

34
20j



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

FATIGA EN LOS METALES

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a n :

Pedro Galicia Peña
Lino García Colina
Pedro Ramos López

Director de Tesis: Ing. Vicente Nacher T.



México, D. F.

1986



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

I N D I C E

	PAG.
1. INTRODUCCION.	1
2. GENERALIDADES.	2
3. CLASIFICACION DE FALLAS	5
4. FALLAS POR FATIGA	8
a) CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA FATIGA,	8
b) TEORIAS SOBRE FATIGA.	15
c) COMPORTAMIENTO DE LOS METALES SOMETIDOS A TENCIONES Y FRICCIONES CICLICAS	20
d) CARACT. DE LAS FRACTURAS REVELADAS MEDIANTE MACROS- COPIA.	23
e) CARACT. DE LAS FRACTURAS REVELADAS MEDIANTE MACROS- COPIA.	27
f) AGRIETAMIENTO POR FATIGA.	29
5. ACABADO SUPERFICIAL.	36
6. TAMANO Y FORMA DE LA PIEZA	40
7. CONCENTRACION DE ESFUERZOS	42
a) COEFICIENTE DE ENTALLA Y FORMA.	51
b) SENSIBILIDAD A LA ENTALLA.	54

	PAG.
8. CORROSION.	57
9. EFECTO DE LA TEMP. EN LA FATIGA.	65
10. TRATAMIENTO DE LOS METALES.	66
11. DISEÑO	70
12. SELECCION DEL MATERIAL	73
a) ASPECTOS METALURGICOS	74
b) PRUEBAS PARA PROPIEDADES MECANICAS	75
13. FALLAS POR FATIGA PREMATURA.	82
14. ESTUDIO PRACTICO DE UNA MUELLE	85
a) INTRODUCCION	86
b) NOMENCLATURA DE UNA MUELLE.	88
c) DESCRIPCION DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA MUELLE Y SU ESTUDIO METALOGRAFICO EN CADA PROCESO.	94
d) PRUEBA DE VIDA A LA FATIGA DE 4 MUESTRAS TOMADAS DU RANTE EL PROCESO.	129
e) CONCLUSIONES DE ESTUDIO PRACTICO.	146
15. CONCLUSIONES GENERALES	149
16. GLOSARIO DE TERMINOS	151
17. BIBLIOGRAFIA	156

1). INTRODUCCION

Considerando los millones de piezas o equipos que se fabrican y se ponen en servicio, no es raro que algunas fallen prematuramente. Desde el punto de vista estadístico con la práctica de la Ingeniería Mecánica, no existe un nivel de riesgo calculado de ocurrencias de falla. Sin embargo, aunque el número de fallas de una componente o equipo dado sea pequeño, son importantes ya que pueden afectar el prestigio del fabricante en cuanto a confiabilidad, ocasionando en algunos casos costosos litigios cuando la falla cause lesiones humanas o muerte.

Muchas veces el origen de la falla de un componente no proviene de su fabricación, sino de otros factores tales como: - diseño, mantenimiento, ensamble, etc. Analizando dicha falla se conocerá el mecanismo de la misma, explicándose porque fallo el componente o equipo según sea el caso, como realizar la reparación si esta es viable y el más importante, como evitar que vuelvan a ocurrir dichas fallas. Con lo anterior podemos darnos cuenta ya sea desde el punto de vista técnico o económico de la importancia del análisis de fallas.

De lo anterior se ve claro la importancia del Ingeniero Mecánico en la actividad productiva, procurando prever los aspectos mencionados.

2). GENERALIDADES.

Para llegar a establecer la definición de falla por fatiga se hace necesario inicialmente definir lo que es una "falla" que la definiremos como:

El deterioro o destrucción de un componente o equipo, - que provoca la interrupción de su servicio o de sus funciones.

Una vez establecido lo anterior definiremos lo que es - falla por fatiga.

FALLA POR FATIGA.- Es el cambio estructural progresivo, permanente y localizado que ocurre en un material sujeto a deformaciones repetidas o fluctuantes, a esfuerzos que tienen un valor máximo que es inferior a la resistencia a la tracción del material.

Con el fin de reforzar esta definición y unificar conceptos es conveniente establecer las causas que producen la falla por fatiga:

- a).- Tipo de carga (uniaxial, doblado, torsional).
- b).- Forma de la curva de la carga.
- c).- Frecuencia del ciclaje de la carga.

- d).- Patrón de carga (carga periódica a amplitud variable o constante, carga programada o carga al azar).
- e).- Magnitud de esfuerzos.
- f).- Tamaño y forma de la pieza.
- g).- Método de fabricación y rugosidad superficial.
- h).- Temperatura de operación.
- i).- Atmosfera de operación.
- j).- Concentradores de esfuerzos.
- k).- Propiedades metalúrgicas y otras.

Una vez establecido lo anterior definiremos el análisis de fallas por fatiga como:

"La parte de la metalurgia que mediante métodos, procedimientos y técnicas, se encarga de determinar las causas que provocan las fallas por fatiga de los materiales y equipos metálicos".

De la definición anterior hay que distinguir un punto importante, que es el que se refiere a las "causas". Se puede decir que todo problema tiene sus causas específicas y que para solucionarlo, en primer lugar debemos conocer con precisión aquellas que lo originaron, lo cual nos lleva al objetivo del análisis de fallas por fatiga, el cual, es determinar y describir las

causas que originaron la falla por fatiga en un componente o -
equipo.

A partir de la identificación de las causas que provoca
ron la falla por fatiga, se deberá iniciar y adoptar las accio-
nes correctivas necesarias que tiendan a evitar fallas por fati-
ga similares en el futuro.

Además de los beneficios ya aparentes, la retroalimenta-
ción de los resultados de este tipo de estudios, ha influido a -
través del tiempo, principalmente para:

- a).- Conocer las limitaciones del material.
- b).- Modificar y mejorar el diseño de piezas y equipo.
- c).- Modificar y mejorar los procesos de fabricación.
- d).- Determinar la inapropiada operación de los equipos
y poder corregir los parámetros de operación.
- e).- Deslindar responsabilidades entre diseñadores, fa-
bricantes, instaladores, operadores, etc. Con o -
sin fines legales.

