Aunque los cuidados pueden ser tomados como preventivos de daños, o bien, para eliminarlos o minimizarlos. Esto es particularmente cierto cuando existen fuerzas reducidas, provenientes de la soldación.

3.-La temperatura puede ser controlada en ciertas aplicaciones pero no siempre. Por ejemplo en ciertos procedimientos puede operarse continuamente a elevadas temperaturas. En este caso las fracturas frágiles pueden no considerarse salvo que exista un factor de daño al metal, tal como la absorción de hidrógeno o de sulfuro.

En muchas otras aplicaciones, la exposición a relativamente bajas temperaturas para el acero, puede ser una posibilidad real y, de esta manera, un problema latente si otros factores más contribuyen o existe el acero en sí mismo, puede ser el único factor que puede ser controlado para prevenir fracturas en acero normalmente dúctil. Las tendencias de la metalurgia se orientan a disminuir la posibilidad de fracturas de acero con menor a bajo contenido de carbón, moderado contenido de manganeso/carbón, incluir ciertos elementos de aleación, de oxidación del acero, tratamientos para producir " martensita o bainita " microestructuras.



## **CARACTERISTICAS DE LAS FRACTURAS FRAGILES**

Las fracturas frágiles tienen ciertas características que les permiten debidamente identificarlas:

1.-No hay un grueso permanente o deformación plástica del metal en la región de la fractura frágil sin embargo podría haber deformaciones permanentes en otros lugares donde fracturas relativamente dúctiles han ocurrido.

2.-La superficie de una fractura frágil es perpendicular a las fuerzas de tensión. Así la dirección de ésta que provoca la fractura puede ser rápidamente identificada.

3.--Las características de la superficie son frecuentes, no siempre.

En el caso del acero plano, como una hoja, plato o barras incluso en el caso de regiones endurecidas existen marcas características en forma de "u" que pueden ser el punto de origen de la fractura.

En muchas ocasiones esas marcas son extremadamente finas y es muy difícil identificarlas sin una luz potente en el área, rozado precisamente las protecciones de la textura en la superficie.

Les fracturas frágiles en algunas partes podrían dibujar líneas radiales o estrias, originando dibujos parecidos a un abanico. También es difícil percibir la textura de la fractura en la superficie sin una luz controlada cuidadosamente.

Note la clásica marca el punto hacia el origen de la fractura, donde normalmente existe un tipo de concentración de esfuerzos, tales como un defecto de soldadura, grietas por fatiga o grieta por corrosión - esfuerzo.

Las fracturas frágiles de extrema dureza, en metales de grano fino, usualmente tienen pequeños o no visibles marcas de fractura. En esos casos, puede ser muy difícil el localizar el origen de manera certera.

Si la fractura frágil continua completamente alrededor de la parte; las dos fracturas separadas podrían formar un segmento donde se superpongan de manera opuesta al origen. El interior o núcleo es algo parecido a una fractura dúctil con un hoyuelo de ruptura en microescala.

## **ASPECTOS MICROESTRUCTURALES DE LAS FRACTURAS FRAGILES**

Las fracturas frágiles comúnmente se propagan ya sea de uno o ambos modos, hundida o doblada e intergranular. En la mayoría de los casos es necesario estudiar la superficie de la fractura con un microscopio electrónico.

Las fracturas por clivaje se caracterizan por agrietar a los cristales, según planos cristalográficos específicos. La fractura va directo a los granos, este tipo de fractura frecuentemente se le llama transgranular o transcristalina. Las fracturas de clivaje son el tipo más común de fracturas frágiles y son del tipo normal de fracturas que han sido debilitadas por un proceso o desarrollo específico.



Una típica fractura de clavija vista por un microscopio electrónico. Notara que el esquema se caracteriza por la unión de estrías microscópicas muy parecido a un sistema de fuerzas de un río. El dibujo revela la dirección en que la fractura como la fractura propagada en la misma dirección que el río fluye cuesta abajo.

Las fracturas intergranulares son aquellas que siguen a los granos "límite", debilitados por varias razones. Podríamos hacer una analogía con un muro de ladrillos cuyas fracturas están a través del mortero más que de los mismos ladrillos. El mortero es análogo a los límites de grano, mientras que los ladrillos serán análogos a los granos del metal.

Las razones responsables de la debilidad en los límites de grano son frecuentemente difíciles de entender. Bajo ciertas condiciones algunos metales están sujetos al contacto o propagación de elementos debilitantes, cercando los límites de los granos.

## **FRAGILIZAMIENTO POR ENVEJECIMIENTO POR DEFORMACION**

Son más susceptibles a este fenómeno los aceros que poseen un bajo nivel de carbono y que durante su proceso formativo fueron trabajados a bajas temperaturas y sometidos a una temperatura moderada durante el galvanizado, o recubrimientos.

También el envejecimiento por el uso, aún a temperatura ambiente, provoca fragilidad.

### **A) FRAGILIDAD POR ENVEJECIMIENTO POR TEMPLADO.**

El rápido o brusco enfriamiento en aceros con bajo contenido de carbono ( 0.4 a 0.12 % ) puede precipitar a los carburos dentro de la estructura y endurecer al metal. Un periodo de varias semanas basta para fragilizar.

### **B) FRAGILIDAD AZUL**

Las superficies de acero brillante al oxidarse obtienen un color azul púrpura, descubriendo el carbono y algunas aleaciones hechas entre 230 y 370 ° C (450 y 700° F) después de enfriarse, se percibe un incremento en las fuerzas de tensión y un marcado decremento en la ductilidad. También se nota una fuerza de impacto causada por el endurecimiento, precipitado dentro de los rangos críticos de temperatura.

### **C)FRAGILIDAD Y TEMPLE**

Los aceros enfriados contienen grandes cantidades de manganeso, níquel o cromo susceptibles a tener un temple sobre todo si además poseen una o más impurezas de antimonio, estaño la fragilidad en los aceros susceptibles ocurre después de calentarlos bajo rangos de temperatura que oscilan entre 370 y 570 °C y aún más rápido se observan entre 450 y 475 °C

### **D) FRAGILIDAD A LOS 500 °f**

Las bajas aleaciones contienen gran cantidad de cromo o magnesio, propensos a fracturarse si son templados bajo rangos de 400 a 700 °F los aceros con estructura de temple más bajo están sujetas a fracturarse a los 500 °F pero los aceros con estructura perlítica y los aceros con estructura bainita no son susceptibles



## FORMACION DE GRAFITO.

La formación de grafito ocurre en aceros cuyas uniones de carbón y molibdeno trabajan a temperaturas sobre 425 ° C durante periodos prolongados el grado de fragilidad depende de la distribución, tamaño y forma de los grafitos formados en la zona afectada

## TIPOS DE FRACTURA COMBINADA.

No se debe pensar que las fracturas siempre ocurren de manera intergranular o de clivaje solamente. En la mayoría de los casos una modalidad es la que predomina pero no está sola. Por ejemplo una fractura predominante intergranular, existe la probabilidad de que en pequeñas o grandes regiones de la superficie de la fractura se manifieste una fractura de otro tipo también. El tipo de fractura que ocurre en un lugar específico depende de la composición local de fuerzas, imperfecciones, ambiente y orientación cristalina de los granos. Además existen regiones resistentes y fibrosas, lejanas al origen de la fractura principal.

### 3.7 FRACTURAS DUCTILES

Las fracturas dúctiles resultan de la aplicación de una fuerza excesiva sobre un metal que posee la cualidad de deformarse permanentemente, o plásticamente antes de fracturarse. Así, la propiedad de la ductilidad es simplemente la habilidad de un metal para deformarse o extenderse que puede o no puede terminar en fractura, dependiendo de la magnitud de la fuerza aplicada.

La propiedad de la ductibilidad está un poco explicada con la propiedad de la resistencia sin embargo es usualmente medida en presencia de un grado de fuerzas concentradas la prueba de impacto es usada como medida de resistencia, aunque la habilidad de observar energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse es característica de ambas: ductibilidad y resistencia.

Esta habilidad de absorber energía es una valiosa propiedad de los metales dúctiles.

La propiedad de la ductibilidad permite a las partes del metal formarse sin fracturarse y ajustarse a una forma.

### CARACTERISTICAS DE UNA FRACTURA DÚCTIL:

La fractura dúctil ocurre después de una considerable deformación plástica previa a la falla. La falla de la mayoría de los materiales dúctiles policristalinos ocurre con una fractura copa-y cono, asociada con la deformación de un cuello en una probeta tensil.

La fractura empieza con la deformación de cavidades en el centro de la región en forma de cuello. En la Mayoría de los metales comerciales, estas cavidades internas probablemente se forman alrededor de inclusiones no metálicas.



Esta creencia se sostiene por el hecho que los metales extremadamente puros son mucho más dúctiles que los de pureza un poco menor. Bajo un esfuerzo aplicado continuo. Las cavidades se unen para formar una grieta en el centro de la probeta. La grieta avanza hacia la superficie de la probeta en una dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La culminación de la fractura ocurre rápidamente a lo largo de una superficie que hace un ángulo de aproximadamente 45 grados con el eje tensil. La etapa final deja un labio circular sobre la mitad de la muestra y un bisel sobre la superficie de la otra mitad. De este modo, una mitad tiene la apariencia de una copa poco profunda y la otra se asemeja a un cono con la parte superior aplanada que da lugar al término fractura copa-cono.

## PRECAUCIONES AL INTERPRETAR

En este punto es prudente insertar algunas precauciones sobre la interpretación en la evidencia visible con la examinación bajo microscopio. El investigador debe estar consciente de la implicación de fracturas extrañas a la fractura en sí mismo.

### 1.-DAÑOS MECÁNICOS.

La fractura de la parte de un metal es siempre un evento violento porque siempre se libera energía las superficies de la fractura frecuentemente se está rozando una a la otra provocando estiras, manchas y otras marcas posteriores al daño de la fractura

### 2.- DAÑOS QUIMICOS

Orificios superficiales parecidos a los hojuelos de las fracturas dúctiles pueden aparecer gracias a ácidos corrosivos por ciertas técnicas de limpieza usadas para remover la corrosión atmosférica, en otros casos, una capa corrosiva podría estar formada en la superficie de la fractura borrando completamente el carácter básico.

Cavidades que no pueden ser orificios en ciertos metales, cavidades u orificios están presentes en la superficie de una fractura, pero estas cavidades podrían no ser características propias de una fractura dúctil. En metales colados este tipo de cavidad puede evidenciar la porosidad de gas.

Esta ocurre porque los gases inevitables en colaciones y fundiciones no pueden escapar a la atmósfera antes de que el metal se solidifique y se guardan en pequeñas y discretas burbujas dentro del metal.

## 3.8 FALLAS POR FATIGA

**FATIGA** es el progresivo cambio estructural permanente localizado que ocurre en un material sometido a deformaciones repetidas o fluctuantes a esfuerzos con máximo valor que es menor a la resistencia a la tensión del material. La fatiga puede culminar en fisuras o fractura después de un número suficiente de fluctuaciones.

Las fracturas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzo cíclico, esfuerzo de tensión y deformación plástica. Si uno de estos tres factores no está presente, el fisuramiento por fatiga no se iniciará y propagará. El esfuerzo cíclico genera la fisura; el esfuerzo de tensión produce la propagación. Aunque el esfuerzo de compresión no causará



fatiga, las cargas de compresión sí pueden hacerlo.

Anteriormente las fracturas por fatiga fueron atribuidas a "cristalización", debido a su apariencia de fractura cristalina. Pero los metales son sólidos cristalinos, y por tanto el uso del término cristalización en relación a fatiga es confuso y debe ser evitado.

El proceso de fatiga puede considerarse consistente de tres etapas:

Daño por fatiga inicial conduciendo al inicio de la fisura.

Propagación de la fisura hasta que la sección transversal no fisurada restante de una pieza sea tan débil para soportar las cargas impuestas.

Fractura final súbita de la sección transversal restante.

## **PREDICCIÓN DE LA VIDA DE FATIGA**

En la práctica, la predicción de la vida de fatiga de un material es complicada ya que, excepto por unos cuantos materiales relativamente frágiles, la vida de fatiga de un material es muy susceptible a pequeños cambios en las condiciones de carga, esfuerzos localizados y características locales del material. Ya que es difícil medir estos cambios menores en las técnicas de predicción de esfuerzos dinámicos o en los criterios de falla por fatiga, hay una gran incertidumbre inherente en las predicciones analíticas del límite de fatiga. De esta manera, es requerido que el diseñador también se base en la experiencia con partes similares y eventualmente en pruebas de optimización de prototipos o partes de producción. Aunque las pruebas de fatiga en laboratorio realizadas en pequeños especímenes no son suficientes para establecer con precisión la vida de fatiga de una pieza, es útil examinar estos datos ya que las pruebas de laboratorio (a) son la fuente principal de los criterios de falla por fatiga, (b) aíslan las variables de carga implicadas en fatiga, (c) son útiles en clasificación de materiales en términos de su resistencia relativa a la fatiga, y (d) pueden ser usadas para establecer la importancia relativa de puntos tales como métodos de fabricación, acabado superficial, tratamiento térmico, técnica de ensamble y ambiente, sobre la vida de fatiga.

**En general, la vida de fatiga puede depender de lo siguiente:**

- Tipo de carga (uniaxial, flexionante, torsional)
- Forma de la curva de carga.
- Frecuencia de carga cíclica.
- Patrón de carga (carga periódica en constante o variable amplitud, carga programada o carga aleatoria).
- Magnitud de los esfuerzos.
- Tamaño de pieza.
- Método de fabricación y aspereza superficial.
- Temperatura de operación.
- Atmósfera de operación.

Tradicionalmente, la vida de fatiga ha sido expresada como el número total de ciclos de esfuerzo requeridos para que una fisura por fatiga sea iniciada y luego se propague lo suficiente para producir falla catastrófica (separación del espécimen en dos partes). En esta sección, los datos de fatiga son expresados en términos de la vida total.

Los datos de fatiga también pueden ser expresados en términos de velocidad de propagación de fisura. Anteriormente, fue comúnmente asumido que la vida de fatiga total consistía principalmente de la iniciación de fisura (etapa I del desarrollo de fisuramiento por fatiga), y que el tiempo requerido para que una diminuta fisura por fatiga se propague y produzca falla era una porción menor de la vida total. Sin embargo, conforme mejores métodos de detección de fisuras estuvieron disponibles, fue descubierto que las



fisuras se desarrollan al principio de la vida de fatiga del material y crecen continuamente hasta que la falla catastrófica ocurre. Este descubrimiento ha conducido al uso de rapidezces de propagación de fisura para la predicción de la vida de fatiga.

## ETAPAS DE FRACTURA POR FATIGA

La superficie de fractura que resulta de una falla por fatiga tiene una apariencia característica que puede ser dividida en tres zonas o etapas progresivas de fractura.

Etapa 1. Es el inicio de las fisuras y su propagación por fractura en el plano de deslizamiento, extendiéndose hacia adentro desde la superficie a aproximadamente  $45^\circ$  del eje de esfuerzo. Una fractura de etapa I nunca se extiende por arriba de dos a cinco granos alrededor del origen. En cada grano la superficie de fractura está a lo largo de un plano cristalográfico bien definido, el cual no debe ser confundido con un plano de clivaje aunque este tiene la misma apariencia frágil. Normalmente no hay estrías de fatiga asociadas con una superficie de fractura de etapa I. En algunos casos (dependiendo del material, ambiente y nivel de esfuerzos), una fractura de etapa I puede no ser discernible.

Etapa II. La transición de la fractura por fatiga de la etapa I a la etapa II es el cambio de orientación del plano de fractura principal en cada grano desde uno o dos planos de corte hasta muchas mesetas paralelas separadas por surcos longitudinales. Las mesetas usualmente son normales a la dirección del máximo esfuerzo de tensión.



Fig. 3.18 Transición de la etapa I a etapa II de una fractura por fatiga en un espécimen de grano grueso de aleación de Al 2024-T3

Una transición de la etapa I a la etapa II en un espécimen de grano grueso de aleación de aluminio 2024-T3 es mostrada en la **fig.3.18**. La presencia de inclusiones ricas en hierro y silicio no afectaron la trayectoria de fractura marcadamente. Las inclusiones, las cuales fueron fracturadas, varían de 5 a 25 micras de diámetro. En la fig. 3.18 el área de etapa II muestra un gran número de parcelas de fatiga aproximadamente paralelas conteniendo estrías de fatiga muy finas que no son resueltas a la magnificación usada. Estrías finas son típicas en la etapa II, pero frecuentemente son vistas sólo a alta magnificación.



Etapa III. Ocurre durante el último ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal es incapaz de soportar la carga aplicada. La fractura final, la cual es el resultado de una sobrecarga simple, puede ser frágil o dúctil, o una combinación de las dos.

## CARACTERÍSTICAS DE FRACTURA REVELADAS POR MACROSCOPIA

La examinación de la superficie de fractura por fatiga usualmente inicia visualmente o con baja magnificación en microscopio de luz. La examinación microscópica de superficies de fractura emplea técnicas relativamente simple; frecuentemente puede ser realizada en el sitio de falla, requiere poca o ninguna preparación del espécimen, requiere mínimo y relativamente simple equipo, y no destruye el espécimen o altera las superficies de fractura. La examinación macroscópica es particularmente útil en correlacionar características de la superficie de fractura con el tamaño y forma de la pieza, y con condiciones de carga. El origen de fisura puede mejor ser ubicado con ver primero la superficie de fractura a baja magnificación (25 a 100X).

**Marcas de Playa.** La característica más relevante normalmente encontrada en superficies de fractura por fatiga es las marcas de playa, las cuales están centradas alrededor de un punto común que corresponde al origen de la fisura por fatiga. Las marcas de playa son quizá el rasgo característico más importante en la identificación de fallas por fatiga. Las marcas de playa pueden ocurrir como resultado de cambios en carga o frecuencia o por oxidación de la superficie de fractura durante periodos de detención de fisura por servicio intermitente de la parte o componente.

Ejemplos de superficies de fractura por fatiga conteniendo marcas de playa es mostrado en la fig. 3.19. La superficie de fractura mostrada en la fig. 3.19(a) es la de una placa de aleación de aluminio 7075-T6 que fue fracturada en laboratorio por pruebas de fatiga. Las marcas de playa fueron producidas por cambios en el crecimiento de fisura como resultado de variaciones en los niveles de carga aplicada. La región de fractura final (etapa III) abarca casi 40% de la superficie de fractura. La fig. 3.19(b) muestra la superficie de una fractura por fatiga en un eje de acero 4130 que falló en servicio; esta superficie exhibe marcas de playa producidas por oxidación de la fractura cuando el eje no estuvo en operación. Las marcas de playa mostradas en la fig. 3.19(c) fueron producidas por una combinación de variaciones en carga y periodos de pausa normalmente experimentados por un cigüeñal de automóvil, en este caso un cigüeñal de hierro dúctil. La fractura se originó en una muesca en la raíz de una soldadura. El área de fractura final fue muy pequeña y tuvo labios de corte, indicando que condiciones de esfuerzo plano prevalecieron conforme la fisura se acercaba a la superficie.

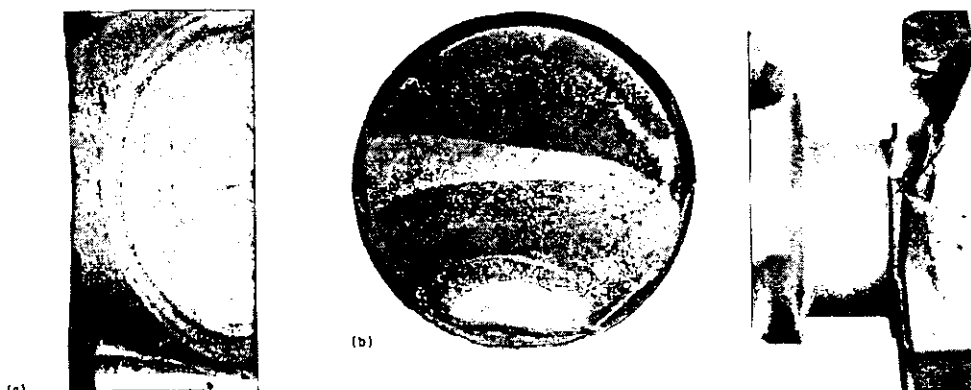


Fig. 3.19 Marcas de playa en la región de fatiga sobre las superficies de fractura de tres diferentes metales





Muchas fracturas por fatiga producidas bajo condiciones de crecimiento de fisura ininterrumpido y sin variaciones de carga no exhiben marcas de playa. La superficie de fractura de un espécimen probado en laboratorio donde la carga fue repetida a la misma intensidad y sin interrupción hasta la fractura final es mostrada en la fig. 3.20. La superficie de fractura producida por fatiga no contiene marcas de playa.



Fig. 3.20 Superficie de fractura en un espécimen para prueba de fatiga hecho de aleación de Titanio Ti-6AL-6V-2Sn. La zona de fatiga (A) no contiene marcas de playa ya que la carga no fue variada durante la prueba.

Zona de fractura Final. La zona de fractura final de una superficie de fractura por fatiga frecuentemente es fibrosa, pareciéndose a las superficies de fractura de especímenes de prueba de impacto o de tenacidad a la fractura del mismo material. El tamaño de la zona de fractura final depende de la magnitud de las cargas, y su forma depende de la forma, tamaño y dirección de carga de la parte fracturada. En materiales tenaces, con secciones gruesas o redondas, la zona de fractura final consistirá de una fractura con dos modos distintos: (a) fractura de tensión (modo de deformación plana) extendiéndose desde la zona de fatiga y en el mismo plano, y (b) fractura de corte (modo de esfuerzo plano) a  $45^\circ$  de la superficie de la parte rodeando la fractura de tensión. Estos dos modos son ilustrados en la superficie de una fractura por fatiga a través de una sección gruesa mostrada en la fig. 3.21. En la fig.3.21, dos rasgos en la zona de fractura final que ayudan a determinar el origen de la fractura son: (a) la fatiga normalmente se origina en la superficie, y por tanto el origen de fractura no está incluido en la fractura de labio de corte; y (b) la presencia de marcas de trinquete características en la fractura de tensión que apuntan hacia el origen de fractura.



Fig. 3.21 Superficie de una fractura por fatiga en una pieza de acero 4330V. Marca Chevrol apuntan hacia el origen de fatiga en la esquina inferior izquierda. Ruptura por cortante a lo largo de la periferia son indicadas por las flechas.



En piezas metálicas de placa delgada teniendo suficiente tenacidad, la fractura final ocurre algo diferente. Conforme la fisura se propaga desde la zona de fatiga, el plano de fractura rota alrededor de un eje en la dirección de propagación de fisura hasta que forma un ángulo de casi  $45^\circ$  con la dirección de carga y la superficie de la placa. El plano de fractura, inclinado  $45^\circ$  de la dirección de carga, puede ocurrir sobre un plano de corte simple o un plano de corte doble, como se ilustra en la fig. 3.22

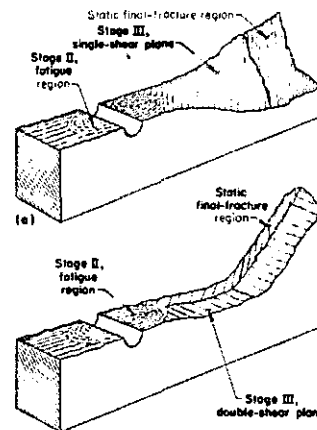


Fig. 3.22 Planos de Fractura por cortante simple y por cortante doble que están a  $45^\circ$  de la dirección de carga

## CARACTERÍSTICAS DE FRACTURA REVALADAS POR MICROSCOPIA

La examinación de fracturas por fatiga por microscopía de luz es frecuentemente difícil ya que la altura de los rasgos sobre la superficie de fractura puede exceder la profundidad de campo del microscopio, especialmente a alta magnificación. Las examinaciones metalográficas de secciones transversales a través de sospechadas fracturas por fatiga típicamente muestran que la trayectoria de fisura fue transgranular. Una sección transversal a través de una fisura que no ha crecido lo suficiente para causar la separación del componente es frecuentemente útil en mostrar deficiencias en el diseño o manufactura, o en mostrar el resultado de condiciones de servicio inesperadas.

**Estrías.** En la examinación por microscopía electrónica de superficies de fractura por fatiga, las características más prominentes encontradas son parcelas de marcas paralelas finamente espaciadas, llamadas estrías de fatiga. Las estrías de fatiga están orientadas perpendicularmente a la dirección microscópica de la propagación de fisura y, con carga uniforme, generalmente se incrementan en espaciamiento conforme progresan desde el origen de fatiga. Cada estría es el resultado de un ciclo simple de esfuerzo (pero cada ciclo no necesariamente produce una estría), y el espaciamiento de estrías es altamente dependiente del nivel de carga aplicado. La claridad de las estrías depende de la ductilidad del material. Las estrías son más visibles a niveles de esfuerzo mayores que el límite de fatiga; además, son más fácilmente visibles en materiales dúctiles. De esta manera, las parcelas de estrías de fatiga en aceros de alta resistencia son menos visibles que en aleaciones de aluminio. Además, las estrías son más visibles a altos niveles de esfuerzo que cerca del límite de fatiga.

A altas rapidezces de crecimiento de fisura ( $10^{-4}$  in. por ciclo o más), las estrías llegan a ser onduladas, y desarrollan una apariencia áspera. Existe una gran zona plástica en el frente de la fisura, lo cual puede causar extenso fisuramiento secundario. Cada fisura secundaria se propaga como una fisura de fatiga, creando una red de estrías secundarias.



La dirección de fisura local puede diferir marcadamente de la dirección global de la propagación de fisura debido a los muchos cambios en dirección de la trayectoria de fractura local.

En aceros, las estrías de fatiga que son formadas a rapideces de crecimiento de fisura ordinarias no son siempre tan bien definidas como en aleaciones de aluminio. Las estrías que son formadas en aleaciones de aluminio a rapideces de crecimiento de fisura bajas (menores a  $5 \times 10^{-6}$  in. por ciclo) son difíciles de resolverse y frecuentemente no pueden ser distinguidas de la red de líneas de deslizamiento y bandas de deslizamiento asociadas con deformación plástica en y cerca del frente de fisura conforme esta se propaga a través de la sección.

## **FISURAMIENTO POR FATIGA**

El fisuramiento por fatiga normalmente resulta de esfuerzos cíclicos muy por debajo de la resistencia a la fluencia estática del material. (En fatiga de bajo ciclo, sin embargo, o si el material tiene una apreciable rapidez de endurecimiento por trabajo, los esfuerzo también pueden estar arriba de la resistencia a la fluencia estática.). Generalmente, una fisura por fatiga es iniciada en una región altamente esforzada de un componente sometido a esfuerzos cíclicos de suficiente magnitud. La fisura se propaga bajo el esfuerzo aplicado a través del material hasta que resulta la fractura total. En la escala microscópica, la característica más importante del proceso de fatiga es la nucleación de una o más fisuras bajo la influencia de esfuerzos invertidos que exceden el esfuerzo de flujo, seguida por el desarrollo de fisuras en las bandas de deslizamiento persistentes o en las fronteras de grano. Subsecuentemente, las fisuras por fatiga se propagan con una serie de movimientos de abertura y cierre en la punta de la fisura que producen, dentro de los granos, estrías que son paralelas al frente de fisura.

## **INICIACIÓN DE LA FISURA**

Las fisuras por fatiga se forman en el punto o puntos de esfuerzo local máximo y resistencia local mínima. El patrón de esfuerzo local está determinado por la forma de la parte (incluyendo características locales tales como imperfecciones superficiales y metalúrgicas que concentran esfuerzos macroscópicos) y por el tipo y magnitud de la carga. La resistencia está determinada por el material mismo, incluyendo todas las discontinuidades, anisotropías e inhomogeneidades presentes. Las imperfecciones superficiales locales y otras imperfecciones de fabricación son las imperfecciones más obvias en las cuales inician las fisuras por fatiga. Las discontinuidades superficiales y subsuperficiales del material en localizaciones críticas también influirán la iniciación de la fisura. Las inclusiones de material externo, partículas precipitadas duras, y discontinuidades cristalinas tal como fronteras de grano y fronteras de macla son ejemplos de concentradores de esfuerzo microscópicos en la matriz del material. En la escala submicroscópica, la densidad de dislocaciones, defectos de red y la orientación de planos de deslizamiento transversales controlan la formación de (a) bandas de deslizamiento persistentes, (b) intrusiones y extrusiones y (c) celdas de dislocaciones, los últimos mecanismos de nucleación.

En la raíz de muescas con fisuras por fatiga, el estado de esfuerzo es triaxial



(deformación plana). Esto reduce la ductilidad aparente del material y ayuda a controlar la orientación de la fisura mientras la fisura sea pequeña. En un nivel microscópico, la superficie de fractura en el origen consiste de los planos cristalográficos en los granos individuales que son más favorablemente orientados para deslizamiento.

**Nucleación de Fisura.** Una variedad de características cristalográficas han sido observadas para nuclear fisuras por fatiga. En metales puros, las cavidades tubulares que se desarrollan en bandas de deslizamiento continuas, pares de extrusión-intrusión en superficies libres y y fronteras de macla son sitios comunes de iniciación de fisura. El fisuramiento también inicia en fronteras de grano en materiales policristalinos, incluso en la ausencia de debilidad de frontera de grano inherente; a altas rapidezces de deformación, estas uniones son el sitio preferido para la nucleación de fisura. La nucleación en una frontera de grano parece ser puramente un efecto geométrico, mientras que la nucleación en una frontera de macla está asociada con el deslizamiento activo sobre planos cristalográficos inmediatamente adyacentes y paralelos a la frontera de macla. Los procesos anteriormente mencionados, también ocurren en aleaciones y materiales heterogéneos. Sin embargo, las prácticas de aleación y producción comercial introducen segregación, inclusiones, partículas de fase secundaria y otras características que distorsionan la estructura, y esto tiene un dominante efecto sobre el proceso de nucleación de fisura. En general, la aleación que (a) aumenta el deslizamiento transversal, (b) aumenta el maclaje, o (c) incrementa la rapidez de endurecimiento por trabajo estimulará la nucleación de fisura. Por otro lado, la aleación normalmente eleva el esfuerzo de flujo de un metal, de esta manera compensando al menos parcialmente el efecto potencialmente perjudicial sobre la nucleación de fisura por fatiga.

**Relación Con el Ambiente.** Al observar localizaciones de nucleación de fisura, la posibilidad de mecanismos relacionados con el ambiente (incluyendo corrosión por picadura, fisuramiento por esfuerzo-corrosión y otros efectos de un ambiente hostil) deben ser considerados. Por ejemplo, un gran número de fallas por fatiga en distintas estructuras ligeramente cargadas se originan en áreas desgastadas. En cualquier estructura teniendo uniones con algún movimiento relativo, el desgaste proporciona un posible sitio de iniciación de falla.

## **PROPAGACIÓN DE FISURA**

Una vez que una por fatiga ha sido nucleada, su rapidez y dirección de crecimiento son controladas por los esfuerzos localizados y por la estructura del material en la punta de la fisura.

**Propagación Inicial.** La etapa I de la propagación de fisura ocurre perpendicular al esfuerzo de tensión máximo. En un nivel microscópico, las direcciones locales de propagación son controladas en alguna extensión por planos cristalográficos y pueden formarse sobre o ser paralelas a las bandas de deslizamiento en granos cerca de la superficie. En granos interiores, fisuras por clivaje frecuentemente se forman en la intersección de bandas de deslizamiento con fronteras de grano. En materiales de alta resistencia conteniendo partículas de fase secundaria esferoidales, la nucleación de fisura secundaria delante del frente de fisura principal (fatiga sin deslizamiento) ocurre alrededor de tales partículas. En fatiga sin deslizamiento, las fisuras se forman a lo largo de planos de red que están desfavorablemente localizados con respecto al esfuerzo de tensión máximo.

**Extensión de Fisura.** Después de que una fisura ha nucleado y propagado hasta un tamaño finito, llega a ser un elevador de esfuerzo macroscópico y puede ser más influyente que un elevador de esfuerzo que está ya en la parte. En este punto, la punta de la fisura tomará control de la dirección de fractura. Subsecuentemente, la orientación de la superficie de fisura dependerá del campo de esfuerzos en la punta de fisura y en muchos casos seguirá una serie de coalescencias de cavidades antes que el frente de fisura.



En la escala macroscópica, la extensión de fisura prematura ocurre bajo condiciones de deformación plana. Esto da una superficie de cara plana típicamente de grano fino que, cuando se produce bajo carga aleatoria o secuencia de amplitudes de esfuerzo altas y bajas, exhibe marcas de playa características.

Variaciones de propagación de fisura en materiales anisotrópicos o inhomogéneos ocasionalmente producen marcas de playa difíciles de interpretar.

En materiales altamente anisotrópicos, tales como alambre de resorte, una superficie de fractura por fatiga puede exhibir regiones donde la fisura se propagó en fatiga típica y otras regiones donde se propagó preferencialmente en otros modos a lo largo de planos de debilidad.

**Propagación Final.** Después de que una fisura ha crecido al tamaño donde cambia significativamente la capacidad de soporte de carga de la parte, sigue normalmente un cambio en la dirección de crecimiento de fisura. Las fracturas de metal en placa exhiben un labio de corte a aproximadamente  $45^\circ$  de la fractura de cara plana inicial. En partes cilíndricas, aunque la fractura puede en general incluso aparecer plana si el nivel de esfuerzo de operación es bajo, la apariencia superficial llega a ser más fibrosa y muestra mayor ductilidad (mayor tamaño de zona plástica en el frente de fisura), indicando un cambio desde la extensión de fisura hasta el final, fractura rápida. Como una regla general, la fatiga de ciclo alto y esfuerzo bajo produce fracturas de cara plana (por deformación plana). La superficie de fractura aparece de grano fino y ligeramente pulida cerca del sitio de nucleica de fisura, donde la intensificación de esfuerzo es mínima. La superficie llega a ser progresivamente más áspera y más fibroso conforme la fisura crece y la intensidad de esfuerzo aumenta. En superficies de fatiga de ciclo bajo y esfuerzo alto, encontradas en ciertas áreas de toda la fractura de fatiga completa, la superficie es fibrosa, áspera y más típica de condiciones de carga de esfuerzo plano, donde la dirección de fractura general es a  $45^\circ$  de la carga de tensión principal.

## **EFEECTO DE SOBRESFUERZO Y CONCENTRACION DE ESFUERZOS**

La magnitud del esfuerzo nominal en un componente cargado cíclicamente es frecuentemente medido por la cantidad de sobreesfuerzo, esto es, la cantidad por la cual el esfuerzo nominal excede el límite de fatiga o la resistencia a la fatiga de vida larga del material usado en el componente. El número de ciclos de carga que un componente sometido a bajo sobreesfuerzo puede soportar es alto; de esta manera, el término fatiga de ciclo alto es frecuentemente aplicado. El incrementar la magnitud del esfuerzo nominal tiene los siguientes efectos: (a) la iniciación de fisuras múltiples es más probable; (b) el espaciamiento de estrías es incrementado; y (c) la región de fractura rápida final es incrementada en tamaño.

Con sobreesfuerzo muy alto, las fracturas por fatiga de ciclo bajo son producidas. La arbitraria pero comúnmente aceptada línea divisoria entre fatiga de ciclo alto y de ciclo bajo es considerada aproximadamente 105 ciclos. En la práctica esta distinción es hecha determinando si la componente dominante de la deformación impuesta durante la carga cíclica es elástica (de ciclo alto) o plástica (de ciclo bajo), lo cual depende de las propiedades del metal así como también de la magnitud del esfuerzo nominal. En condiciones extremas, la línea divisoria entre fatiga de ciclo alto y de ciclo bajo puede incluso ser menos de 100 ciclos.

**Concentración de esfuerzos.** Las muescas, ranuras, barrenos, filetes, cuerdas, cuñeros y acanaladuras son características de diseño comunes. Tales discontinuidades particulares incrementan el nivel de esfuerzo local arriba del estimado en base al área de sección transversal mínima. Además de la reducción de la resistencia a la fatiga o de la vida



de fatiga, incrementar la severidad de concentración de esfuerzo tiene los siguientes efectos sobre las características de fisura por fatiga: (a) la iniciación de fisuras múltiples es más probable; (b) las marcas de playa usualmente llegan a ser convexas hacia el punto de origen de fisura; (c) bajo carga rotacional las marcas de playa pueden completamente rodear la zona de fractura final; y (d) estados de esfuerzo combinado pueden ser introducidos, por tanto influenciando la dirección de crecimiento de fisura.

La fig. 3.23 muestra esquemáticamente cómo la magnitud del esfuerzo nominal, severidad de concentración de esfuerzo y tipo de carga afectan la apariencia de las superficies de fractura por fatiga de componentes con secciones transversales redondas, cuadradas y rectangulares, y aquellas de placas gruesas. La fig. 3.23 está destinada para uso solo como guía. Desviaciones de esta figura serán encontradas para diversos materiales, condiciones de prueba y servicio. La Fig. 3.23 está basado los siguientes principios:

Conforme el esfuerzo local se incrementa en regiones de iniciación de fisura potencial, así lo hace el número de núcleos de fisura activos o sitios de iniciación. Por tanto, a alto sobreesfuerzo o en presencia de una severa concentración de esfuerzo, se observarán múltiples orígenes de fisura. En muchos casos las fisuras de esos orígenes gradualmente se unirán para formar un solo frente de fisura. Antes que el solo frente de fisura sea formado, las microfisuras individuales estarán separadas por pequeñas salientes verticales, llamadas marcas de trinquete. Alternativamente, justo arriba del límite de fatiga, o esfuerzo mínimo para fractura, un solo origen ocurrirá y la fractura total emanará de este punto.