3). CLASIFICACION DE FALLAS.

I.- FALLAS DEBIDAS A PROCESAMIENTO DEFECTUOSO.

a).- Imperfecciones debidas a composición inadecuada (inclusiones, impurezas que fragilicen la pieza y material defectuoso).

b).- Defectos que se originan durante la fabricación de lingotes y piezas de fundición.

c).- Defectos debidos al trabajo.

d).- Defectos debidos a la soldadura.

e).- Anormalidades debidas a tratamiento térmico.

f).- Imperfecciones debidas a defectos superficiales.

g).- Defectos debidos a los tratamientos superficiales.

h).- Fallas en la línea de separación en el forjado debido a deficientes propiedades transversales.

II.- FALLAS DEBIDAS A CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEFEC--
TUOSO O MALA APLICACION DEL MATERIAL.

a).- Fractura dúctil la cuál es debida al exceso de de-
formación, plástica o elástica y fractura por rasgadura o corte.

b).- Fractura frágil la cuál es debida a concentración-
de esfuerzos localizados en zona de intensidad crítica.

c).- Fallas por fatiga, las cuales son debidas a cargas
cíclicas, calor cíclico, fatiga por corrosión, fatiga por contac-
to durante el rodamiento y fatiga por rozamiento.

d).- Fallas por alta temperatura.

e).- Fracturas elásticas demoradas.

f).- Fallas por concentraciones de esfuerzos localizados
excesivamente severos, inherentes en el diseño.

g).- Fallas por inadecuado análisis de esfuerzos.

h).- Fallas por error al diseñar con base en propieda--
des estáticas tensiles, en vez de propiedades significativas del
material que miden la resistencia del material a cada posible mo-
do de falla.

III.- FALLAS DEBIDAS AL DETERIORO DURANTE LAS CONDICIONES DE SERVICIO.

a).- Fallas debidas a la aplicación de cargas excesivas o imprevistas.

b).- Fallas por desgaste.

c).- Fallas por corrosión.

d).- Fallas por mantenimiento inadecuado o mal dirigido o reparación impropia.

e).- Fallas debidas a desintegración debida a ataque químico o ataque por metales fundidos.

f).- Fallas por radiación, la cual varia con el tiempo, la temperatura, el ambiente y la dosificación.

g).- Fallas por condiciones accidentales como por ejemplo: temperaturas anormales de operación, vibración severa, vibraciones sónicas, desgaste, choque térmico, etc.

Para el caso de este estudio solo se analizarán las fallas por fatiga.

4). FALLAS POR FATIGA.

a).- CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA FATIGA: La mayoría de las pruebas de laboratorio, se realizan con carga uniaxial uniforme o doblado uniforme, produciendo solamente esfuerzos de tracción y de compresión. El esfuerzo es usualmente ciclado ya sea entre un máximo y un mínimo de esfuerzos de tracción o entre un máximo esfuerzo de tracción y un máximo esfuerzo de compresión. Este último se considera como un esfuerzo de tensión negativo, y se le da un signo menos algebraico y por eso se le llama esfuerzo mínimo.

Razones de esfuerzo.- A la razón algebraica de dos valores específicos de esfuerzo en un ciclo de esfuerzos se llama razón de esfuerzo. Dos razones de esfuerzos comunmente usadas son: La razón, A, de la amplitud del esfuerzo alternante al esfuerzo medio ($A=S_a/S_n$), y la razón, R, del esfuerzo mínimo al máximo ($R=S_{mín}/S_{máx}$).

Esfuerzos aplicados.- Amenudo se dan tres descripciones del esfuerzo aplicado. El esfuerzo medio, S_m , es el promedio algebraico del esfuerzo máximo y mínimo en un ciclo,

$$S_m = (S_{máx} + S_{mín}) / 2.$$

Durante el ensayo a fatiga, el ciclo de esfuerzos se

mantiene constante, así que las condiciones de aplicación de esfuerzo se pueden describir S_m y S_a donde S_m es el esfuerzo medio o estático y S_a es el esfuerzo alternante., el signo positivo se emplea para denotar un esfuerzo de tracción y el signo negativo uno de compresión.

La figura 1 sirve para ilustrar sobre los ciclos típicos de tensiones de fatiga. La fig. 1.a representa un ciclo de inversión completa de la tensión de forma senoidal. Es un caso ideal que produce una máquina de ensayo de viga rotativa y que se aproxima a las condiciones observadas en el servicio para el caso de un árbol giratorio que trabaje a velocidad constante y sin sobrecarga. En este tipo de ciclo de tensiones son iguales la máxima y la mínima.

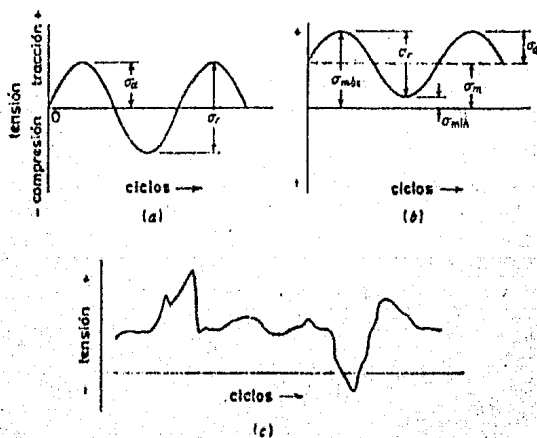


FIGURA 1. Ciclos típicos de fatiga, a) Tensión alterna (inversión); b) Tensión repetida; c) Ciclo de tensión irregular o aleatorio.