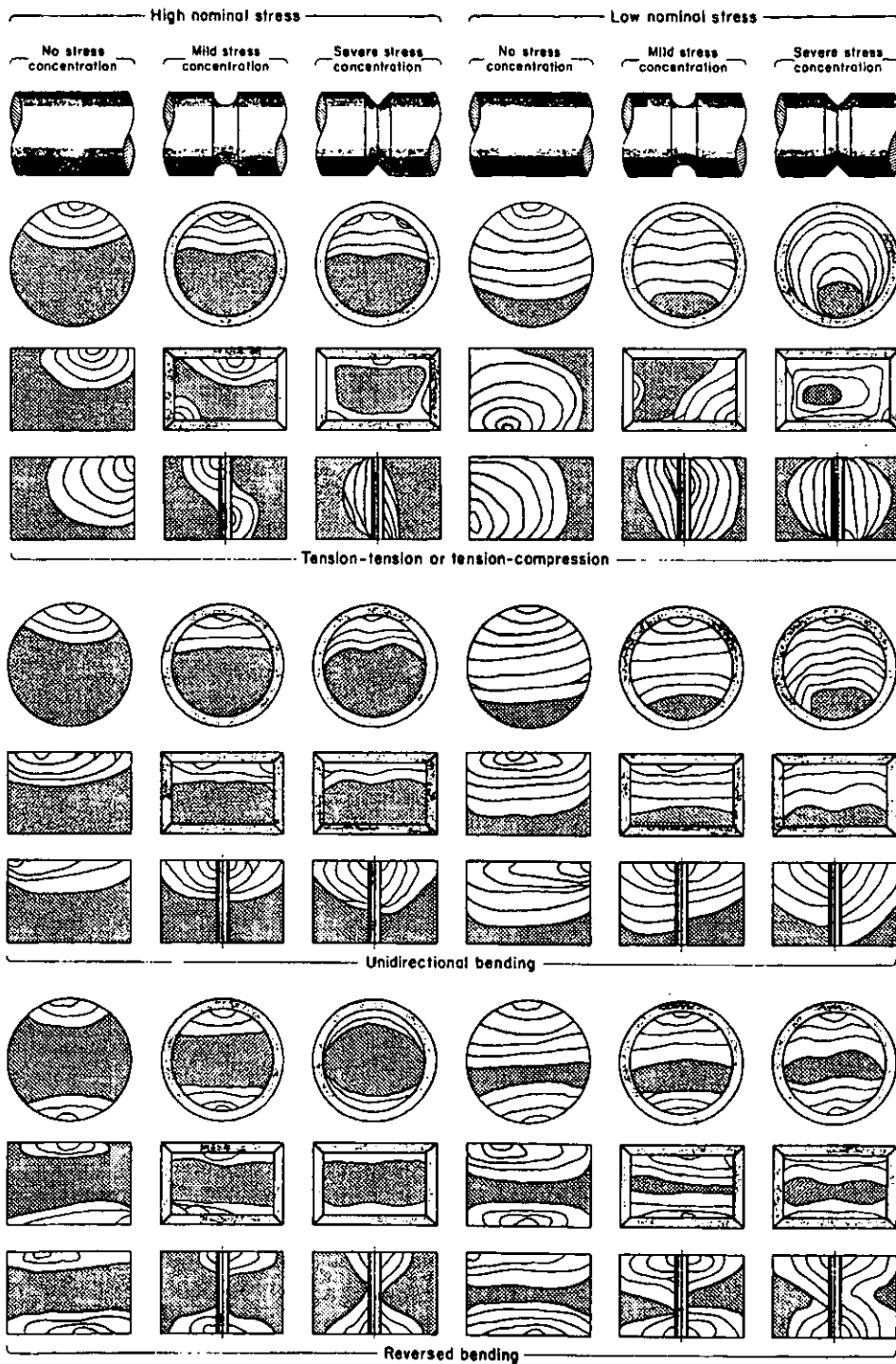


Fig. 3.23 Representación esquemática de marcas sobre superficies de fracturas por fatiga producidas en componentes lisos y muescados con secciones transversales redondas, cuadradas y rectangulares, y en placas gruesas bajo diversas condiciones de carga a esfuerzos nominales altos y bajos.



En la ausencia de concentraciones de esfuerzo en la superficie, las fisuras se propagan más rápidamente cerca del centro de una sección que en la superficie. Esto ocurre ya que las restricciones de deformación causan que los esfuerzos sean triaxiales y más severos lejos de la superficie. Sin embargo, cuando hay una muesca concentradora de esfuerzo en la superficie (tal como una cuerda con raíz aguda), el esfuerzo cerca de esta muesca puede ser más severo que debajo de la superficie. Bajo condiciones de severa presencia de muescas, a veces serán observados frentes de fisura en forma de W.

Para un material dado, el tamaño de la región de fractura catastrófica (o fractura rápida final) respecto al tamaño de la región de propagación de fisura subcrítica se incrementará conforme el esfuerzo nominal aumenta. Bajo una sobrecarga que es ligeramente mayor que lo adecuado para causar fractura, la región de fractura rápida final será relativamente pequeña; bajo un esfuerzo aplicado mucho mayor, esta región será relativamente grande.

Orígenes subsuperficiales han sido observados en fatiga de tensión-tensión o tensión-compresión, si hay una inclusión o imperfección grande debajo de la superficie en el interior del espécimen o parte, pero esto es inusual. La iniciación de fisuras en esquinas o en los bordes de barrenos taladrados puede resultar por la presencia de rebabas que quedan en esas localizaciones después del maquinado.

### 3.9 FALLAS POR CORROSIÓN-FATIGA

La corrosión-fatiga es la acción combinada de es esfuerzo repetido o fluctuante y un ambiente corrosivo para producir fisuramiento. Usualmente, un ambiente agresivo tiene un efecto perjudicial sobre la vida de fatiga, produciendo falla en menos ciclos de esfuerzo que serían requeridos en un ambiente más inerte. En ciertos casos, sin embargo, tal como exposición de superaleaciones a base de níquel a ambientes oxidantes a alta temperatura, un ambiente agresivo puede disminuir el proceso de fractura por fatiga, incrementando el número de ciclos de esfuerzo para falla.

Es importante reconocer que la corrosión-fatiga no necesariamente es implicada si el esfuerzo cíclico y exposición a un medio corrosivo ocurre sucesivamente o alternativamente. Además, la corrosión no siempre reduce la vida de fatiga, y el esforzamiento cíclico no siempre incrementa la rapidez de corrosión.

Los procesos microscópicos por los cuales una fisura por fatiga es iniciada en la presencia de una sustancia química agresiva, y por los cuales el ambiente afecta el crecimiento de la fisura, no son completamente entendidos. Muchos modelos diferentes de estos procesos han sido propuestos para explicar los efectos macroscópicos que son observados. Ningún modelo simple propuesto explica adecuadamente todos los efectos observados. En realidad, parece probablemente que diferentes procesos son responsables del comportamiento observado con diversas combinaciones de material y ambiente.

En corrosión-fatiga, la magnitud del esfuerzo cíclico y el número de veces que éste es aplicado no son los únicos parámetros de carga críticos. Los efectos ambientales dependientes del tiempo también son de principal importancia. Cuando ocurre falla por corrosión-fatiga, la frecuencia de ciclo de esfuerzo, forma de onda de esfuerzo y rapidez de esfuerzo deben ser conocidos para definir satisfactoriamente las condiciones de carga.





## **EFFECTOS DEL AMBIENTE**

La nucleación y propagación de fisuras por corrosión-fatiga en servicio están influenciadas por ambientes corrosivos, principalmente soluciones acuosas o ambientes producidos por condensación de vapor continua o periódica.

### **Efecto Sobre la Resistencia a la Fatiga**

Para un material dado, la resistencia a la fatiga, o vida de fatiga a un valor dado de esfuerzo máximo, generalmente disminuye con la presencia de un ambiente agresivo. El efecto varía ampliamente, dependiendo principalmente de las características de la combinación material-ambiente. El ambiente afecta la rapidez de crecimiento de fisura o la probabilidad de iniciación de fisura por fatiga, o ambas. Para muchos materiales, el intervalo de esfuerzo requerido para causar falla por fatiga, disminuye progresivamente con el tiempo y con el número de ciclos. Pruebas de corrosión-fatiga en especímenes lisos de acero de alta resistencia indican que reducciones muy grandes en la resistencia a la fatiga o la vida de fatiga pueden ocurrir en agua salada. Por ejemplo, la resistencia a la fatiga a diez millones de ciclos podría ser reducida a 10% de aquella en aire seco. En estas pruebas, el rol principal del ambiente fue ataque corrosivo de la superficie pulida creando elevadores de esfuerzo locales que iniciaron fisuras por fatiga. El agua salada también incrementa la rapidez de crecimiento de fisura en aceros.

Los aceros inoxidable tienen una resistencia a la fatiga más baja en agua de mar que en agua simple, probablemente debido a la presencia de iones de cloruro en el agua de mar. Se sabe que los cloruros producen fisuramiento por esfuerzo-corrosión en aceros inoxidable austeníticos, y por tanto puede ser esperado que también afecte la resistencia a la fatiga.

Aunque se sabe que el aluminio de alta pureza se pica en soluciones de cloruro acuosas, su resistencia a la fatiga es relativamente infectada por tales ambientes. Por otro lado, las aleaciones de aluminio son altamente susceptibles a corrosión-fatiga. Por ejemplo, la cantidad pequeña de vapor de agua normalmente presente en la atmósfera reduce severamente la vida de fatiga de varias aleaciones de aluminio. La vida de fatiga en aire de ambiente ha sido observado que es solo aproximadamente un décimo de la vida de fatiga en vacío, o en aire a una humedad relativa de menos de diez por ciento. El agua principalmente afecta la rapidez de crecimiento de fisura, pero una reducción en el tiempo de iniciación de fisura ha sido observado en soluciones de cloruro de sodio.

La resistencia a la fatiga de aleaciones de muchos otros sistemas es reducida por ambientes agresivos; esto parece ser cierto particularmente para aquellos sistemas que son susceptibles a fisuramiento por esfuerzo-corrosión, aunque la susceptibilidad a fisuramiento por esfuerzo-corrosión no es un prerrequisito para corrosión fatiga.

### **Efecto en la Iniciación de Fisura**

Las características superficiales en orígenes de fisuras por corrosión-fatiga varían con la aleación y condiciones ambientales específicas. En aceros al carbono, las fisuras frecuentemente se originan en picaduras por corrosión hemisféricas y frecuentemente contienen cantidades significativas de productos de corrosión (ver fig.3.24). Las fisuras son predominantemente transgranulares y excepto donde interceptan la superficie libre, se parecen a fisuras por fatiga que no son ambientalmente inducidas. La picadura superficial no es un prerrequisito para el fisuramiento por corrosión-fatiga de aceros al carbono; las fisuras por corrosión-fatiga a veces ocurre en la ausencia de picaduras.



Fig. 3.24 Micrografía a 250X, de una sección atacada con Nital a través de fisuras por corrosión-fatiga, que se originaron en picaduras por corrosión emisferica en un tubo de calentador de acero al carbono. Los productos de corrosión estan presentes a lo largo de toda la longitud de las fisuras.  
Fisuras por corrosión-fatiga en aceros al carbono.

En aleaciones de aluminio expuestas a soluciones de cloruro acuosas, fisuras por corrosión-fatiga frecuentemente se originan en sitios de picadura o corrosión intergranular. La propagación de fisura en etapa I es normal al eje de esfuerzo principal. Esto es contrario al comportamiento de fisuras por fatiga iniciadas en aire seco, donde el crecimiento inicial (etapa I)

sigue planos cristalográficos. Como se muestra en la fig.3.25, los patrones de río normalmente observados en la propagación en la etapa I en aire seco (fig. 3.25 a) son no revelados con soluciones de cloruro gaseosas (fig.3.25b). El fisuramiento por corrosión-fatiga inicial normal al eje de esfuerzo principal también ocurre en aleaciones de aluminio expuestas a aire húmedo, pero aparentemente la picadura no es un requisito para la iniciación de fisura.

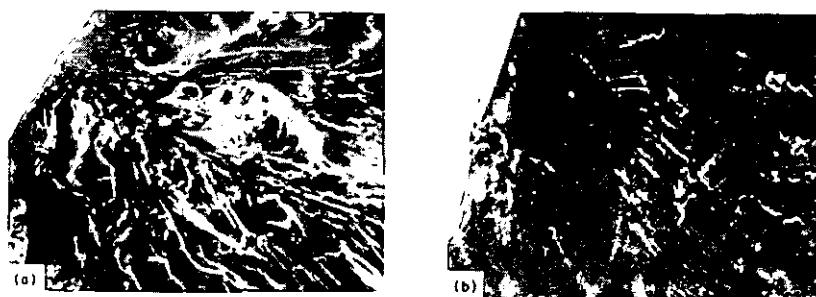


Fig. 3.25 Fractografías de SEM, a 140X, de superficies de fractura por fatiga de una aleación de Al 7075-T6, mostrándo que los patrones de río producidos en una aire seco (a) están sumergidos en una solución de NaCl al 3% (b)

Efectos ambientales usualmente pueden ser identificados por la presencia de daño por corrosión o productos de corrosión en superficies de fractura o dentro de fisuras en crecimiento. Excepciones a esta regla son aleaciones que están sujetas a daño por



hidrógeno. Por ejemplo, el fisuramiento por corrosión-fatiga de acero de alta resistencia expuesto a un ambiente productor de hidrógeno (tal como vapor de agua) puede ser difícil de identificar a partir de observaciones macroscópicas o microscópicas de una superficie de fractura; las características de superficie de fractura producidas por iniciación de fisura y propagación no difieren significativamente de aquellas producidas por fatiga en ambientes no agresivos. Por razones similares, la corrosión-fatiga puede ser difícil de distinguir de algunas formas de daño por hidrógeno, particularmente fragilización de rapidez de deformación baja inducido por hidrógeno y fatiga estática.

**Efecto en la Propagación de Fisura.** El énfasis común en pruebas de corrosión-fatiga es la medición de rapidez de propagación de fisura por fatiga en ambientes diferentes. Las indicaciones son que un ambiente afecta la rapidez a la cual las fisuras por fatiga se propagan en la mayoría de los metales, y que incluso para un sistema de aleación simple este efecto ambiental es complejo. En una aleación dada, las rapidez de crecimiento de fisura pueden variar ampliamente con variaciones en factores de esfuerzo tales como estado de esfuerzo, intervalo de intensidad de esfuerzo, y forma de onda de esfuerzo y frecuencia, además de variar como resultado de efectos ambientales.

La propagación de fisura en aceros puede ser intergranular o transgranular, aunque la última es más probable. La extensa corrosión frecuentemente daña las superficies de fractura y pueden hacer difícil la identificación positiva del mecanismo de fractura. El ambiente también puede alterar el modo de propagación de fisura; en hidrógeno, por ejemplo, el crecimiento de fisura por fatiga por cuasiclivaje ha sido observado, el cual es considerablemente diferente del modo típico de propagación de fisura por fatiga. El cuasiclivaje también ha sido observado en superficies de fractura de aceros maraging de alta resistencia fatigados en soluciones acuosas.

Al igual que en el fisuramiento por fatiga mecánica, el fisuramiento por corrosión-fatiga en aleaciones de aluminio se propaga transgranularmente; de esta manera, la direccionalidad de grano no influye apreciablemente en la propagación de fisura. Esto es en contraste a la propagación de fisuras por esfuerzo-corrosión en aleaciones de aluminio trabajadas susceptibles, la cual está marcadamente influenciada por la direccionalidad de grano.

**Influencia de la Actividad Química del Ambiente.** En contraste al fisuramiento por esfuerzo-corrosión, el fenómeno de corrosión-fatiga no depende de la presencia de una sustancia corrosiva específica; el único requerimiento es que una sustancia sea suficientemente para el material. Por consiguiente, el incremento de la actividad química (por ejemplo, disminuyendo el pH de una solución) generalmente disminuye la resistencia de un material a la corrosión-fatiga, mientras que disminuyendo la actividad química se mejora la resistencia a la corrosión-fatiga.

El comportamiento de fatiga de acero de bajo carbono en contacto con una solución neutra está directamente relacionado con la concentración de oxígeno disuelto en la solución, pero sólo cuando la concentración de oxígeno está por debajo de 0.2 atm. Eliminando completamente el oxígeno de la solución elimina la corrosión-fatiga de acero de bajo carbono, probablemente porque la corrosión es por ello reducida a un nivel en el cual éste no tiene una influencia en el comportamiento de fatiga.

La composición química de soluciones dentro de fisuras por corrosión-fatiga creciendo es esperada que sea similar a aquella observada en fisuras por esfuerzo-corrosión. En esfuerzo-corrosión, la solución en las fisuras es más ácida que el ambiente debido a los efectos de grieta. Sin embargo, bajo carga cíclica las paredes de las fisuras por corrosión-fatiga ejercen una acción recirculante de bombeo sobre la solución contenida en las fisuras; de esta manera, la solución dentro de esas fisuras puede más parecerse casi al ambiente que hace la solución contenida dentro de las fisuras por esfuerzo-corrosión.



El efecto de ambientes corrosivos sobre la corrosión-fatiga causado por alternación térmica no ha recibido mucha atención. Para algunos materiales, un ambiente corrosivo puede mejorar la resistencia a la corrosión-fatiga, especialmente cuando un óxido coherente recorre una fisura o embota la punta de la fisura. A la inversa, cuando la alternación térmica agrieta una capa de óxido, exponiendo el metal subyacente al ambiente, la resistencia a la corrosión-fatiga usualmente es reducida.

## ANÁLISIS DE FALLAS POR CORROSIÓN-FATIGA

### EXAMINACIÓN MACROSCÓPICA DE FRACTURAS

Después de que la información historial referente a la falla ha sido obtenida, y después de que la examinación en campo ha sido realizada y las muestras para investigación en laboratorio han sido recolectadas, la examinación detallada usualmente empieza con examinación visual y a baja magnificación de la parte que falló, con especial atención a características de superficies de fractura expuestas. Ya que el análisis de depósitos de superficies de fractura puede ser fundamental para la identificación de corrosión-fatiga, el primer paso en la investigación macroscópica debe ser la limpieza de la superficie de fractura con cinta de acetato de celulosa o material para réplicas plástico para preservación de cualquier depósito para microanálisis posterior. Después, si un análisis óptico electrónico o simple documentación fotográfica tienen que ser empleados, la pieza debe ser limpiada y desengrasada en un limpiador ultrasónico conteniendo acetona de grado reactivo, o solvente orgánico similar, como medio de depósito. La principal ventaja de la acetona de grado reactivo es que deja una mínima cantidad de residuo orgánico sobre la superficie de fractura pero remueve casi todo trazo de acetato de celulosa dejado por limpieza anterior. Además, la acetona es un excelente solvente para suspensiones de partículas magnéticas y la mayoría de líquidos penetrantes, los cuales son frecuentemente usados en campo para detección no destructiva de fisuras. Si la parte es demasiado grande o de otra manera no sujeta a limpieza ultrasónica, un solvente puede ser rociado sobre la superficie de la parte; el solvente no debe ser aplicado con una brocha.

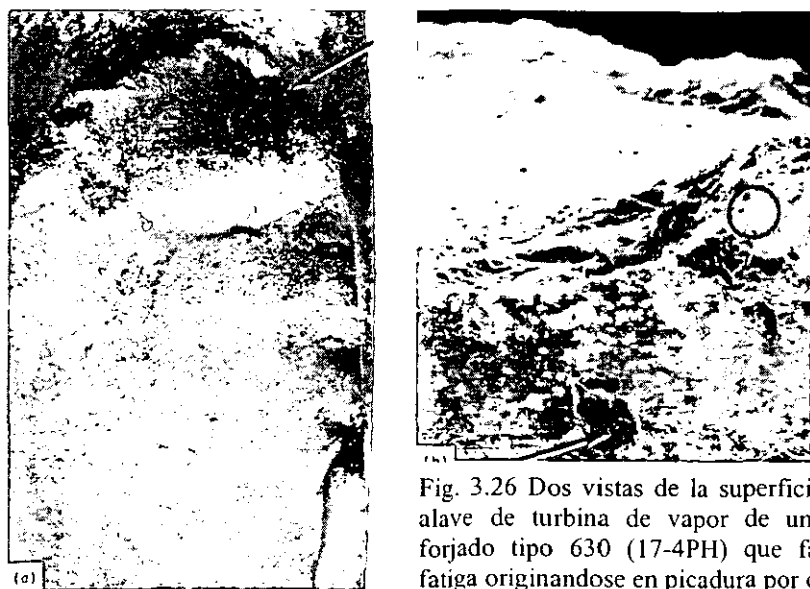


Fig. 3.26 Dos vistas de la superficie de fractura de un alave de turbina de vapor de una cero inoxidable forjado tipo 630 (17-4PH) que fallo por corrosión fatiga originandose en picadura por corrosión severa.



Orígenes de Fractura. Los orígenes de fracturas por corrosión-fatiga típicamente están rodeados por líneas de detención de fisura, o marcas de playa. Con frecuencia hay varios orígenes, particularmente cuando la fractura ha sido iniciada por picadura (ver fig.3.26). Ocasionalmente, pueden ser resueltos orígenes no bien definidos.



Fig. 3.27 Fractografías de SEM (imagen electrónica secundaria a 60X, de una fisura por corrosión-fatiga con origen único en acero inoxidable expuesto a vapor, mostrando origen friccionado (en la flecha) y marcas de playa

Las características en el origen de una fractura por corrosión-fatiga frecuentemente son indistintas ya que la porción de compresión de cada ciclo de esfuerzo ha forzado la unión de superficies de fractura y formado un origen decolorado extremadamente friccionado, como le indica la flecha en la fig.3.27. Además, el área del origen está expuesta al ambiente por el tiempo más largo, y de esta manera puede exhibir más extensos residuos de un producto de corrosión que el resto de la superficie de fractura. Un producto de corrosión en orígenes de fatiga puede ser engañoso cuando es visto macroscópicamente. El óxido puede ser uniforme y firme, globular, o nodular. A magnificaciones menores de 60x, las partículas de óxido globular o nodular son fácilmente confundidas con facetas intergranulares; de esta manera ninguna conclusión debe ser determinada hasta que otras técnicas metalográficas o fractográficas confirmen el mecanismo de iniciación de fisura. Ocasionalmente, la oxidación es tan severa que ninguna otra información más que la localización del origen puede ser obtenida.

Otras características que pueden ser observadas macroscópicamente son fisuras secundarias, picaduras, y hendiduras, todas ellas están frecuentemente adyacentes al origen principal de una particular fractura. En fallas por corrosión-fatiga, las fisuras y hendiduras adyacentes al origen primario son indicativas de un estado de esfuerzo uniforme en aquella localización. Por tanto, la fractura primaria simplemente propagada a partir de la imperfección que indujo la más severa concentración de esfuerzo o que fue expuesta al más agresivo ambiente local. Algunas veces, la fractura primaria está más relacionada a sitios de corrosión resultantes de microestructura heterogénea que a la distribución de esfuerzos.



## Propagación de Fisura

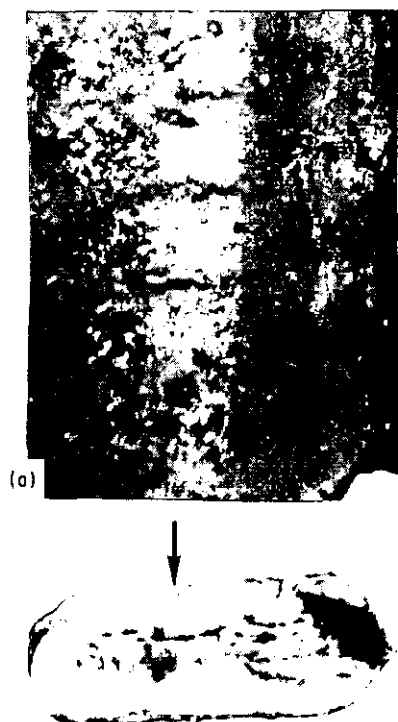
La propagación de fisuramiento por corrosión-fatiga a veces procede de fisuras o picaduras que fueron iniciadas por otro mecanismo. Por ejemplo, la fractura mostrada en la fig.3.28 fue iniciada por fisuramiento por esfuerzo-corrosión, pero la propagación de fisura ocurrió por corrosión-fatiga. En casos donde el fisuramiento por esfuerzo-corrosión y corrosión-fatiga son mecanismos en competición, como podría ser esperado en un componente expuesto a carga cíclica y carga de tensión estática en un ambiente corrosivo, el mecanismo de propagación está determinado por el factor de intensidad de esfuerzo y el tiempo de exposición. La corrosión-fatiga es favorecida a altas frecuencia de ciclo o cuando  $K_{II}$  es menor que  $K_{Isc}$ . El fisuramiento por esfuerzo-corrosión predominará cuando las frecuencias de ciclo sean bajas y  $K_{II}$  sea mayor que  $K_{Isc}$ .



Fig 3.28 Superficie de fractura de una alave de turbina de vapor de acero inoxidable tipo 403. La fractura se origina en una soldadura que no había sido relevada de esfuerzos

La corrosión-fatiga y la fatiga mecánica pueden exhibir múltiples orígenes que finalmente se unen para formar un solo principio de fisura sobre un solo plano. Sin embargo, es a veces posible distinguir corrosión-fatiga a partir de fatiga puramente mecánica por el número de fisuras propagándose a través de la parte. Frecuentemente, varias fisuras por corrosión-fatiga se forman y propagan simultáneamente a lo largo de trayectorias paralelas, como se muestra en la fig.3.29. Por otro lado, las fisuras por fatiga mecánica, pueden iniciar en varios puntos en la misma región general sobre la parte, pero usualmente una fisura llega a ser dominante, o varias fisuras se unen para formar un solo principio, antes que el fisuramiento haya progresado muy distante en la parte.

**Fractura Final.** La región de fractura rápida usualmente es macroscópicamente distinta de la región de baja propagación de fisura. La región de baja propagación de fisura casi siempre exhibe signos de corrosión, mientras que la región de fractura rápida está corroída solo cuando es expuesta suficientemente al ambiente seguido de ruptura. Por ejemplo, el área blanca a lo largo del borde derecho de la superficie de fractura en la fig.3.28(a) es una clara fractura de sobrecarga producida por rompimiento de un álabe fisurado en laboratorio durante análisis de falla. Con mayor frecuencia, la completa separación ocurre en un ambiente de servicio, y hay al menos una ligera cantidad de corrosión sobre la porción de sobrecarga de la superficie de fractura.



F.ig. 3.29 (a) Macrografía a casi 8X, mostrando múltiples fisuras por corrosión fatiga que se propagaron a lo largo de trayectorias paralelas (b) Fractografía de luz a casi 8X, de una superficie de fractura adyacente a la región mostrada en (a); la flecha indica el origen. Fisuramiento por corrosión-fatiga en alambre ovalado de acero 1065 endurecido

## EXAMINACIÓN MICROSCÓPICA DE FRACTURAS

Los estudios de superficies de fractura son realmente estudios de trayectorias de fractura. Muchas de las características encontradas a alta magnificación tienen poca semejanza a las encontradas a bajas magnificaciones, esencialmente porque los factores locales que influyen en el proceso de fractura (ambiente, estado de esfuerzo y magnitud de esfuerzo en la punta de fisura, más la microestructura) son diferentes de sus contra partes macroscópicas.



La mayoría de las características de corrosión-fatiga comienzan como pequeñas imperfecciones y crecen conforme la intensidad de esfuerzo se incrementa, conforme el ambiente en la punta de la fisura cambia y conforme la zona plástica delante del principio de fisura se incrementa en tamaño. En muchos casos, la iniciación de fisura ocurre a bajo esfuerzo con influencias cristalográficas dominantes, produciendo fractura de tipo clivaje o intergranular bien definida con un mínimo de plasticidad observada. Conforme la fisura crece, mayor plasticidad es asociada con el proceso de fisuramiento, más granos llegan a estar implicados en producir cada característica de superficie de fractura, y las características de fina escala llegan a ser menos determinadamente cristalográficas. De esta manera, una típica fisura inicia en un concentrador de esfuerzo local, crece como una fisura cristalográfica y subsecuentemente cambia a una fisura no cristalográfica conforme se propaga a través del componente.

Los microscopios electrónicos de transmisión y los de barrido son ampliamente usados en los análisis de falla.



## CAPÍTULO 4



# METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA



# METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA

---

## 4.1 ANTECEDENTES

El análisis de falla, durante años ha sido un proceso que ha venido desarrollándose, de muy diversas maneras, influenciadas principalmente por la experiencia de las personas encargadas de estos trabajos.

Por lo tanto es muy importante que cada una de las áreas cuya función, es la de analizar fallas, defina un procedimiento general, que de las directrices administrativas que orienten a las personas dedicadas al análisis, sobre acciones específicas que deben de tomar para lograr resultados oportunos y confiables.

El objetivo de proponer una metodología es que pueda ser útil a las áreas que se inician en esta actividad y que con el conocimiento de las causas que la originan, den las acciones correctivas, para evitar que se vuelvan a presentar.

## 4.2 INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de fallas en la industria, puede tener diversos orígenes, entre los cuales se pueden mencionar: Desviaciones en el proceso de fabricación, diseño inadecuado, condiciones operativas excedidas, vandalismo, etc. Por lo tanto, la función del análisis de falla es definir cual de las etapas mencionadas anteriormente, es la generadora de la falla.

Como puede observarse el campo de aplicación es muy amplio, por lo que se deberá planear, organizar, ejecutar y controlar adecuadamente las actividades involucradas en el análisis de falla.

Es necesario e importante aclarar que, el desarrollo del análisis de falla presentado aquí, es una de varias formas de llevarlo a cabo y que cada una de las áreas dedicada a esta actividad, deberá organizar, planear, ejecutar y controlar sus análisis en función de sus necesidades y recursos específicos.

## 4.3 RECURSOS

Considerando que el horizonte funcional del área de análisis de falla, será sobre diversos equipos, diseños, materiales, etc. , es necesario que este grupo de análisis cuente como mínimo con lo siguiente:

1. **Respaldo documental, en lo que se refiere a estándares, códigos o normas y especificaciones técnicas que cubran a los materiales, productos y equipos susceptibles de analizar.**
2. **Un laboratorio que tenga capacidad de realizar como mínimo lo siguiente:**
  - **Análisis químico de metales**
  - **Análisis metalográfico**
  - **Exámenes no destructivos**
  - **Pruebas mecánicas de materiales**



## 4.4 METODOLOGÍA

El análisis de fallas puede considerarse como la aplicación de un conjunto de técnicas, métodos u observaciones, con el propósito de detectar la (s) discontinuidades que presenta un material ó componente y evaluar su efecto en la integridad del sistema en condiciones específicas de servicio.

Las fallas de un material ó componente significan el incumplimiento total o parcial de las funciones para las cuales fue especificado y pueden clasificarse de manera general bajo tres consideraciones:

- a) **Cuando el componente opera, pero no satisfactoriamente**
- b) **Cuando el componente, para continuar en operación debe ser reparado**
- c) **Cuando el componente no puede continuar en operación**

## PRINCIPALES CAUSAS DE FALLA

Aunque las causas de falla son muy variadas se pueden clasificar en cuatro categorías:

1. **Diseño**
2. **Materiales**
3. **Fabricación**
4. **Servicio**

## FALLAS POR DISEÑO

Este tipo de fallas son debidas a errores cometidos por el diseñador, ya sea por incompetencia o por falta de información adecuada, Entre los errores más comunes se pueden citar:

- **Ángulos agudos**
- **Cambios en el espesor de pared**
- **Concentradores de esfuerzos.**
- **Falta de flexibilidad**
- **Uniones inadecuadas**
- **Análisis de esfuerzos mal determinado**
- **Mal diseño de tratamiento térmico**



## FALLAS POR MATERIALES

En esta categoría caen las fallas que se originan por.

- **Mala selección del material base**
- **Mala selección del material de soldadura**
- **Mal manejo del material o componente.**

## FALLAS DEBIDAS A FABRICACIÓN

Estas pueden generarse por defectos inherentes a una o varias de las etapas consideradas en la ruta de fabricación, tales como:

- **Fundición (inclusiones, impurezas, composición química, porosidad, gas atrapado, etc.)**
- **Proceso Mecánico (labios, microfisuras, incrustaciones de óxido, uniones, penetración intergranular, laminaciones, etc.)**
- **Soldadura (Entallas, salpicaduras, porosidades, falta de fusión, quemado, escoria, disparo de arco, esfuerzos residuales, etc.)**
- **Tratamiento Térmico, (Fragilidad en caliente, carburización, decarburización, grietas de temple, dureza irregular, quemado, crecimiento de grano, austenita retenida, etc.)**
- **Limpieza. (Incrustación de arena, decapado heterogéneo, maquinado, electrodepositos, etc.).**

## FALLAS POR SERVICIO

Ocurren bajo condiciones específicas de operación del sistema, tales como:

- **Radiación**
- **Corrosión**
- **Erosión**
- **Cavitación**
- **Fatiga**
- **Termofluencia**
- **Desintegración**

ó bien por accidentes que modifiquen las condiciones normales de servicio.

- **Sobre carga**
- **Sobre calentamiento**
- **Esfuerzos excesivos**
- **Choques térmicos**
- **Otros.**



La metodología del análisis, si bien varía de acuerdo al criterio, conocimiento, experiencia, etc. Del especialista que lo efectúa, tiene sin embargo algunos puntos que no deben perderse de vista, los cuales no pueden variar sin detrimento de los resultados.

La secuencia de observaciones y pruebas debe ser tal que una observación precedente no enmascare o él imite de información no necesaria en una observación posterior.

La toma de datos y antecedentes tanto del material, como de las condiciones de operación son de extrema importancia, al igual que el investigar acerca de cualquier desviación de las condiciones de servicio especificadas.

La observación visual es de primordial importancia y debe ser el análisis a efectuar; este debe hacerse en campo y tan pronto como sea posible después de que la falla se produce.

La superficie de fractura debe mantenerse en su condición original y ser protegida de cualquier tipo de contaminante. Los ensayos no destructivos son de gran importancia y por lo general deben preceder cualquier tipo de prueba destructiva u operación de corte ó limpieza.

EN GENERAL LA METODOLOGÍA INVOLUCRA LAS SIGUIENTES ETAPAS:

- 1. Antecedentes**
- 2. Examen en campo**
- 3. Examen de Laboratorio**
- 4. Análisis de Gabinete**

Los datos relevantes deben ser debidamente documentados y una línea general de necesidades y posibles alternativas y finalmente se presenta un formato de toma de decisiones a manera de sugerencia.

PRINCIPALES CAUSAS DE FALLA

- 1. Diseño**
- 2. Materiales**
- 3. Fabricación**
- 4. Servicio**

DISEÑO

- Flexibilidad
- Ángulos Agudos (codos, uniones)
- Cambios de espesor de pared
- Uniones
- Concentradores de esfuerzo
- Soldadura (Anillos de soporte, encimamiento, diseño de uniones)
- Análisis de esfuerzos mal determinados
- Tratamiento térmico.