La figura 1.b, muestra un ciclo de tensiones repetidas en el que la tensión máxima $S_{m\acute{a}x}$ y la tensión mínima $S_{m\acute{i}n}$ no son iguales. Ambas son de tracción en la figura, pero un ciclo de tensiones repetidas puede contener lo mismo tensiones máxima y mínima de signo opuesto o ambas de compresión.

En la figura 1.c, se representa un ciclo complejo de tensiones, tal como se puede encontrar en una parte de un ala de avión sometida a sobrecargas periódicas imprevisibles debidas a las rachas de viento.

La figura 2 muestra esquemáticamente los componentes básicos de un tipo de máquina de ensayo a la fatiga por viga rotativa su elemento principal es un pequeño motor capaz de girar a una velocidad de 10000 rpm. Cercano al motor hay una gran chumacera, cuyo propósito es relevar al motor del gran momento de flexión que se aplica a la probeta. La probeta misma esta montada en boquillas que sirven de sujetadores. Una boquilla esta colocada en el eje impulsado por el motor, en tanto que la otra esta sujeta a un brazo de palanca rotativo. Al final de este último hay un pequeño cojinete utilizado para aplicar una fuerza descendente al brazo de palanca. La aplicación de esta fuerza coloca a la probeta de sección transversal circular en un estado de flexión, de manera que la superficie superior de la misma este en tracción mientras que la superficie inferior se encuentra en compresión.

Segun gira la probeta mediante la acción del motor cualquier posición dada sobre la superficie de la probeta se produce acción alterna entre un estado de máximo esfuerzo de tracción y un máximo esfuerzo de compresión,

Al hacer un ensayo se mide el número de ciclos requerido para fracturar la probeta a un esfuerzo dado. El esfuerzo, - por supuesto, es el esfuerzo sobre la fibra más alejada desarrollando sobre la superficie de la probeta por el momento de flexión creando al colgar un peso sobre el extremo del brazo de palanca. Este esfuerzo puede ser calculado fácilmente en términos de la magnitud del peso aplicado, la longitud del brazo de palanca, y el diámetro de la probeta en sus sección transversal mínima.

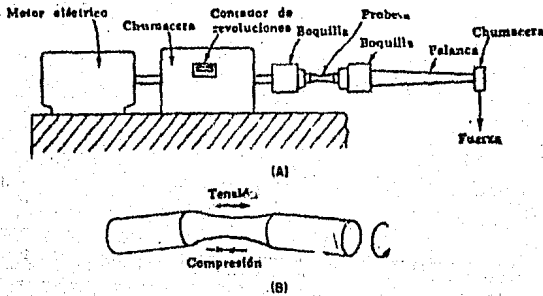


FIGURA 2. (A) Una forma de máquina de ensayo y a la fatiga en viga giratoria. (B) Probeta de ensayo a la fatiga. La probeta se dobla mientras gira. Cualquier punto en la sección reducida del medio alterna entre estados de esfuerzos de tensión y de compresión.

Curva S-N. El método fundamental para presentar los datos de fatiga es la curva de Wöhler, también llamada simplemente curva de fatiga o curva S-N (Stress-Number of cycles). Representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos hasta la rotura, N , para la máxima tensión aplicada. La mayor parte de las investigaciones sobre fatiga se han realizado empleando las máquinas de viga rotativa, también llamadas de flexión rotativa, en las que la tensión media es nula. La figura 3 muestra curvas de S-N típicas de este tipo de ensayo.

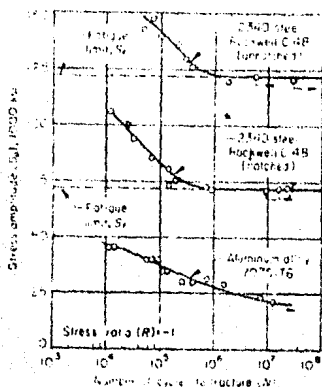


FIGURA 3. Curvas S-N o curva de Wöhler.

Como puede verse en la figura 3, el número de ciclos que dura una probeta antes de fallar aumenta al disminuir la tensión. Mientras no se indique otra cosa, N es el número de ciclos de tensión necesarios para producir la fractura completa de

la probeta. Es la suma del número de ciclos que hacen falta para que se inicie una grieta hasta la rotura total. No suele hacerse distinción entre estos dos sumandos, aunque puede apreciarse que el número de ciclos que necesita la propagación de la grieta depende de las dimensiones de la probeta. Los ensayos de fatiga a tensión baja, suelen realizarse a 10^7 ciclos y algunas veces para materiales no ferrosos, se prolongan a 5×10^8 . En algunos materiales técnicos, como los aceros y el titanio, la curva de S-N presenta un tramo horizontal a una tensión límite determinada.

Por debajo de esta tensión límite, que es la denominada límite de fatiga, se presume que el material durará un número infinito de ciclos sin romperse. La mayoría de los metales no férreos, como las aleaciones de aluminio, las de magnesio y las de cobre, tienen una curva S-N cuya pendiente disminuye progresivamente al aumentar el número de ciclos, aproximándose a una horizontal, pero sin llegar a serlo nunca. No tienen, por tanto, un verdadero límite de fatiga. En estos casos, es práctica corriente, caracterizar las propiedades de fatiga del material expresando la resistencia a la fatiga para un número estándar de ciclos. Por lo que es necesario, que cada tabla de resistencia a la fatiga especifique el número de ciclos que debe resistir una pieza de acuerdo a una norma.

M A T E R I A L	LIMITE DE FATIGA
HIERRO DULCE	1617
ACERO FUNDIDO 4340	4499
ACERO FUNDIDO 8630	4530
ACERO FORJADO 1015	2812
" 1020	2320
" 1040	4848
" 4340	2812
" 8630	4359
ACERO INOXIDABLE 403	2812
ALUMINIO 2014 T4	1406
BRONCE COMERCIAL	1617 UNIDADES Kg/cm ²
MONEL (67%Ni,30%Cu)	2179 CICLOS 10 ⁸

Procedimiento usual para determinar una curva S-N consiste en ensayar la primera probeta a una tensión elevada, a la que es de esperar que se rompa después de un corto número de ciclos, por ejemplo., una tensión aproximadamente igual a los dos tercios de la resistencia a la tracción estática del material. La tensión se va disminuyendo en el ensayo de cada una de las probetas sucesivas hasta que una o dos no rompen en el número especificado de ciclos, que suele ser de 10^7 por lo menos. La tensión máxima a la que se consigue que una probeta no rompa, después de un número indefinido de ciclos, se toma como límite

de fatiga. Tratándose de materiales que no presentan límite de fatiga se suele dar por terminado el ensayo, por razones prácticas, a una tensión baja, a la que la probeta dure, aproximadamente 10^8 a 5×10^8 ciclos. Para determinar la curva se necesitan normalmente de 8 a 12 probetas.

b).- TEORIAS SOBRE LA FATIGA. - Es, quizá, innecesario decir que no se ha propuesto ningún mecanismo o teoría que explique adecuadamente los fenómenos de fatiga. Una de las razones es que parece poco probable que nuestro conocimiento de las variaciones estructurales producidas por la fatiga sea completo. Muchas de las teorías propuestas son más bien cualitativas y se aceptan simplemente por el hecho de que el análisis conduce a relaciones tensión-log N análogas a las observadas curvas de Wöhler. Ello, sin embargo, no es un criterio de aceptación satisfactorio, porque son muchos los mecanismos supuestos que pueden conducir a la predicción de la forma general de las curvas de la fatiga.

.Teoría de Orowan.- La teoría de la fatiga propuesta por Orowan es una de las primeras que tuvieron aceptación general para explicar los fenómenos de fatiga. Esta teoría predice la forma general de las curvas de Wöhler, pero no se basa en ningún mecanismo específico de deformación, sino en el concepto general de que la deformación por fatiga es heterogénea. Se considera que el metal contiene pequeñas regiones débiles, que pueden ser

áreas orientadas favorablemente para el deslizamiento o zonas de elevada concentración de tensiones debida a entallas metalúrgicas, tales como las inclusiones. Se supuso que estas pequeñas regiones podían tratarse como zonas plásticas en una matriz elástica. Orowan demostró que para ciclos repetidos de amplitud de tensión constante, las regiones plásticas experimentarían un aumento de tensión y una disminución de la deformación, como consecuencia del progresivo endurecimiento por deformación localizado. Mostró, además, que la deformación plástica total (suma de deformaciones positivas y negativas) converge hacia un valor finito cuando el número de ciclos crece indefinidamente. Este valor límite de la deformación plástica total aumenta con el incremento de la tensión aplicada a la probeta. La existencia de un límite de fatiga se basa en el hecho de que, por debajo de una tensión determinada, la deformación plástica total no puede alcanzar el valor crítico necesario para la fractura. Sin embargo, si la tensión es grande que la deformación plástica total excede del valor crítico, se forma una grieta. La grieta crea una concentración de tensiones y esta forma una nueva región plástica localizada en la que se repite el proceso. El proceso se repite hasta que la grieta se hace lo suficientemente grande para que se produzca la rotura al alcanzarse la máxima tensión de tracción del ciclo. Esta teoría, en esencia, supone que el endurecimiento por deformación localizado consume la plasticidad del metal y se produce la rotura.

.Concepto de Wood sobre la fatiga.- W.A Wood, que ha contribuido de forma decisiva a la comprensión de los fenómenos de fatiga, ha desarrollado un concepto de la fractura por fatiga - que no requiere la aparición del endurecimiento por deformación localizada, para que se produzca deformación por fatiga. Ha interpretado sus observaciones microscópicas del deslizamiento producido por fatiga como indicativas de que las bandas de deslizamiento son el resultado de una sistemática acumulación de movimientos de deslizamiento fino correspondiente a desplazamientos de 10^{-7} cm, en vez de los pasos de 10^{-5} a 10^{-4} cm que se observan en las bandas de deslizamiento estático. Se cree que tal mecanismo permite la acomodación de deformaciones totales grandes (suma de la microdeformación en cada ciclo) sin que produzca apreciable endurecimiento por deformación. La figura 4 ilustra el concepto de Wood referente a cómo la deformación continuada por deslizamiento fino puede conducir a una grieta de fatiga. La figura muestra esquemáticamente la estructura fina de una banda de deslizamiento a los aumentos alcanzables con el microscopio electrónico. El deslizamiento producido en la deformación estática debe producir un perfil de la superficie del metal como el de la figura 4 a.

En cambio, los movimientos de vaivén del deslizamiento fino de fatiga pueden originar entallas (Fig. 4 b) o salientes (Fig. 4 c) en la superficie. La entalla podría actuar como con--

centrador de tensiones con un radio en el fondo de dimensiones atómicas. Tal situación favorecería la iniciación de una grieta. Este mecanismo explicaría por qué las grietas de fatiga se inician sobre superficies y en las intrusiones y extrusiones de bandas de deslizamiento.

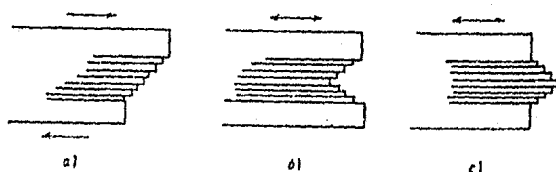


FIGURA 4. Conceptos de W.A. Wood sobre la microdeformación que conduce a la formación de grietas de fatiga. a) Deformación estática; b) Deformación de fatiga que conduce a la formación de una entalla superficial (intrusión del material); c) Deformación por fatiga que conduce a la extrusión de una banda de deslizamiento.

Modelos de dislocaciones para la fatiga.- El conocimiento creciente del papel desempeñado por sutiles variaciones de la topografía de la superficie en la iniciación de las grietas de fatiga ha conducido a varios modelos de dislocaciones para la generación de las intrusiones y extrusiones de las bandas de deslizamiento.