## MATERIALES

- **Mala selección de materiales base**
- **Mala selección de soldadura**
- **Mal manejo (transportación, almacenamiento)**

## FABRICACIÓN

- **Fundición**
- **Procesos mecánicos**
- **Tratamiento térmico**
- **Soldadura**
- **Ensamble**
- **Limpieza**

## FUNDICIÓN

- **Temperatura de colada**
- **Inclusiones**
- **Gas atrapado**
- **Laminaciones**
- **Encogimiento**

## PROCESO MECANICO

### LAMINACIÓN

- **Labios (LIPS)**
- **Microfisuras (SLIVERS)**
- **Oxido superficial incrustado (SCABS)**
- **Uniones (SEAMS)**
- **Fisuras**
- **Penetración intergranular (NORMA ASTM – A335)**



## FORJA

- **Laminaciones**
- **Fisuras**
- **Entallas**
- **Falta de penetración**
- **Salpicaduras**
- **Quemado**
- **Falta de fusión**
- **Disparo de arco**
- **Oxidación**
- **Distorsión**
- **Marca de llanta**
- **Escoria**
- **Poros**

## FACTORES METALURGICOS

- **Fragilidad en caliente (impurezas o inclusiones no metálicas que reducen la cohesión por licuefacción)**
- **Penetración de material diferente**
- **Carburación o recarburación superficial**
- **Tratamiento térmico (grietas de temple)**
- **Variaciones de dureza**

## LIMPIEZA

- **Decapado heterogéneo**
- **Por chorro de arena**
- **Maquinado**

## SERVICIO

- **Esfuerzos excesivos**
- **Sobrepresión**
- **Cargas externas**
- **Fatiga (mecánica o térmica)**
- **Sobrecalentamiento**
- **Incrustaciones**
- **Hidrógeno**
- **Corrosión**



## **METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLAS**

### **1. ANTECEDENTES**

- **Hora y localización**
- **Datos de identificación**
- **Datos de proveedor, manufactura, etc.**
- **Especificaciones de materiales y fabricación**
- **Uso de equipo**
- **Condiciones de operación**
- **Tiempo de operación a la falla**
- **Registros de operación**
- **Reportes de control, inspección, etc.**
- **Especificaciones de diseño**
- **Procedimientos de ensamble**
- **Reportes previos (internos y externos)**
- **Desviaciones de operación y accidentes**
- **Testigos presénciales**

### **2. EXAMEN DE CAMPO**

- **Documentar la falla (fotos, dibujos etc.)**
- **Dimensionamiento**
- **Identificar:**
  - **. Origen de la falla**
  - **. Concentradores de esfuerzos**
  - **. Óxidos o sobrecalentamiento**
  - **. Orientación de la falla**
  - **. Modo o mecanismo posible de falla**
  - **. Tipo de fractura**
  - **. Imperfecciones**
  - **. Ensayos no destructivos**
  - **. Selección de muestras para laboratorio**

### **3. EXAMEN DE LABORATORIO**

- **Ensayos no destructivos**
- **Examen visual**
- **Examen óptico**
- **Metalografía**
- **Dirección de trabajo mecánico**
- **Propiedades mecánicas**
- **Prueba de dureza**
- **Determinar esfuerzos residuales**
- **Dimensionamiento**
- **Otras.**





#### 4. ANALISIS DE GABINETE

- **Revisión de diseño y procedimiento**
- **Análisis de esfuerzos**
- **Control de calidad**
- **Análisis de documentación**
- **Revisión de literatura**
- **Factores humanos**
- **Análisis probabilísticos de riesgos**
- **Factores externos**

#### RECOMENDACIONES

- **Efectuar el análisis lo más pronto posible**
- **Proteger la superficie de fractura**
- **Evitar contaminaciones**
- **Evitar malos manejos**
- **No olvidar datos / considerarlos todos**
- **Corroborar resultados**
- **No asumir conclusiones “ a priori”**

#### ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

- **Líquidos penetrantes**
- **Partículas magnéticas**

#### DEFECTOS SUPERFICIALES

- **Ultrasonido**
- **Corrientes de EDDY**
- **Radiografía**

#### DEFECTOS INTERNOS

- **Termografía**
- **Holografía**

#### NUEVAS TECNICAS

- **Metalografía**
- **Sensitización**
- **Determinar esfuerzos (magneto-elástico)**
- **Dureza**



## GRIETAS Y FISURAS

- **Rectas o irregulares?**
- **Una sola o varias?**
- **Abiertas o cerradas?**
- **Asociadas a marcas o aditamentos?**
- **En áreas de concentración de esfuerzos?**
- **Asociadas a soldaduras?**
- **Asociadas a productos de corrosión?**
- **Oxidación interna?**
- **Profundidad?**
- **Orientación?**

## RELACIONES

- **Alta velocidad de propagación, esfuerzos elevados, baja ductilidad: rectas, finas abiertas e individuales**
- **Alto nivel de esfuerzos residuales (abiertas)**
- **Baja velocidad de propagación (irregulares)**
- **Corrosión (A) bajo esfuerzo (B) fatiga (múltiples)**

## CAPÍTULO 5



# ESPECIFICACIONES Y DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO MECÁNICO



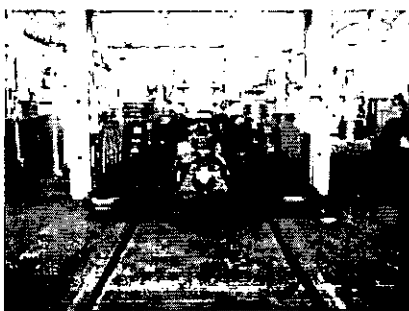
# ESPECIFICACIONES Y DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO MECÁNICO

## 5.1 DESCRIPCIÓN

El parque vehicular sobre neumáticos, que circula por las diversas líneas del sistema de transporte colectivo, esta provisto de ruedas de seguridad en un numero de 72 componentes por tren que instaladas en las mazas de los puentes motriz y remolque equipan a los dos tipos principales de bogies (motriz y remolque) **Fig. 5.1**.

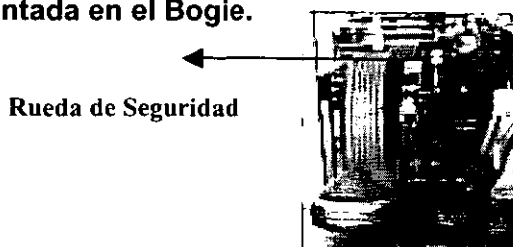
La función de la rueda de seguridad (**Fig. 5.2**) es, por una parte, la de interactuar con la timoneria de frenado, sirviendo como tambor a las zapatas de frenado y las ruedas portadoras, para transmitir los diversos grados de frenado mecánico comandados por el tren y por la otra, la de asegurar el guiado en los tramos de via en que no existe el tercer riel. Asimismo en caso de falla de algún neumático portador o al paso del tren a taller (**Fig. 5.3**), la rueda de seguridad se encarga de transmitir el peso del vehículo, así como los esfuerzos tractivos, de frenado y guiado a los carros y la vía, para garantizar la circulación del tren. Durante estas condiciones es importante destacar los esfuerzos térmicos y el desgaste a que se ve sometida la pista de rodadura y la ceja de la rueda bajo el régimen del frenado mecánico, generando con esto, la principal condición de trabajo en fatiga (387 frenados aplicados durante 11 horas al día, de 80 km/hr al paro total, con una desaceleración de 1.2 m/s<sup>2</sup> y una masa equivalente por rueda de 6056 kg para el periodo de 15 años de servicio, que es su vida útil)

Por otra parte se deben tomar en cuenta los esfuerzos de guiado que se transmiten al paso de los carros por los aparatos de vías secundarias y por los cambios de vía en terminales que se traducen en cargas de impacto sobre la ceja de la rueda (alrededor de 53 impactos por día de 4 000 kg y 0.7s).



**Fig. 5.1 Fotografía de un Bogie Motriz del parque vehicular del STC METRO. Mantenimiento Menor Talleres de Taxqueña**

**Fig. 5.2 Fotografía de la rueda de seguridad montada en el Bogie. Mantenimiento Menor Talleres de Taxqueña**





**Fig. 5.3 Fotografía a detalle de la rueda de seguridad montada en un Bogie en servicio sin neumático.**

**Mantenimiento Menor  
Talleres de Taxqueña**

## 5.2 MANUFACTURA DE LAS RUEDAS DE ACERO FORJADO

Alguno de los pasos en la manufactura de las ruedas de acero forjado son perfilados para cubrir los diseños especificados y establecidos por la división mecánica de la Asociación Americana de Ferrocarriles (AAR), la Sociedad Americana de pruebas y Materiales (ASTM), la Asociación Americana de Transito (ATA) y la Norma Internacional Europea para Empresas Ferrocarrileras (UIC).

### METODOS DE MANUFACTURA

Los procesos usados difieren en muchos detalles, pero todos han sido desarrollados para producir ruedas, las cuales cumplirán los requisitos de las organizaciones.

La manufactura de una rueda de acero forjado comienza con un bloque de acero adecuado al peso de la forma de la rueda. El bloque puede ser producido como un lingote individual, como un bloque cortado en frío desde un lingote largo o como un bloque cortado o esquilado.

Después de la inspección, los bloques son transformados en ruedas por una serie de operaciones que dan forma a la misma(en caliente) los detalles del cual dependen de las practicas de manufacturas individuales. **Fig. 5.4**



Los pasos necesarios son:

1. El bloque Fig. 5.4a es calentado lenta y cuidadosamente para ser forjado, para formar una rueda impresa. Fig. 5.4b
2. La impresión es forjada y moldeada para obtener la forma de una rueda, pero de un diámetro más pequeño. Fig. 5.4c y Fig. 5.4d
3. El bloque es reforjado y transferido al molino laminador para obtener la sección deseada de radio y diámetro. Fig. 5.4e
4. La impresión laminada es transferida a la fuente de presión donde el plato de la rueda, el cual fue laminado, es dada con forma cónica. El resultado de la operación de formación, debe verificarse con el calentamiento sencillo del bloque, o la impresión puede ser recalentado antes de un segundo forjamiento y re-calentado otra vez antes del laminado. Fig. 5.4f
5. Las ruedas se dejan enfriar uniformemente bajo condiciones controladas propiamente.
6. Siguiendo en la deformación, las ruedas son tratadas con calor y maquinadas cuando se requiere.

**Enfriamiento Controlado:** Después de la operación de formación-caliente el enfriamiento es controlado

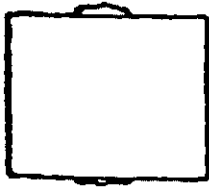


Fig. 5.4a Bloque de la rueda antes del forjado.

Fig. 5.4b Impresión de la rueda después del primer forjamiento.

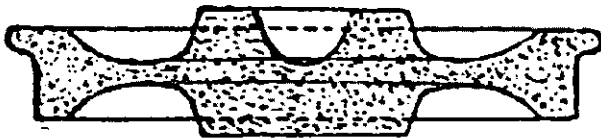


Fig. 5.4c Impresión de la rueda después del segundo forjamiento.

Fig. 5.4d Impresión de la rueda después de ser moldeada.



Fig. 5.4e Rueda después del laminado.

Fig. 5.4f Rueda después del angulo dado.

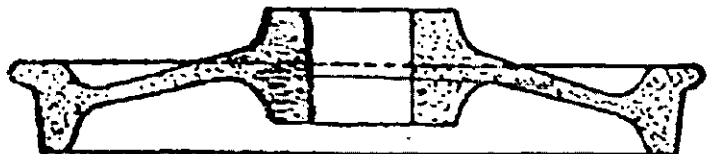


Fig. 5.4 Pasos necesarios en la manufactura de las ruedas de acero forjado.



### 5.3 MAQUINADO

Los requisitos de maquinado son cubiertos por varias especificaciones AAR M-107, ASTM A-504 y ASTM A-25, con tolerancias mostradas donde se puede aplicar con las dimensiones indicadas en las tablas respectivas.

La siguiente operación de maquinado puede ser realizada por acuerdo entre quien lo manufactura y el comprador, aunque no esta cubiertas por las especificaciones:

1. **Maquinado del plato de la llanta cubierta y el plato del eje cubierto para el mejoramiento del balance.**
2. **Hueco enfrente o en las caras traseras del eje.**
3. **Maquinado final para las dimensiones del hueco enfrente o en las caras traseras del eje incluyendo la cara del eje entero.**
4. **Maquinado del eje para obtener dimensiones reducidas**
5. **Registro de una tapa especial en grupos de mas de dos ruedas**
6. **Maquinado para un calibre especial y contornos de la pestaña**
7. **Terminación de las caras del eje para tolerancias cercanas que se especifiquen en los estándares aprobados y designados**
8. **Eje pesado para dimensiones terminadas**
9. **Perfección y tapamiento de los hoyos en el eje**

### PREPARACION DE LA SUPERFICIE

No es muy común practicar la aplicación de recubrimiento a las ruedas. Las incrustaciones son removidas de todas las ruedas para el servicio férreo y ellas son tiradas en la área del plato para mejorar la resistencia y el desgaste de los frenos.

### INSPECCION

Cuando las especificaciones del comprador estipulan que la inspección y las pruebas para la aceptación de las ruedas fueron hechas antes de transportarse desde el molino, el productor permite la inspección del comprador en planta para determinar que las ruedas han sido suministradas acorde con las especificaciones.

Para la inspección por parte del comprador de las ruedas de acero forjado y las muestras, estas son inspeccionadas y probadas generalmente en conjunto con el fabricante bajo la aplicación de normas.





## 5.4 DIMENSIONES

La siguiente información es prevista para conocer las tolerancias y las dimensiones mostradas en las especificaciones AAR o ASTM.

Las dimensiones son dadas acorde a un sistema originalmente usado por AAR para locomotoras y camiones y subsecuentemente ampliado por AAR para cubrir todas las clases de ruedas. La cara trasera o interna de la rueda-llanta es escogida de acuerdo a la posición del eje es establecida.

El lugar del eje, desde la cara trasera o cara interna de la rueda es designada por la dimensión simbolizada R1 y R2. Las tolerancias en esas dimensiones varían acorde con el tipo de equipamiento para la cual las ruedas son designadas.

Para ruedas que tienen un soporte lateral en una cara del eje la dimensión de la parte trasera de la rueda a esta cara terminada es dada sin ninguna variación de tolerancia acorde con AAR y las especificaciones ASTM. Las especificaciones proporcionadas para el tipo de material se permite para una dimensión exacta. La longitud del eje con su variación de tolerancia es medido desde la cara final del eje. Algún material dejado en la cara del eje por terminar, es añadido a la longitud del eje preliminar. **Fig. 5.5**

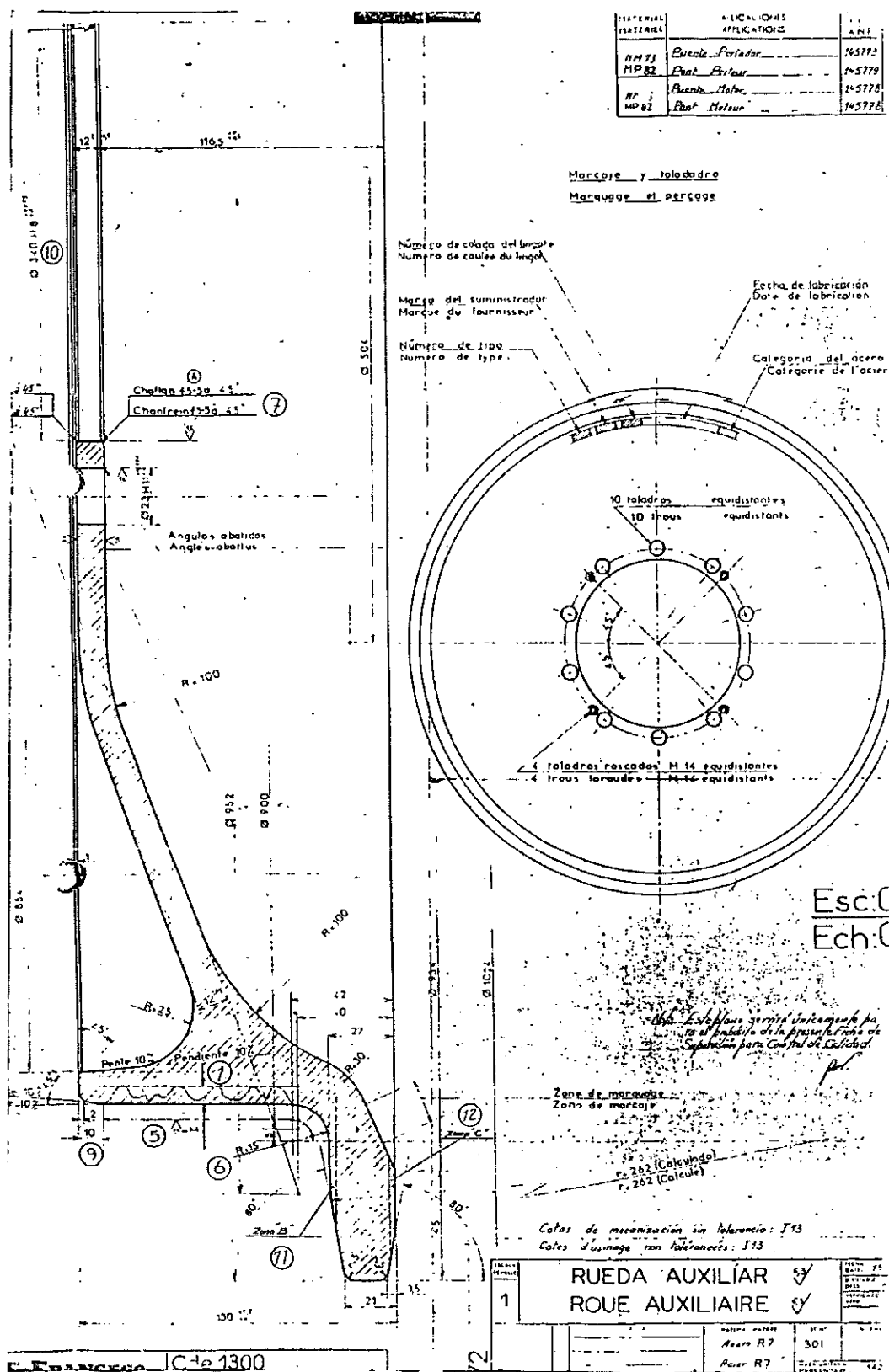


Fig. 5.5 Plano Rueda de Seguridad STC Metro



## DIÁMETRO Y TAMAÑO DE LA TAPA

Mientras las ruedas de acero forjado son designadas por diámetros nominales el tamaño o talla de la rueda es determinada por medidas de circunferencia con una tapa de acero sostenida a una distancia arreglada desde la garganta de la pestaña. La tapa es graduada en tamaño de tapas de 0.00317 m.

Para ruedas de .7112 m y sobre un diámetro, una tapa es usada con cero a una circunferencia de la rueda de 2.1336 m.

Para ruedas que tienen llantas de 0.127 m en anchura, la tapa es situada a medida de la circunferencia 0.043 m del punto de sujeción sobre la garganta de la pestaña.

Para ruedas menores de .7112 m de diámetro, una tapa similar es usada, pero el cero es colocado a una circunferencia de 1.2192 m.

El tamaño de las tapas para un diámetro exacto de las ruedas, en general son usados como se indica en la **Fig 5.6**.

## DIÁMETRO

Pulgadas	Metros	Tamaño tapa
28.0	.7112	31.5
30	.7620	82
31	.7874	107
32	.8128	132
33	.8382	157
34	.8636	182.5
36	.9144	232.5
36.5	.2713	245
38	.9652	283
40	.1016	333
42	.1067	383.5
44	.1117	433.5

**Fig. 5.6** Tabla que indica el tamaño de las tapas para un diámetro exacto de las ruedas.

Las especificaciones ASTM para ruedas de servicio-transito permite que las ruedas varíen en la talla-tamaño-especificado por 4 tapas bajas y 6 tapas-sobre para las ruedas con banda de rodamiento menor de 3 pulgadas de anchura y por 5 tapas bajas y 9 tapas-sobre-para ruedas con banda de rodamiento a 3 pulgadas o mas en su anchura.