Cottrell y Hull han propuesto un modelo que implica la interacción de dislocaciones de pura en dos sistemas de deslizamiento, mientras Mott sugiere otro en el que interviene el deslizamiento cruzado de dislocaciones helicoidales. Los experimentos

de fatiga en cristales iónicos confirman el modelo de Mott y rechazan el de Cottrell.

.Teoría del límite de fatiga.- Una de las cuestiones más enigmáticas de la fatiga es la existencia en algunos metales de un límite de fatiga. Una posible explicación de este hecho es la dada por Rally y Sinclair que observaron que los metales que sufren envejecimiento por deformación tienen una curva de Wohler con un punto anguloso nítido y un límite de fatiga bien definido. Sus ensayos con aceros suaves comprobaron que al disminuir el contenido de carbono y de nitrógeno y, por tanto, la tendencia al envejecimiento por deformación, se suavizaba la curva de Wöhler y el punto anguloso aparecía para un número de ciclos más altos que si los contenidos de carbono fueran mayores. Resultados parecidos fueron obtenidos por Lipsitt y Horne. Estos sugirieron que el límite de fatiga representa la tensión a la que existe una compensación entre el deterioro por fatiga y endurecimiento por envejecimiento localizado. La correlación es bastante buena entre los materiales que presentan a la vez límite de fatiga y endurecimiento por deformación. Son buenos ejemplos los aceros suaves, el titanio, el molibdeno y la aleación de aluminio con 7% de magnesio. Los aceros tratados térmicamente muestran un límite de fatiga definido, pero por lo general no representan envejecimiento por deformación en el ensayo de tracción. Sin embargo, basta un envejecimiento por deformación muy

localizado para afectar a las propiedades de fatiga, y es muy posible que el ensayo de fatiga sea más sensible que el de tracción al envejecimiento por deformación.

c).- COMPORTAMIENTO DE LOS METALES SOMETIDOS A TENSIONES Y FRICCIONES CICLICAS.

El carácter del acoplamiento de algunos elementos de máquinas en los cuales los metales están sometidos a tensiones y fricciones cíclicas, se distingue, en que las cargas se transmiten a ellos por una limitada superficie y provocan en la zona altas tensiones de contacto. Una representación típica de estas piezas son las ruedas dentadas, los cojinetes de contacto rodante y otros.

Teóricamente, el contacto hasta la carga para anillos y elementos de rodamiento de los cojinetes de bolas es por puntos, mientras que para las ruedas dentadas y cojinetes de rodillos es lineal.

La solución clásica del problema de acoplamiento se basa en las siguientes premisas:

- Los metales de los elementos acoplados son homogéneos e isótopos.

- El área de contacto es muy pequeña en comparación con las superficies de los cuerpos que se acoplan.
- Los esfuerzos efectivos están dirigidos normalmente hacia la superficie de contacto de ambos cuerpos.
- Las cargas aplicadas sobre los cuerpos, crean en la zona de contacto, sólo deformaciones elásticas sujetas a la ley de Hooke.

En la construcción de engranes, de cojinetes de contacto rodante y otros, no se observa la tercera premisa. Aquí en la zona de contacto junto con las presiones normales actúan también las fuerzas tangenciales, es decir, las fuerzas de rozamiento, como consecuencia de eso, la resultante de estas fuerzas se declinan de la normal hacia la superficie de roce.

Con las premisas admitidas, el contorno de la superficie de contacto en un caso general, representa una elipse. En casos particulares dicha superficie pasa a una área redonda o a una franja limitada por dos rectas paralelas.

La figura 5.a. representa la compresión de dos esferas, cuya área de contacto tiene la forma de una circunferencia, donde la tensión de compresión máxima se localiza en el centro del área

y la figura 5.b. nos representa el caso de compresión de dos cilindros, el área de contacto tiene el aspecto de una franja ancha, limitada con líneas paralelas. La presión máxima tiene lugar en los puntos de la línea media de la franja de contacto.

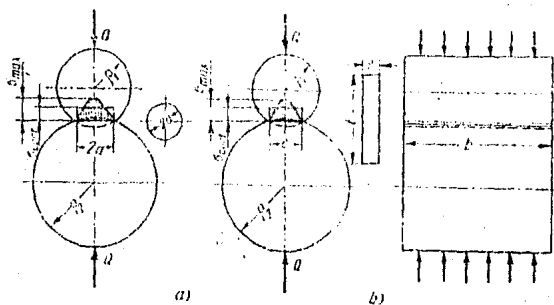


FIGURA 5

El rodamiento de las superficies de contacto va acompañado, por regla general, de su deslizamiento relativo, el cual puede ser: con sobrecarga, con la forma de las superficies acopladas y con el carácter de las deformaciones que surgen en estas superficies.

En relación con el desplazamiento continuo de la zona de contacto, la carga es cíclica y por consiguiente, las tensiones que surgen con alternatívas. Con esto se determina el carácter del desarrollo de las grietas relacionadas con el número de ciclos de la carga, lo que da una razón para incluir las cargas

de este tipo, en la teoría de las de fatiga.

d).- CARACTERÍSTICAS DE LA FRACTURA RELEVADAS POR MACROSCOPIA.- El examen de las fracturas provocadas por fatiga comienza generalmente en forma visual o con microscopio de luz a bajos aumentos. El examen macroscópico de las superficies fracturadas emplea técnicas relativamente simples; a menudo puede realizarse en el sitio de la falla, requiere poca o ninguna preparación de la muestra, requiere un mínimo de equipo relativamente simple, y no destruye a la muestra ni altera las superficies de fractura.

Marcas de playa.- El detalle más común que se encuentra en superficies de fractura por fatiga son las marcas de playa, que se centran alrededor de un punto común y que corresponden al origen del agrietamiento. Las marcas de playa son el detalle más importante en la identificación de fallas por fatiga. Las marcas de playa pueden ocurrir como resultado de cambios en la carga o en la frecuencia, o por oxidación de la superficie de fractura durante períodos de cese de agrietamiento causados por servicio intermitente de la pieza o componente.

En la figura 6, se muestran ejemplos de superficies que contienen marcas de playa, la fractura que se muestra en la figura 6a, es la de una placa de aluminio aleado 7075-T6 que fue

fracturada en el laboratorio mediante prueba de fatiga por carga espectral. Las marcas de playa fueron producidas por cambios en crecimiento de grietas como resultado de las variaciones en los niveles de carga aplicados. La región final de fractura (etapa-3) cubre alrededor del 40% de la superficie de fractura. La figura 6b, muestra la superficie de una fractura por fatiga en una flecha de acero 4130 que falló en servicio; esta superficie exhibe marcas de playa producidas por oxidación de la fractura cuando no se usaba la flecha. Las marcas de playa mostradas en la figura 6c, fueron producidas por una combinación de variaciones en la carga y períodos de descanso a los que normalmente se usan en un cigueñal automotriz (en este caso, un cigueñal de hierro dúctil).

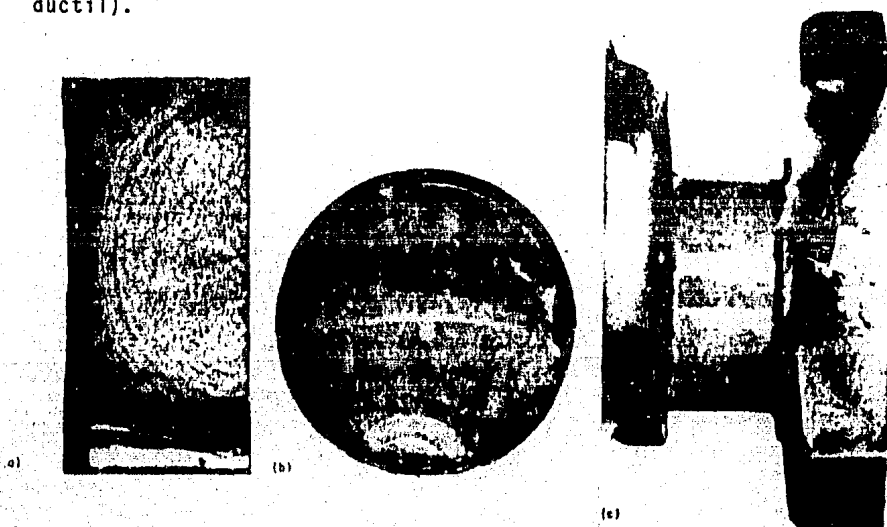


FIGURA 6. Marcas de playa dentro de la región de fatiga en las superficies de fractura de tres metales distintos.

Zona de fractura final.- La zona de fractura final de una superficie fracturada por fatiga es a menudo fibrosa y es parecida a las superficies de fractura de las pruebas de impacto o de fractura-rugosidad del mismo material. El tamaño de la zona de fractura final depende de la magnitud de las cargas; y su aspecto depende de la forma, tamaño y dirección de las cargas de la parte fracturada.

En materiales tenaces, con secciones gruesas o redondas, la zona de fractura final consistirá en una fractura de dos distintos modos:

a).- Fractura por tracción (modo de deformación plana)- extendiéndose de la zona de fatiga y en el mismo plano,

b).- Fractura por corte (modo de esfuerzo plano) a 45° de la superficie de la parte que rodea a la fractura por tensión.

Estos dos modos se ilustran en la superficie de una fractura por fatiga a través de una sección gruesa en la figura 7.



FIGURA 7

Dos cosas ayudan a determinar el origen de la rotura en la zona de fractura final son:

a).- La fatiga se origina usualmente en la superficie, y por eso el origen de la fatiga no se incluye en la fractura de labio de corte.

b).- La presencia de marcas de forma de punta de flecha en la fractura tensil que apuntan al origen de la fractura.

En piezas en forma de hoja delgada con tenacidad suficiente, la fractura final ocurre en una forma algo diferente. - Conforme la grieta se propaga de la zona de fatiga, el plano de fractura gira alrededor de un eje en la dirección de la propagación de la grieta hasta que forma un ángulo de alrededor de 45°-

con la dirección de la carga y la superficie de la hoja. El plano de fractura, inclinado 45° con respecto a la dirección de la carga, puede ocurrir tanto en un plano único como en un doble plano de corte, como se ilustra en la figura 8.

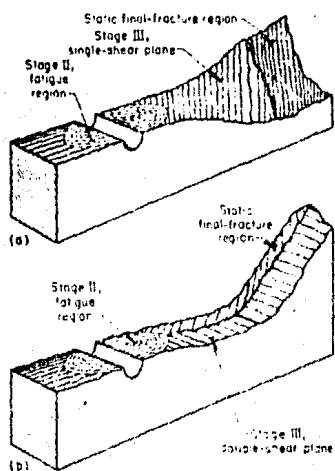


FIGURA 8

e).- CARACTERÍSTICAS DE LA FRACTURA REVELADAS MEDIANTE MICROSCOPIA.- A veces es difícil examinar las fracturas por fatiga mediante microscopía luminosa porque la altura del relieve puede exceder la profundidad de campo del microscopio, especialmente a altas ampliaciones. Exámenes metalográficos de áreas transversales a través de fracturas por fatiga, muestran que el camino típico fue transgranular. Una sección transversal a tra-

vés de una grieta que no ha crecido suficientemente para causar la separación del componente es frecuentemente útil para mostrar las deficiencias en el diseño o manufactura, o en mostrar el resultado de condiciones de servicio no anticipadas.