Las ruedas son comúnmente especificadas por medidas para el tamaño de las tapas y material. Esto implica un grado de precisión que no afecten en las medidas de circunferencia de las ruedas por AAR. **Fig. 5.7 y Fig. 5.8**

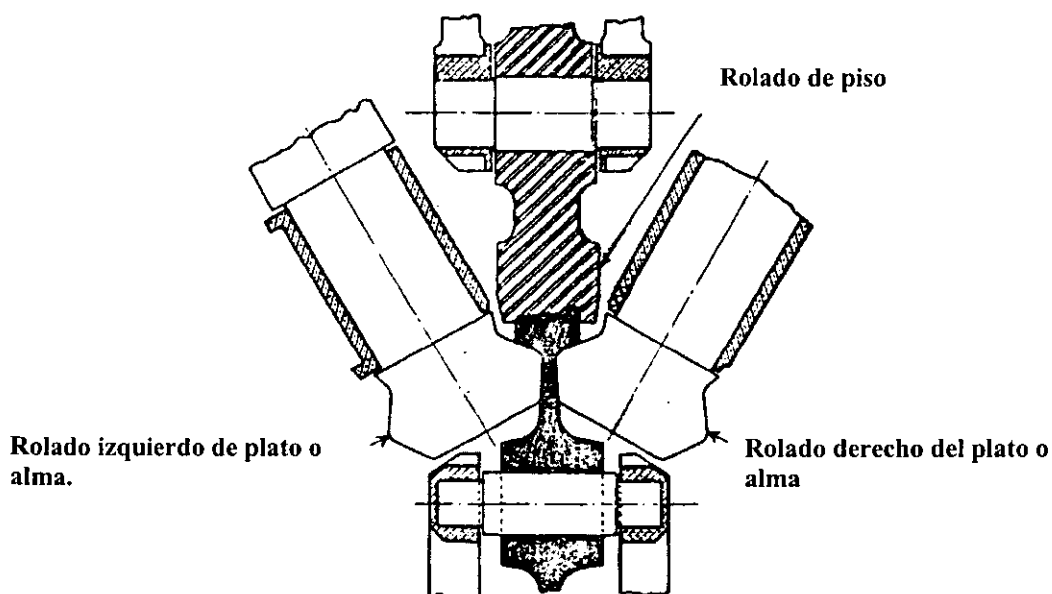


Fig. 5.7 Plan Típico de la rueda rolada verticalmente

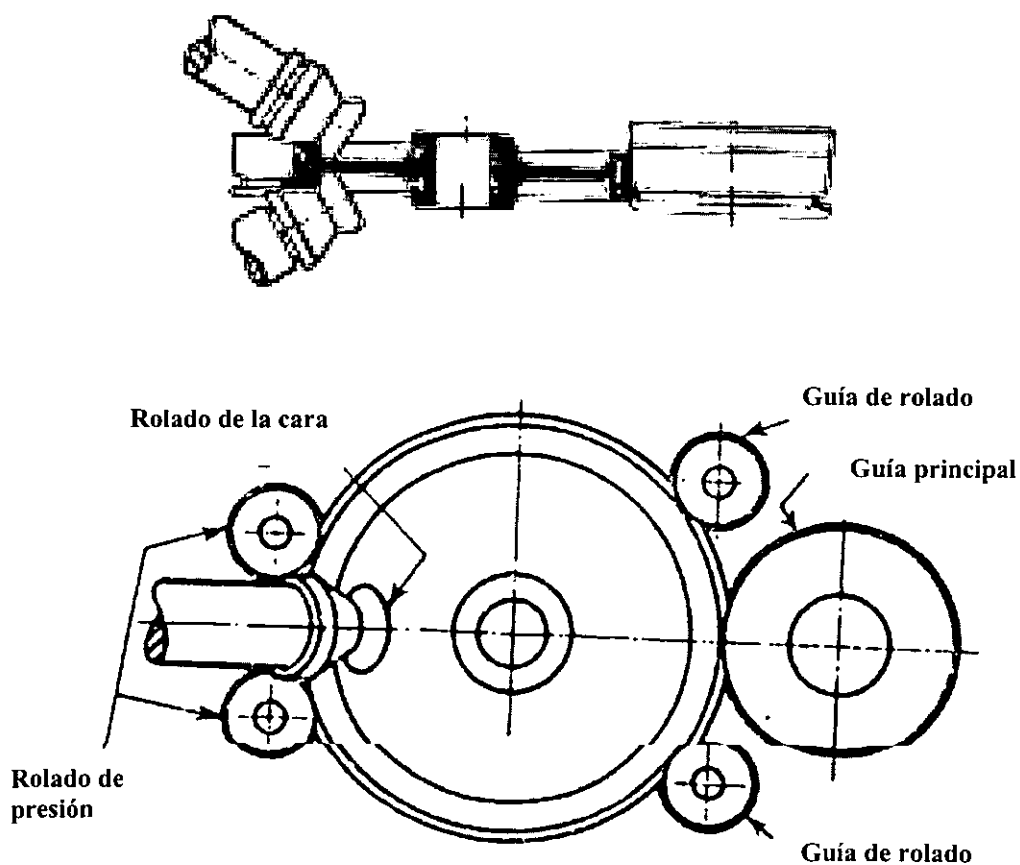


Fig. 5.8 Plan Típico y elevación seccional de la rueda rolada horizontalmente



## 5.6 TECNOLOGÍA DE LA RUEDA

La siguiente información es representativa de la técnica conocida de las ruedas.

### SELECCIÓN DE RUEDAS PARA EL SERVICIO FERREO

Las especificaciones AAR, ASTM y la UIC para ruedas del ferrocarril describen ruedas sin tratamiento y tres clases de tratamiento térmico. La elección de la clase de rueda para usarse depende de un tipo particular de acuerdo a las condiciones de servicio y equipamiento.

### FACTORES DE SELECCIÓN

La vida útil de la rueda depende en gran medida de la resistencia de la rueda a una falla térmica, las condiciones de rodadura representan un peligro y a menudo resultan en una pérdida de material en el maquinado.

### USO

El uso de las ruedas puede ser minimizado por tener ruedas propiamente y equipada en una condición mecánica. En general, la resistencia al uso es mejorada por la incrementación de dureza de la llanta y el contenido de carbón.

### FALLA TERMICA

Generalmente la falla térmica resulta del frenado severo.

Esas fallas muy a menudo ocurren en la laminación y las superficies de la pestaña sin embargo el desgaste de las fallas térmicas a veces ocurre por medio de fricción la resistencia a las fallas térmicas puede ser mejorada por la reducción del contenido carbónico de la rueda y por el tratamiento de calor.

La condición conocida como revisión térmica que es a veces notada en las superficies del piso o banda de rodadura puede ser gastada por una acción subsecuente y no es necesariamente desarrollada en una falla térmica.

Los siguientes factores deberán ser consideradas en la selección de manufactura y debería ser controlada para obtener un funcionamiento óptimo:

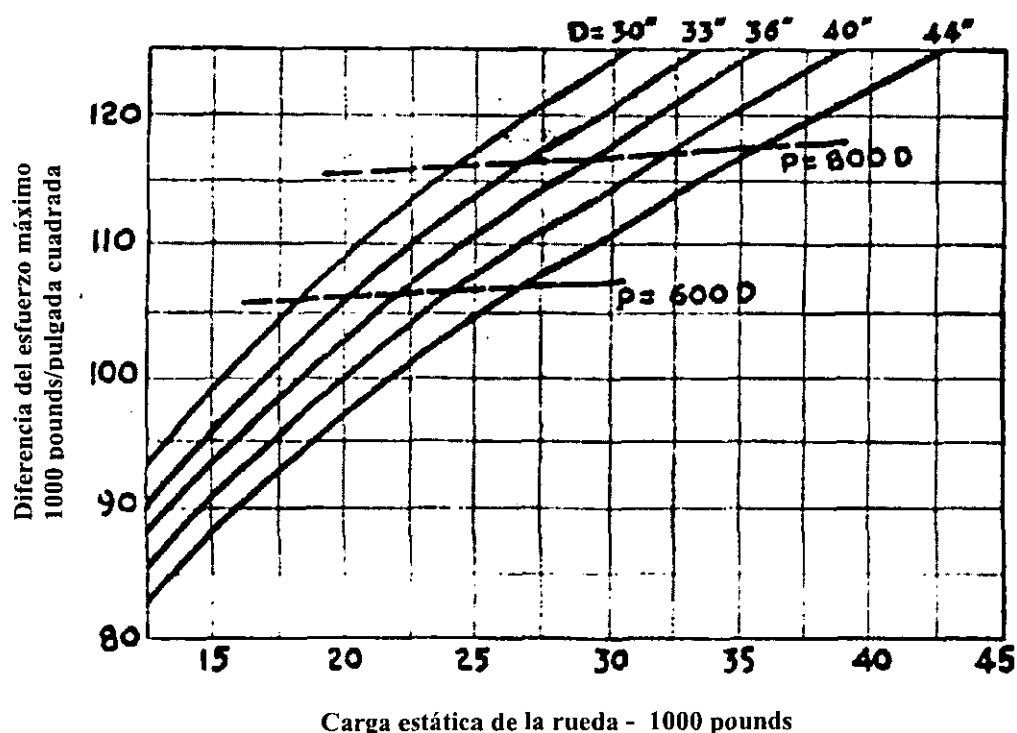
1. **Peso de la rueda**
2. **Velocidad**
3. **Frenado**
4. **Diseño de equipamiento**



## PESO DE LA RUEDA

Análisis matemáticos y prácticos han establecido un grupo de pesos de la rueda máximos que pueden ser usados como una guía para el diseño de equipamiento. Métodos de computación para determinar la tensión estática desarrollada en el piso de una llanta para alguna combinación de peso y diámetro.

La **Figura 5.9** da los resultados en términos de tensión máxima-diferencias. La tensión marcada con línea punteada que es la mitad de las diferencias, es considerada para ser el factor decisivo en el fallo de los frenos.



**Fig. 5.9** La relación entre la carga de la rueda y la diferencia del esfuerzo máximo para una nueva rueda de varios diámetros sobre un riel de 14 pulgadas de ancho. Las líneas continuas indican la diferencia de los esfuerzos máximos; las líneas punteadas representan esfuerzos en cargas llevadas sobre la rueda de 600 a 800 libras/pulgada de diámetro de la rueda.

La **Figura 5.10** da los resultados directamente en términos de la tensión (línea punteada). En ambos gráficos, las líneas rotas han sido marcadas para mostrar la tensión desarrollada en las ruedas que tienen pesos iguales a 600 y 800 libras por pulgada del diámetro de la rueda. Esta se ve que para el radio del peso del diámetro, la tensión permanece muy cercanamente uniforme. Por esta razón la expresión común del peso de la rueda por pulgada del diámetro es un criterio de la tensión-cortada-inducida en la rueda de la llanta.

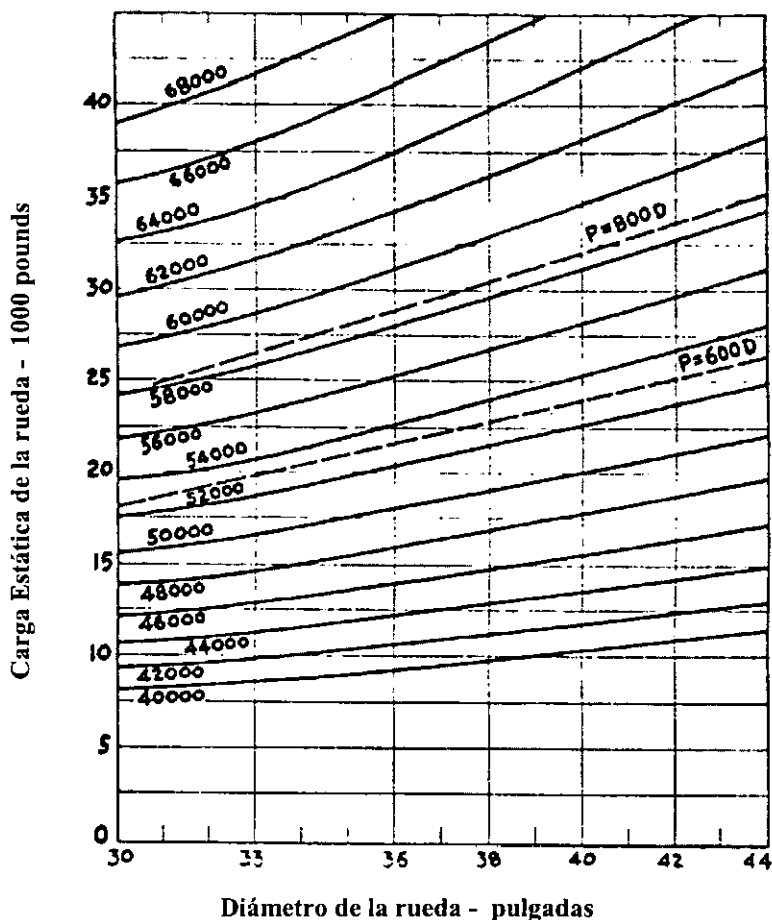


Fig. 5.10 Parte de los esfuerzos máximos calculados para varias cargas estáticas de la rueda y para ruedas de varios diámetros sobre un riel de 14 pulgadas de ancho. Las líneas punteadas representan esfuerzos en cargas llevados sobre la rueda de 600 a 800 pounds/pulgada.

Combinando esos datos con la fuerza-agotada de varias clases de ruedas produce una tabla de peso máximo de la rueda, como lo que sigue:

- Uso múltiple de las ruedas sin tratamiento. Clase U M-107
- Peso máximo 650 lb. por pulgada de diámetro
- Uso múltiple de las ruedas con tratamiento térmico esp M-107
- Clase A,B,C.
- Clase A, peso máximo-650 lb/pulgada de diámetro
- Clase B peso máximo-750 lb/pulgada de diámetro
- Clase C, peso máximo-800 lb/pulgada de diámetro

La velocidad y el frenado deberían ser considerados en el diseño del peso de las ruedas y en la elección de la clase de rueda.



## VELOCIDAD

La velocidad tiene un efecto la vida de la rueda.

1. **Un aumento en la velocidad, incrementa la fuerza de impacto con que la rueda golpea los rieles, agujas y otras irregularidades en los rieles. la fuerza del impacto aumenta a la tensión e incrementa el fallo de los frenos.**
2. **Un aumento en la velocidad, incrementa la energía cinética en el tren. Cuando los frenos son aplicados, esta energía cinética es transformada a calor por la fricción de la zapata del freno en el piso banda de la rueda. El sobrecalentamiento del piso o banda por el freno de una velocidad alta conduce el desarrollo de fallas térmicas y al daño conduce a una fractura.**

## FRENADO

Durante e frenado el calor es generado por la fricción de la superficie de la banda en contacto con la zapata del freno. De acuerdo a la velocidad que se genere, el calor se da proporcionalmente al paso de la rueda, a la velocidad y a la desaceleración.

A altas velocidades incluso con desaceleración normal, el calor se da en la superficie del piso mas rápidamente que pueda circular dentro de la llanta y el metal del piso o banda de rodadura aumenta la temperatura a 760 °C y sobre la cual la temperatura de la fuerza de la rueda es reducida mas de la mitad.

Esto puede también establecer tensiones locales para producir fisuras en puntos del piso. El calor generado entre el piso de la rueda y la zapata del freno, es proporcional al cuatro de la velocidad, a la des-aceleración, y al peso cargado por la rueda.

Por consiguiente, si el índice de calor generado se mantiene bajo, es por la velocidad y la des-aceleración que aumentan.

La des-aceleración es proporcional al coeficiente de fricción entre la zapata y la rueda, que es el resultado obtenido por la división total de la zapata del freno presionada en la rueda por el peso de la rueda.

## CONDICION DE LA VIA

Con una vía en condiciones pobres, el impacto de las ruedas contra las irregularidades del riel puede ser mas grande que los impactos de velocidad donde la vía esta en mejores condiciones.

Condiciones del piso o banda de rodadura y la tensión desarrollada en servicio.

## TENSION TERMICA

El calentamiento intermitente y el enfriamiento de la rueda debido al frenado, causa tensión que varia en la llanta y placa. Esto afecta la vida y seguridad de las ruedas en dos maneras:





Cuando la llanta es calentada por un freno prolongado se expande, causando tracción radialmente en el plato. Esto induce relativamente alta tensión que combinado con la fluctuación baja la tensión permite el peso vertical y lateral para fomentar la fractura de la placa de la rueda. Por lo tanto, las condiciones que causan en la rueda de la llanta un calentamiento repetitivo por periodos prolongados deberán ser evitados como sea posible.

Segundo cuando la llanta o una porción de la llanta es calentada por el freno, esto es moderado desde una libre expansión y es tensionado compresivamente. Durante el tiempo en que es calentado, la tensión compresiva es relajada por una cantidad dependiente del tiempo y la temperatura.

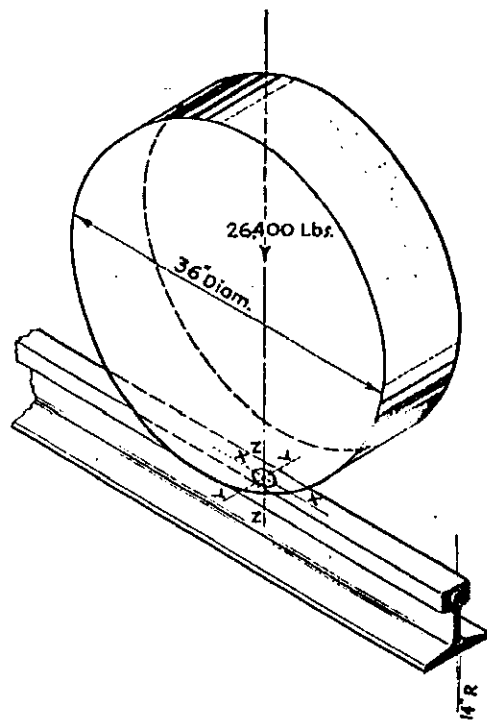
En el enfriamiento se contrae y esto se ha producido cuando se comprime, esto es regresado a la condición de enfriamiento con una tendencia hacia la tensión residual. La llanta de la rueda con un tratamiento térmico es predeterminado durante su manufactura, pero los ciclos del freno en servicio pueden gradualmente disminuir esta compresión y finalmente aumenta tensión en la llanta. Si fallas térmicas existen u ocurren cuando la llanta es tensionada ellas crecen rápidamente y se pueden extender en el plato o placa de la rueda o romper la rueda.

Cuando un fuerte freno es necesitado este factor es importante y las ruedas que son mas resistentes a las fallas térmicas deberían ser usadas.

## AREAS DE CONTACTO

La presión de la rueda en un riel produce distorsión del metal en ambas partes, así que el área de contacto es generalmente una pequeña elipse, como se muestra en la **figura 5.11**. El tamaño de la elipse puede ser computarizada desde el elástico constante y las dimensiones de la rueda y el riel. Por ejemplo, en el caso de un adecuado contorno estándar 36 in ( 914.4 mm) llanta con un peso de 11,972 g peso en un riel con 355.60 mm radio de cabezal, el calculo de la elipse será de 14.34mm de largo y 11.99mm de ancho con una área de 0.21 pulgadas cuadradas.

Con el peso de la rueda, la tensión máxima variara inversamente como el área de contacto entre la rueda y el riel. Esta área es aumentada y la tensión disminuye por el aumento del diámetro de la rueda o el radio de la cabeza del riel. El mismo efecto es también producido si el piso de la rueda esta hundido o hueco, así como el ajuste del radio de la cabeza del riel es mas cercana.



**Fig. 5.11 El área de contacto entre las dos superficies, la del riel y la rueda del Carro se produce una elipse.**

#### RELACION ENTRE PESO, DIAMETRO Y TENSION

Las ordenadas son valores de diferencia de la tensión en peso por pulgadas cuadradas, mientras las abscisas son el peso de la rueda-estática, las curvas muestran la relación entre esas cantidades para ruedas de diámetro 30,33,36,40 y 44 in. A un punto que cualquier línea vertical-peso- encuentra la curva para las ruedas de algún diámetro el valor de la ordenada leída en la escala izquierda, dando la diferencia máxima de tensión en peso por pulgada cuadrada.