Estrías.- En el microscopio electrónico el examen de las superficies de fractura por fatiga muestra principalmente parches de marcas paralelas finamente espaciadas, llamadas estrías de fatiga. Las estrías de fatiga tienen una orientación perpendicular a la dirección microscópica de la propagación de la grieta y con carga uniforme, generalmente incrementa su espaciamiento conforme se progresa del origen de la fatiga. Cada estría es el resultado de un solo ciclo de esfuerzos (pero cada ciclo de esfuerzo no produce necesariamente una estría) y el espaciamiento de las estrías es fuertemente dependiente del nivel de carga aplicada. La claridad de las estrías depende de la ductilidad del material. Las estrías son más visibles a niveles de esfuerzos más altos que el límite de fatiga; también, son visibles más fácilmente en materiales dúctiles. Así pues, los parches de estrías de fatiga en aceros de alta resistencia son menos visibles que en una aleación de aluminio, también las estrías son más visibles a altos niveles de esfuerzo que cerca del límite de fatiga.

Las estrías se vuelven onduladas y desarrollan un frente rugoso a altas razones de crecimiento de grieta (10^{-4} pulg./-

ciclo o más). En el frente de la grieta existe una gran zona plástica, que puede causar un extenso agrietamiento secundario. Cada agrietamiento secundario se propaga como una grieta de fatiga, creando una red de estrías secundarias.

La dirección local de la grieta puede diferir marcadamente de la dirección global de la propagación de la grieta a causa de los cuantiosos cambios en la dirección del cambio de la fractura local.

En los aceros, las estrías de fatiga que se forman a razones ordinarias de crecimiento de grieta no están siempre tan bien definidas como lo están en las aleaciones de aluminio. Las estrías que se forman en las aleaciones de aluminio a muy bajas razones de crecimiento de grieta (menos de 5×10^{-6} pulg./ciclo) son difíciles de resolver y casi no se pueden distinguir de la red de líneas de deslizamiento y bandas de deslizamiento asociadas con la deformación plástica y cerca del frente de grieta conforme se propaga a través de la sección.

f).- AGRIETAMIENTO POR FATIGA.- Es normalmente el resultado de esfuerzos cíclicos que están muy por debajo del punto de cedencia estático del material, (sin embargo, en fatiga a bajos ciclos o si el material ha sido endurecido por trabajo apreciablemente, los esfuerzos pueden estar arriba del punto de ce-

dencia). Generalmente, una grieta por fatiga se inicia en una región de elevados esfuerzos de un componente sujeto a esfuerzos cíclicos de magnitud suficiente. La grieta se propaga bajo la carga aplicada a través del material hasta producir la fractura total. A escala microscópica, el detalle más importante del proceso de fatiga es la nucleación de una o más grietas bajo la influencia de esfuerzos reversibles que exceden el esfuerzo de flujo, seguido por el desarrollo de grietas en bandas de deslizamiento persistentes o en los límites de grano. Subsecuentemente, las grietas por fatiga se propagan por una serie de movimientos de abrir y cerrar en la arista de la grieta que producen entre los granos, estrías paralelas que limitan la grieta.

Inicio de la Grieta.- Las grietas por fatiga suelen formarse o iniciarse en los puntos de máximo esfuerzo y mínima resistencia en zona localizada. El patron de esfuerzo local queda determinado por la forma de la pieza (incluyendo características que afectan a la superficie y las imperfecciones metalúrgicas que concentran al esfuerzo macroscópico) y por el tipo de magnitud de la carga. La resistencia queda determinada por el propio material, incluyendo todas las discontinuidades, anisotropías e inhomogeneidades presentes.

Las imperfecciones locales de la superficie tales como rasguños o defectos de fabricación son los defectos más obvios -

en los que comienzan las grietas por fatiga. También tiene influencia en la formación de grietas la presencia de discontinuidades superficiales y sub-superficiales en lugares críticos. Las inclusiones tanto endógenas como exógenas de material extraño, - las partículas duras precipitadas y las discontinuidades del - cristal como los límites de grano y las fronteras gemelas son - ejemplos de concentradores de esfuerzos en la matriz del mate- - rial. A escala submicroscópica la densidad de dislocaciones, - los defectos de la red y la orientación de los planos de desliza- - miento transversal controlan la formación de:

- a).- Bandas de deslizamiento persistente.
- b).- Intrusiones y extrusiones.
- c).- Celdas de dislocaciones.

En las raíces de muescas son pequeñas grietas, el estado de esfuerzos es triaxial (deformación plana). Esto reduce la ductilidad aparente local del material y ayuda a controlar la - orientación de la grieta siempre y cuando ésta sea pequeña. A ni- - vel microscópico, la superficie de fractura en el origen proviene de los planos cristalinos en granos individuales que están - más favorablemente orientados para el deslizamiento.

Nucleación de la grieta.- Se ha observado una gran variedad de características cristalográficas como causantes de las

grietas por fatiga. En los metales puros, son lugares comunes - para iniciar grietas los hoyos tubulares que se vuelven bandas - persistentes de deslizamiento, pares de extrusión-intrusión en - superficies libres y fronteras gemelas. El agrietamiento tam- - bién se inicia en ausencia de debilidades inherentes a las del - límite de grano; a altas razones de deformación, este parece ser el sitio perfecto para la nucleación de grietas. La nucleación - en un límite de grano es aparentemente un efecto geométrico úni - camente, mientras que la nucleación en un límite de grano gemelo está asociado con el deslizamiento activo de los planos cristali - nos inmediatamente adyacentes y paralelos a el límite gemelo.

Los procesos mencionados también ocurren en aleaciones - y materiales heterogeneos. Sin embargo, las prácticas al alear y en la producción comercial introducen segregación, inclusiones, partículas de segunda fase y otras características que cambian - la estructura y éstas tienen un efecto dominante en el proceso - de nucleación de grietas. En general, las aleaciones que: incre - mentan el deslizamiento transversal, incrementan la formación de límites gemelos, incrementan el endurecimiento por trabajo, esti - mularán la nucleación de la grieta. Por otra parte, el alear - usualmente sube el esfuerzo de fluencia de un metal, haciendo - así a un lado, al menos parcialmente, el efecto potencialmente - perjudicial de la nucleación de grietas por fatiga.