Las dos líneas horizontales cercanas, cruzan las curvas que son marcadas para mostrar el efecto de las ruedas pesadas que son directamente proporcional al diámetro de la rueda. La línea inferior corresponde a la rueda pesada en pouds, obtenido por la multiplicación del diámetro de la rueda nominal en pulgadas por 600. Para la línea superior el diámetro nominal en pulgadas es multiplicado por 800.



## ESPECIFICACIÓN DE LAS MAZAS DE RUEDA PORTADORA

Cada coche del parque vehicular del S.T.C está equipado con ocho mazas de rueda portadora instaladas sobre los ejes motrices o portadores. Estas mazas permiten la sujeción de las ruedas portadoras y de seguridad mediante tornillos y pernos de alta resistencia alojados en las bridas correspondientes.

Con el fin de que la maza cumpla con los requerimientos establecidos de garantía de calidad y se asegure una vida útil mínima de 1500000 Km. Deberá considerarse el servicio extremo a que se ven sometidos estos componentes, al paso de los coches por los aparatos de vía secundaria, en los que se suceden impactos en la rueda de seguridad debido al guiado (4000 Kg.), y que son transmitidos a la brida mayor de la masa, provocando la aparición de fisuras por fatiga.

Las mazas de rueda portadora serán fabricadas en acero tipo AAR-M201 grado C, que de acuerdo con la norma correspondiente presenta la composición química de la siguiente forma:

Carbono	Manganeso	Silicio	Fósforo	Azufre
0.32	1.85	1.5	0.04	0.04

Las mazas fundidas a un tratamiento térmico de normalización y revenido de acuerdo a lo indicado en la norma AAR-M201, con el fin de obtener las características mecánicas establecidas para el tipo de material específico.

Tipo de Material	Tratamiento térmico	Resistencia a la tensión	Límite elástico	Alargamiento	Reducción	Dureza Brinell
AAR-M201 Grado C	Normalizado y Revenido	63 Kg/mm <sup>2</sup>	42 Kg/mm <sup>2</sup>	22%	45%	197 a 241

El fabricante deberá tomar las medidas necesarias para controlar el enfriamiento de las mazas durante la solidificación de la fundición y el posterior calentamiento producto del tratamiento térmico.

Las mazas serán fabricadas a partir de lingotes de acero obtenido por proceso de horno eléctrico o convertidor básico, con el fin de reducir las impurezas presentes en su elaboración.

El fabricante deberá presentar antes de iniciar la fabricación el documento que describe el "proceso de fundición", incluyendo los procedimientos de control de cada etapa del proceso, como son fundición de la pieza en bruto, tratamiento térmico, inspección por medio de ensayos no destructivos, marcas de fabricación etc.



Cada maza debe contar con los datos que permitan su plena identificación, requerida para establecer los controles previstos durante la fabricación, así como la recepción y operación de las mazas.}Los siguientes datos serán grabados u obtenidos en relieve del molde de fundición, con caracteres fácilmente legibles, en la zona de la masa:

- **Siglas de la fundidora**
- **Numero de serie de la pieza**
- **La fecha de colado (fecha y año)**
- **Numero de orden de la colada**
- **Numero de colada**
- **Tipo de acero**

Las mazas a suministrar deberán contar con los tornillos y tuercas de sujeción de la rueda de seguridad, (10 juegos por maza), así mismo con los pernos, tuercas y contratueras para la fijación de la rueda portadora (10 juegos por maza).

Debido a las condiciones de servicio a que se someterán estos elementos, es indispensable que su fabricación cumpla con las características y que forman parte de esta especificación.

- **Pasador de fijación de la rueda de hierro**
- **Tuerca de fijación de la rueda de hierro**
- **Pasador de fijación de la rueda neumática**
- **Tuerca de fijación del pasador de rueda neumática**
- **Tuerca de fijación de la rueda neumática**

Para el caso de los pasadores, que son los elementos más solicitados mecánicamente, se requiere que sean fabricados necesariamente mediante un proceso de forja y además que la cuerda sea obtenida por medio de un proceso de laminado o rolado después del tratamiento térmico, a fin de incrementar la resistencia a la fatiga de estos componentes.

## CAPÍTULO 6



# ANÁLISIS DE FALLA DEL ELEMENTO MECÁNICO



# ANÁLISIS DE FALLA DEL ELEMENTO MECÁNICO

---

## ANÁLISIS DE FALLA DE RUEDA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL RODANTE DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO

De acuerdo con la metodología para el análisis de fallas para ruedas de seguridad propuesto en el capítulo 4.

### METODOLOGÍA

#### ANTECEDENTES

#### 6.1 RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA

##### DESCRIPCIÓN GENERAL, USO DEL COMPONENTE, MONTAJE Y PARTES DE ACOPLAMIENTO

El parque vehicular sobre neumáticos, que circula por las diversas líneas del Sistema de Transporte Colectivo, esta provisto de ruedas de seguridad en un número de 72 componentes por tren, que instaladas en las mazas de los puentes motriz y remolque, equipan a los dos tipos de bogies (motriz y remolque)

La función de la rueda de seguridad es por una parte, la de interactuar con la timonería de frenado y las ruedas portadoras, para transmitir los diversos grados de frenado mecánico comandados por el tren, y por la otra, la de asegurar el guiado en los tramos de vía en que no existe el tercer riel (barra guía); Es decir que las ruedas son utilizadas como componentes auxiliares rodantes y principalmente forman parte de un sistema de freno con zapatas exteriores contráctiles accionadas por un mecanismo neumático. Asimismo en caso de falla de algún neumático portador o al paso del tren al taller, la rueda de seguridad se encarga de transmitir el peso del vehículo, así como los esfuerzos tractivos de frenado y guiado a los coches para garantizar la circulación del tren.

Este tipo de rueda se monta en una maza de rueda que se acopla al eje de la rueda y a la rueda portadora (rhin) en el que se monta el neumático. **Fig. 6.1**



## LOCALIZACIÓN Y DATOS DE IDENTIFICACIÓN

La rueda de seguridad fracturada se localizo en las instalaciones de mantenimiento menor de Taxqueña. Fue montada en el carro motriz N-1628 del tren M-038/0319 circulando en la línea dos (Taxqueña-Cuatro Caminos), ubicada en el segundo eje del lado derecho exterior. La falla ocurrió el día 15 de diciembre de 1999 a las 15:30 horas. La rueda esta identificada con el número de serie STCSMI 097 SYT 12-76U.



**Fig. 6.1 Fotografía del Bogie Motriz donde se encontraba montada la rueda de seguridad en estudio. Mantenimiento Menor Talleres de Taxqueña**

## DOCUMENTACIÓN SOBRE DISEÑO Y MANUFACTURA DE LA RUEDA DE SEGURIDAD

- a) Datos del fabricante.
- b) Especificaciones técnicas del material, diseño y fabricación.
- c) Normas aplicables a la rueda de seguridad.
- d) Planos detallados de la rueda de seguridad.

Se presenta a manera de resumen todos los datos anteriores, si se requiere información a detalle, consultar el capítulo 5 (Especificaciones y Descripción de la rueda de Seguridad)

Las ruedas están fabricadas de acero de baja aleación R6 de acuerdo a la norma UI 812-3 O son forjadas y tratadas térmicamente, llevan un maquinado parcial con especificaciones de rugosidad determinada en la banda de rodamiento y el la zona de barrenos. No especifica la vida útil.

La composición química máxima en porcentaje de la ruedas de seguridad esta dad de acuerdo a la norma UI812-3 O para un acero R6:

Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Mo	%Ni	%V	%Cr+Mo+Ni
Acero	0.48	0.40	0.75	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.50

Las ruedas de seguridad son de procedencia francesa, canadiense, española y mexicana.



## 6.2 INFORMACIÓN DE CAMPO SOLICITADA CON EL FIN DE OBTENER EL HISTORIAL OPERATIVO O DE SERVICIO

### CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN Y SERVICIO

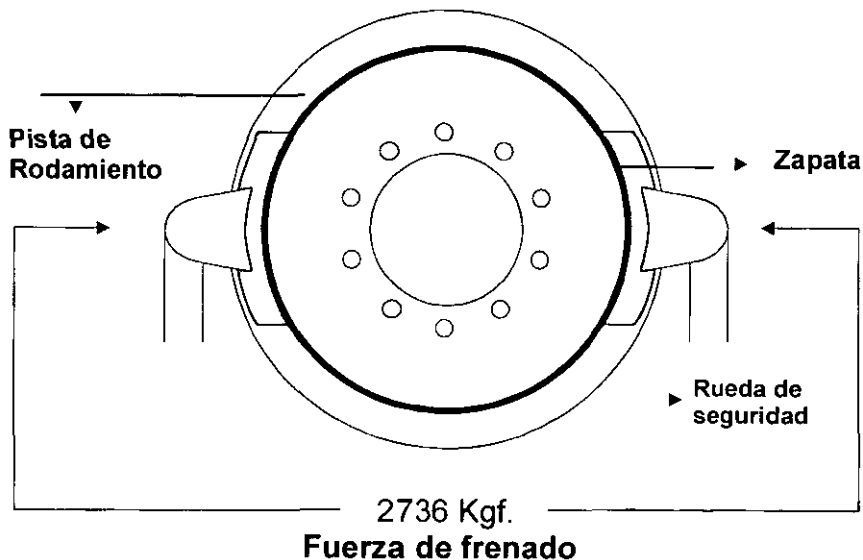
Dos zapatas accionan directamente sobre cada rueda, generando así la acción de frenado. La fuerza normal de frenado máxima sobre la zapata es aproximadamente de 2736 Kgf. Y la temperatura máxima generada en la zona de accionamiento de la zapata sobre la rueda (pista de rodamiento) esta alrededor de 237 °C.

Dentro de estas condiciones es importante destacar la naturaleza de los esfuerzos sobre la rueda en operación:

#### a) La presión por el contacto de las zapatas de los frenos:

Los esfuerzos térmicos de la rueda y el desgaste a que se ve sometida la pista de rodamiento bajo el régimen del frenado mecánico, generando con esto la principal condición de trabajo en Fatiga y reducción de la vida útil de la rueda, los esfuerzos son del orden de 2736 Kgf para 387 frenados aplicados durante 11 horas al día de 80 Km/hr al paro total, con una desaceleración de  $1.2 \text{ m/s}^2$  para un periodo de 15 años de servicio. **Fig 6.2**

### Sistema de Frenado Mecánico



**Fig. 6.2 Sistema de frenado mecánico con zapatas exteriores accionadas por un sistema neumático donde se observa el contacto de las zapatas con la pista de rodamiento.**





### b) La fuerza de lado sobre la rueda en los cruces de vías:

Tomando en cuenta los esfuerzos de guiado que se transmiten al paso de los coches por los las vías secundarias y por los cambios de vías en terminales, que se traducen en cargas de impacto sobre la ceja de la rueda de alrededor de 53 impactos por día de 4000 y 0.7 segundos. Fig 6.3

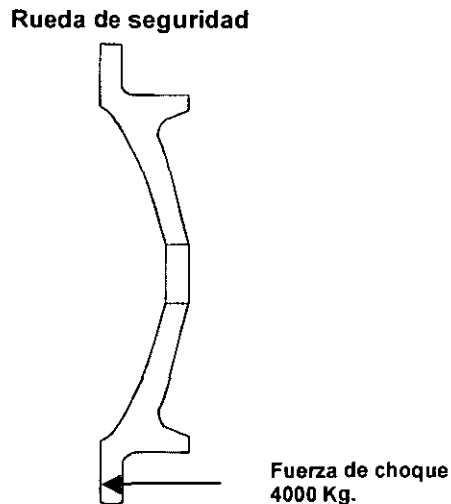


Fig. 6.3 Fuerza de choque aplicada sobre la ceja de la rueda de seguridad.

### c) Los cambios de temperatura durante el frenado frenado:

Durante el frenado el calor es generado por la fricción de la superficie de la pista de rodamiento en contacto con la zapata del freno. De acuerdo a la velocidad que se genere, el calor se da en forma proporcional al peso de la rueda, a la velocidad y a la desaceleración.

A altas velocidades, incluso con desaceleración normal, el calor se da en la superficie de la pista más rápidamente de la que puede circular dentro de la llanta y el metal de la pista aumenta su temperatura a un promedio de 237 °C.

### d) Estadísticas de fallas

El área usuaria no cuenta con una estadística de fallas debido a que n es común la falla de este tipo de piezas, consideradas como elementos de seguridad, por lo que cualquier falla que se presenta, por mínima que sea es sujeta a un estudio de prevención.



### 6.3 INSPECCIÓN VISUAL PRELIMINAR

#### DOCUMENTACIÓN DE LA FALLA

La zona de falla se encontró sobre la pista de rodamiento de la rueda de seguridad, se observa producto de oxidación en la zona de fractura. Sobre la ceja de la rueda se encontró una zona deformada cercana a la fractura, existen fisuras sobre la pista de rodamiento, las cuales se encuentran adyacentes y paralelas a la fractura, cuya longitud es aproximadamente de entre 2 y 5 mm. También se visualiza desgaste irregular sobre la pista (zona circunferencial de asentamiento de las zapatas), con menor magnitud en la parte central de la pista, de igual forma se localizaron fisuras sobre toda la pista desgastada en el extremo más delgado de la pista. **Fig 6.4**



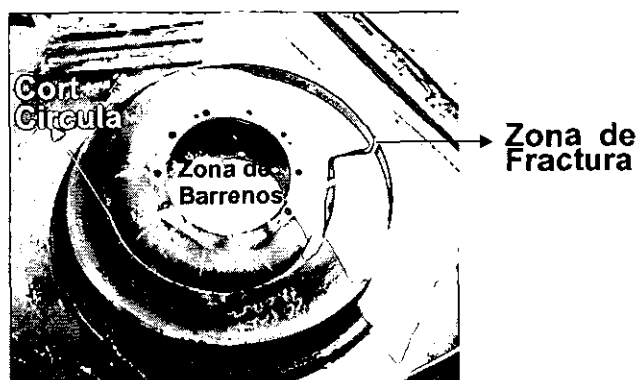
**Fig. 6.4 Presencia de óxido y fisuras adyacentes y paralelas a la zona de fractura.**



## 6.4 EXAMEN DE LABORATORIO

### SELECCIÓN Y OBTENCIÓN DE MUESTRAS PARA EL LABORATORIO

Para facilitar el seccionamiento posterior y la transportación de la rueda de seguridad de los Talleres de Mantenimiento Menor de Taxqueña al laboratorio, se realizó un corte circular con flama oxiacetilénica para retirar la parte central de la rueda (zona de barrenos), de tal forma que la flama, el material fundido o el calentamiento del metal no afectaran la integridad de la zona de fractura. **Fig. 6.5**



**Fig. 6.5 Corte circular a la rueda de seguridad para facilitar el seccionamiento posterior y la transportación de la muestra para el laboratorio.**



## 6.5 OBTENCIÓN DE LA MUESTRA PARA INSPECCIÓN Y EL ANÁLISIS DE FRACTOGRAFÍA

Tomando en cuenta las dimensiones de la rueda de seguridad, se obtuvo la sección fracturada de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se realizó un corte transversal con flama oxiacetilénica para aislar la muestra a estudiar, como se observa en la Fig. 6.6 de tal forma que la flama o el material fundido no afectaran la zona de fractura.

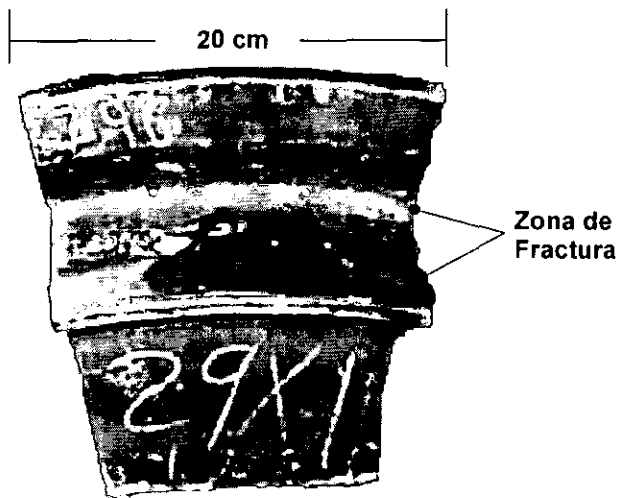


Fig. 6.6 Sección de la rueda que se obtuvo con el primer corte, manteniendo intacta la zona de fractura.

2. Nuevamente se realizó un corte transversal con una cortadora mecánica y refrigerante, cuidando no dañar la zona fracturada, obteniendo la sección la sección que se observa en la Fig. 6.7

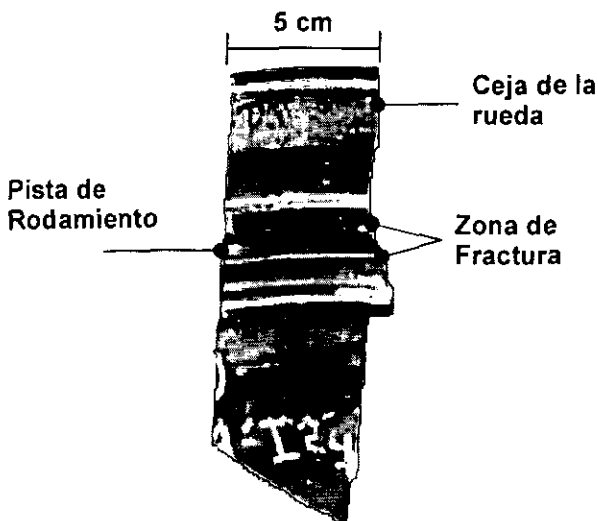


Fig. 6.7 Sección de la rueda obtenida con el segundo corte.



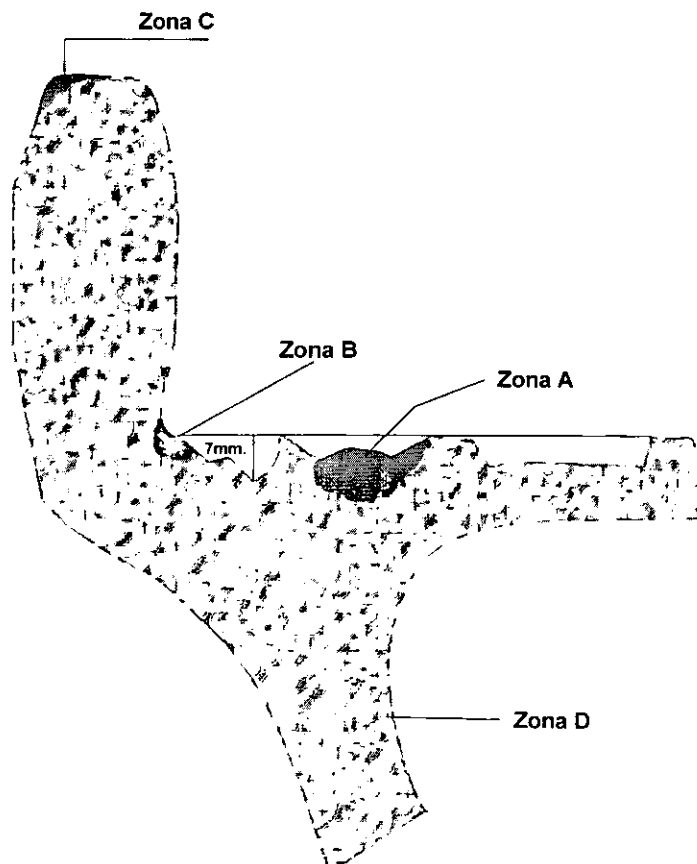
## 6.6 ANÁLISIS DE FRACTURA

Al obtener la sección de la zona de fractura (**Fig. 6.8**) se observan dos zonas de fractura cercanas a la superficie de la pista de rodamiento (**zona "A" y zona "B"**).

En la **zona "A"** se observa un área de apariencia pulida o tersa y otra de aspecto granular o aspero, las cuales son características de una fractura por fatiga.

En la **zona "B"** la fractura presenta un aspecto granular, característico de una fractura frágil.

Sobre la parte de la ceja (**zona "C"**) se aprecia un área de material deformado y en la **zona "D"** se observa un área de aspecto granular y brillante característico en una fractura frágil.



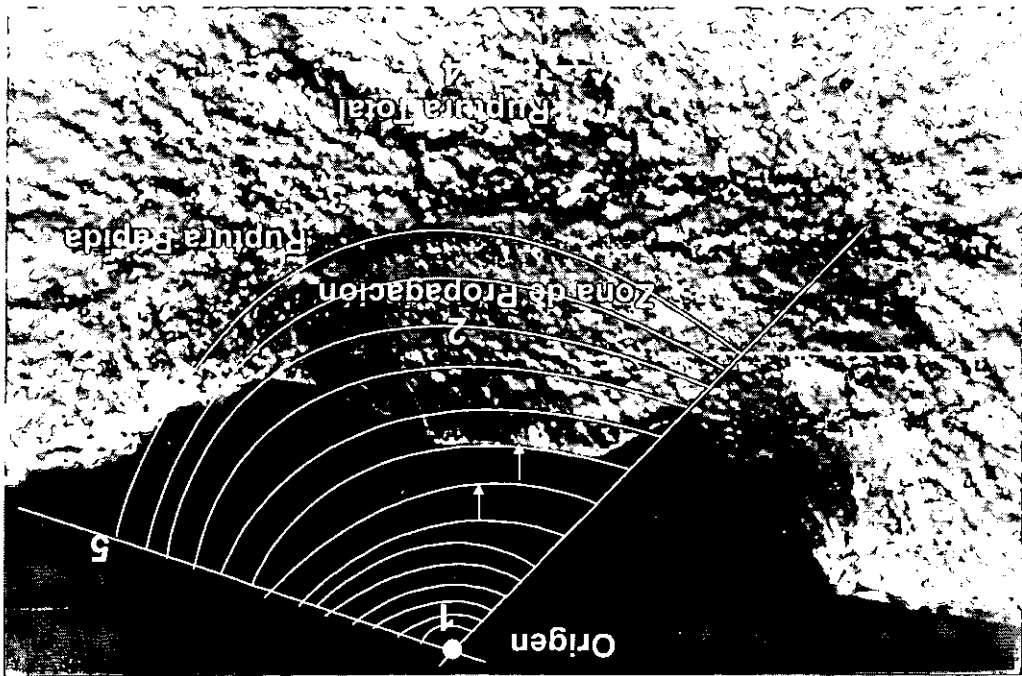
**Fig. 6.8 Aspecto de la Zona de Fractura, donde se aprecia un desgaste de hasta 7mm de la pista de rodamiento.**

Una vez formada la grieta (**punto 1**) se propaga hacia regiones de menor esfuerzo, debido a la concentración de esfuerzos la grieta se propaga un poco más durante cada ciclo (**punto 2**) hasta llegar al punto de fractura rápida (**punto 3**) creciendo hasta alcanzar el nivel crítico de esfuerzos provocando la ruptura final.

El inicio de estas marcas radiales muestra la posición de la punta de la grieta después de cada ciclo. Las flechas entre las líneas curvas indican el avance de la grieta durante cada ciclo. La zona de propagación lenta de la fractura (**punto 2**) es mas clara con respecto a la zona de fractura final. (**punto 3**)

El origen de la fractura se encuentra en la superficie (**punto 1**) donde el esfuerzo es máximo, pero debido al desgaste de la pieza, el punto de origen de la fractura ya no existe, pero basados en la observación y en la teoría de fallas, podemos deducir el posible punto de origen. La apariencia pulida o tersa en el **punto 2**, áspera en el **punto 3** y fibrosa en el **punto 4** son indicadores de falla por fatiga. Las marcas radiales observadas en el **punto 5** indican un crecimiento progresivo debido a una carga cíclica repetitiva, permitiendo con esto la oxidación dentro de la grieta.

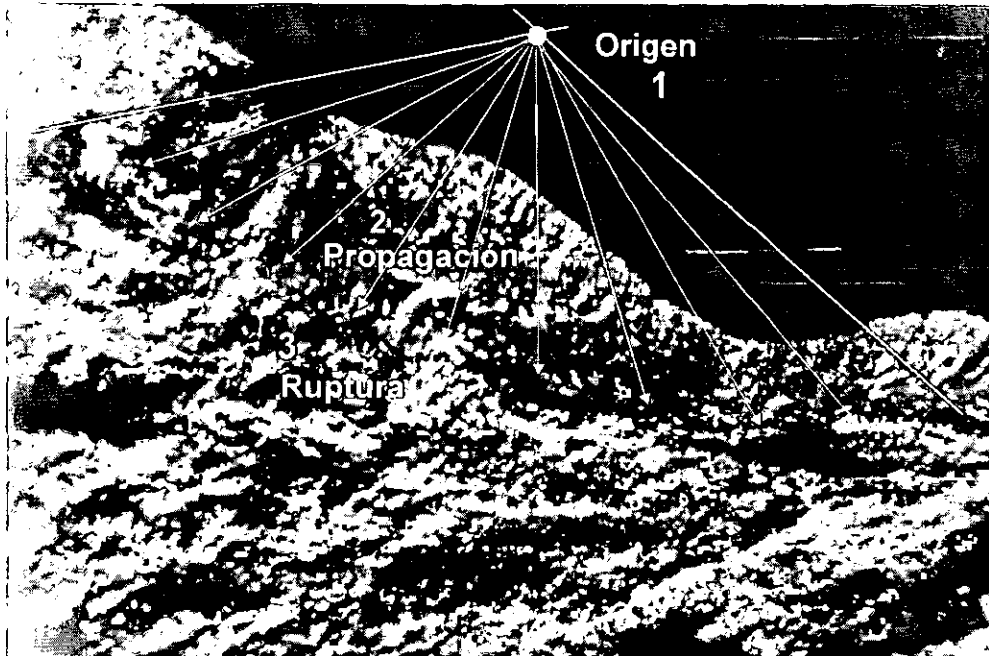
Fig. 6.9 Fractografía de baja resolución (10X). Zona "A" en detalle.



El análisis fractográfico de baja resolución se efectuó en las zonas de fractura "A" (Fig. 6.9) y "B" (Fig. 6.10), este estudio nos proveerá de información sobre la condición de las fuerzas, los efectos de la temperatura y el medio ambiente, así como el poder identificar el tipo o tipos de fractura, los puntos de origen, dirección y propagación de la falla hasta la ruptura final, lo cual describirá la secuencia de la fractura.

## 6.7 FRACTOGRAFÍA





**Fig. 6.10 Fractografía de baja resolución (10X). Zona "B" en detalle.**

El aspecto granular que se presenta es característico de una fractura frágil. (2) El origen de la fractura se encuentra en la superficie, donde por cuestiones de desgaste de la pieza el origen ya no existe. La concentración de esfuerzos fue lo suficientemente grande como para formar una grieta (1). La superficie de la fractura es perpendicular a los esfuerzos de tensión. No hay presencia aparente de deformación plástica.

La propagación de la fractura por agrietamiento formó el característico patrón Galoneado en forma de abanico. Las flechas indican la dirección de propagación provocada por los frentes de grieta separados que propagan en diferentes niveles hasta llegar a la ruptura final (3).



## ANÁLISIS METALOGRÁFICO

En la **zona "A"** la micro estructura esta constituida por perlita Eutectoide (80%) de diferente morfología, desde laminar, esferoidal y acicular con tendencia a bainita superior, con zonas claras de cementita e inclusiones tipo sulfuros de gran tamaño aglomeradas preferentemente en la superficie. **Fig. 6.11**



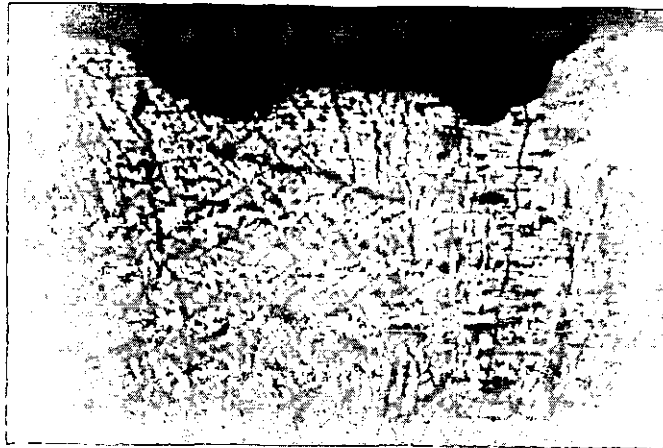
**Fig. 6.11 Aspecto de la Estructura Heterogénea de la zona "A"**

En la **zona "B"** la micro estructura esta constituida por perlita Eutectoide (80%) con morfología laminar y esferoidal rodeada de zonas claras de cementita. **Fig. 6.12**



**Fig. 6.12 Aspectos de la Estructura de la zona "B". Se observa un cambio en la estructura sobre la zona B, debido a la diferencia de tonalidad de la superficie y a la apariencia de estas.**





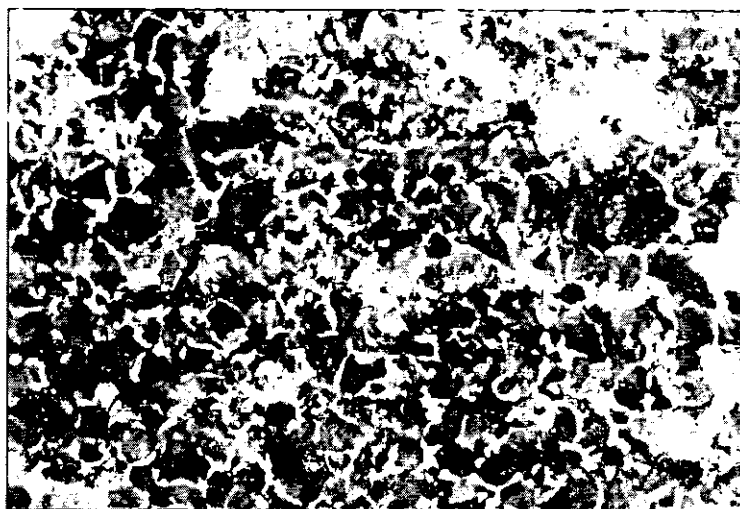
**Fig. 6.13 (continuación) Aspecto de la Estructura Heterogénea de las zonas "A" y "B".  
Se observa variación en estructura de apariencia dendrítica**

En la **zona "D"** se observa una micro estructura constituida por perlita Eutectoide (80%) laminar con zonas claras de cementita e inclusiones tipo sulfuros ampliamente dispersos.

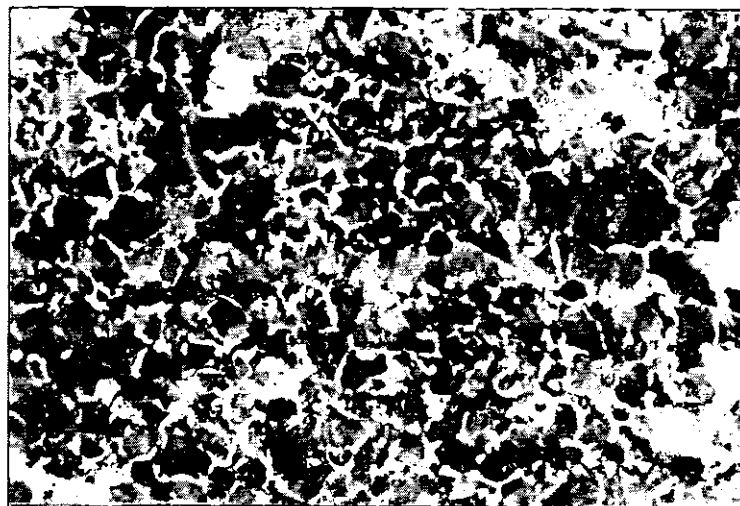
En las tres zonas la estructura es característica de un acero de alto contenido de carbono.

**Tratamiento especificado: Normalizado**

**Resultado : Fuera de especificación de acuerdo a la ficha de inspección No. EMR-79/16 de fecha Junio 13 de 1990 para una rueda nueva.**



**Fig. 6.14** Microestructura observada en la Zona Sana.  
constituida por Ferrita y Perlita



**Fig. 6.15** Microestructura observada en la Zona de Fractura  
constituida por Ferrita y Perlita



## 6.9 PRUEBA DE DUREZA

Esta prueba se realizó para verificar que los valores de dureza para las zonas evaluadas estuvieran dentro de la norma, ya que la dureza se relaciona de forma estrecha con la resistencia al desgaste.

La prueba de dureza se realizó sobre las zonas A, B y D indicadas en la Fig. 6.12, obteniéndose los siguientes valores:

ZONA	VALOR OBTENIDO		VALOR ESPECIFICADO	RESULTADO
	HB	HRC		
A	363	39	230 HB (21 HRC)	FUERA DE ESPECIFICACIÓN
B	321	34	230 HB (21 HRC)	FUERA DE ESPECIFICACIÓN
D	331	36	230 HB (21 HRC)	FUERA DE ESPECIFICACIÓN

- HV= Microdureza Vickers (136°, 100 g, 15 seg.)
- HB= Dureza Brinell (10 mm, 3000 Kg.)
- HRC= Dureza Rockwell "C" (120°, 150 Kg.)

## NOTAS:

1. El valor especificado, es el indicado en la ficha de inspección No. EMR-79/16 de fecha 13 de junio de 1979 para una rueda nueva.
2. Los valores obtenidos, son el promedio de quince ensayos de micro dureza HR realizados en cada una de las zonas indicadas, efectuando posteriormente la conversión a dureza HB y HRC.

## EQUIPO UTILIZADO:

- Microdurómetro marca Shimadzu

## CONDICIONES DE PRUEBA:

- TEMPERATURA: 20° c
- HUMEDAD RELATIVA: 46%
- PRESIÓN: 582 mmHg



## 6.10 ANÁLISIS QUÍMICO

Se determino el análisis químico en la pista de rodamiento y a 50 mm de profundidad a fin de verificar si la rueda había sido reconstruida.

**Al realizar este análisis se obtuvieron los siguientes resultados:**

	BASE		SUPERFICIE	
	OBTENIDO	ESPECIFICADO	OBTENIDO	ESPECIFICADO
% CARBON	0.82	0.52-0.57	1.15	0.52-0.57
% MANGANESO	0.64	0.60-0.85	0.63	0.60-0.85
% AZUFRE	0.03	0.050 MAX.	0.023	0.050 MAX.
% SILICIO	0.37	0.15 MIN.	0.37	0.15 MIN.

Sobre la base de los resultados el material se encuentra fuera de especificación.

**Las condiciones en que se llevo acabo la prueba son las siguientes:**

Humedad                    45%  
Temperatura                20°C  
Presión Atmosférica    582 mmHg

### NOTAS:

1. El valor especificado, es el indicado en la ficha de inspección No. EMR-79/16 de fecha 13 de junio de 1990 para una rueda nueva.

**METODO:** DETECCION INFRARROJA  
ESPECTROSCOPIA DE ABSORCION ATOMICA

**EQUIPO:** DETERMINADOR DE CARBON Y AZUFRE  
ESPECTROFOTOMETRO DE ABSORCION ATOMICA



# CONCLUSIONES



## CONCLUSIONES

---

- 1. La diferencia en dureza de las zonas evaluadas, particularmente de las zonas A y B, son debidas a la heterogeneidad estructural provocada por el calentamiento sobre la banda de rodamiento por el efecto del frenado del tren.**
- 2. La fractura observada tiene su origen a partir de una fisura térmica superficial (como puede comprobarse por la presencia de óxido ), desarrollándose en dirección perpendicular a la banda de rodamiento, lo cual termina con una fisura frágil.**
- 3. Probablemente el impacto recibido por la rueda en el cambio de vía, propago súbitamente la fisura existente, lo que dio como resultado la fractura de la rueda.**
- 4. Se recomienda verificar en particular todas las ruedas de seguridad correspondientes al lote de producción de la muestra analizada, con técnicas de ensayos no destructivos a fin de detectar la presencia de fisuras que pudieran propagarse y que combinadas con otras condiciones de operación aleatorias, pudieran originar un incidente, así mismo, ajustar los cambios de vía.**



# BIBLIOGRAFÍA



## BIBLIOGRAFÍA

---

1. Sydney H. Avner, **Introducción a la Metalurgia Física**, McGraw-Hill
2. Donald R. Askeland, **La Ciencia e Ingeniería de los Materiales**, Iberoamerica
3. González J. L., **Mecánica de Fractura: Bases y Aplicaciones**, Limusa
4. González J. L., **Metalurgia Mecánica**, Limusa
5. Dieter G. E., **Mechanical Metallurgy**, McGraw-Hill
6. **Metals Handbook**, 9<sup>th</sup> ed., Vol. 8: **Mechanical Testing**, American Society for Metals, Metals Park
7. **Metals Handbook**, 8<sup>th</sup> ed., Vol. 9: **Fractography and Atlas of Fractographs**, American Society for Metals, Metals Park
8. **Metals Handbook**, Desk Edition, American Society for Metals, Metals Park
9. Broek, D., **Elementary Engineering Fracture Mechanics**, 4<sup>th</sup> ed., Martinus
10. Anderson, T. L., **Fracture Mechanics: Fundamentals and applications**, CRC Press
11. Colangelo, V. J., and F. A. Heiser, **Análisis of Metallurgical Failures**, 2d ed., John Wiley
12. **Fatigue and Microstructure**, American Society for Metals, Metals Park
13. E 399-90, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness", American Society for Testing and Materials, Philadelphia
14. E 813-90, "Standard Test Method for JIC, a Measure of Fracture Toughness", American Society for Testing and Materials, Philadelphia
15. E 647-93, "Standard Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", American Society for Testing and Materials, Philadelphia