Relación con el medio ambiente.- Al observar la ubicación de las nucleaciones de grietas, la posibilidad de mecanismos relacionados con el medio ambiente deben de ser considerados. Por ejemplo, un gran número de fallas se originan en estructuras levemente cargadas pero en áreas hostiles. En cualquier estructura que tenga fricción con algún movimiento relativo, el rozamiento origina un posible lugar para iniciar la falla.

Propagación de la grieta.- Una vez que la grieta ha sido nucleada, su razón y dirección de crecimiento están controladas por esfuerzos localizados y por la estructura del material en la punta de la grieta.

-Propagación inicial.- La primera etapa de la propagación de la grieta ocurre en forma perpendicular al máximo esfuerzo de tensión. A nivel microscópico, las direcciones locales de propagación están controladas en cierta forma por los planos cristalinos y pueden formarse en o ser paralelos a las bandas de deslizamiento en los granos cercanos a la superficie. En los granos interiores, las grietas de rajadura se forman a menudo en la intersección de las bandas de deslizamiento con las fronteras límite de grano. En materiales de alta resistencia que contienen partículas esferoidales de segunda fase, hay nucleación de grietas secundarias por delante del frente de grieta principal (fatiga sin deslizamiento) alrededor de dichas partículas. En la

fatiga sin deslizamiento, las grietas se forman a lo largo de los planos de la red que están ubicados desfavorablemente con respecto al máximo esfuerzo de tensión.

-Agrandamiento de la grieta.- Después de que una grieta se ha nucleado y propagado a un tamaño finito, se vuelve un elevador de esfuerzos macroscópicos y puede ser mas importante que cualquier otro elevador de esfuerzos que ya esté en la pieza. En este momento, el origen de la grieta tomará control de la dirección de la fractura. En seguida, la orientación de la superficie agrietada dependerá del campo de esfuerzo en el origen de la grieta y en muchos casos seguirá una serie de huecos progresivos conforme avance el origen de la grieta. A escala microscópica, la extensión inicial de la grieta ocurre bajo condiciones de deformación plana. Esto ocasiona una superficie típica de grano fino y cara plana que cuando se produce bajo carga aleatoria o secuencias de esfuerzos de altas y bajas amplitudes, exhibe marcas de playa características. Las variaciones en la propagación de la grieta en materiales anisotrópicos o no homogéneos producen ocasionalmente marcas de playa difíciles de interpretar.

-Propagación final.- Después de que la grieta ha crecido a un tamaño que cambie significativamente la capacidad de carga de la pieza, se sigue generalmente un cambio en la dirección del crecimiento de la grieta. Las fracturas en hoja de metal exhi-

ben un labio de corte aproximadamente 45° de la fractura de cara plana. En piezas cilíndricas, aunque la fractura pueda todavía parecer plana en general si el nivel de esfuerzo de operación es bajo, la apariencia de la superficie se vuelve más fibrosa y muestra más ductilidad (mayor tamaño de la zona plástica en el origen de la grieta), indicando un cambio de extensión de grieta a fractura final rápida. Como regla general, la fatiga a bajos esfuerzos y altos ciclos producen fracturas de cara lisa (deformación plana). La superficie de fractura se observa con granos finos y ligeramente pulida cerca del sitio de nuclea de grieta, donde la intensificación de esfuerzos es mínima. La superficie se vuelve progresivamente más rugosa y más fibrosa conforme la grieta crece y la intensidad del esfuerzo aumenta. En las superficies sometidas a fatiga de altos esfuerzos y bajos ciclos, la superficie es fibrosa, rugosa y más típica de las condiciones de carga de esfuerzo plano, en que la dirección general de fractura está a 45° de la principal carga de tensión.

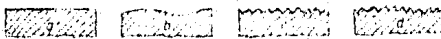
5). ACABO SUPERFICIAL.

Aparte de la exactitud de medidas, cuando se trabaja - una pieza metálica se le exige que quede con una determinada calidad superficial.

Existen dos tipos de superficies las cuales se mencionan a continuación:

-Superficie teórica o exigida.- Es la superficie que se pide a la pieza terminada, se indicará en el dibujo mediante signos normalizados.

-Superficie real práctica.- Es la superficie real que resulta al terminar el mecanizado.



Signo superficial	Significado	Probabilidad de ocurrencia	Signo superficial	Significado	Profundidad de marcas en μ
Signo de superficie teórica	Superficie teórica, como las que se obtienen por trabajo sin ataque que de virutas (planchado, fresa, rodado, etc.)	señal triangular	Signo de superficie real práctica	Superficie real, como las que resultan en trabajos de acabado con arranque de viruta. Las marcas no se ven ya a simple vista.	hasta 25
Signo de superficie real práctica	Superficie real, como las obtenidas en que las virutas caen sin arranque de viruta (por ejemplo enlundos concluidos)	señal triangular	Signo de superficie real práctica	Superficie real, como las que resultan en un afinado leve con arranque de viruta. Las marcas no se ven ya a simple vista.	hasta 5
Signo de superficie real práctica	Superficie real, como las que resultan en trabajos de desbaste con arranque de viruta. Las marcas se notan al tacto y se ven a simple vista.	hasta 100	Signo de superficie real práctica	Superficie real, como las que resultan mediante un afinado superficial, por ejemplo, el lapchado (también llamado laminado o vaciado) y el repaso.	hasta 1

TABLA 2. Diferentes acabados superficiales y simbología.

Todas las fracturas de fatiga se inician prácticamente en la superficie. En muchos tipos comunes de carga como la flexión y la torsión, la tensión máxima se produce en la superficie, por lo que es lógico que el fallo se inicie allí.

Los factores que pueden afectar a la superficie de una probeta de fatiga se pueden dividir en:

- a).- Rugosidad de la superficie o concentrador de tensiones en la superficie.
- b).- Tensiones residuales superficiales.

RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE.

Desde los inicios de las investigaciones de fatiga, se reconoció que diferentes acabados superficiales producidos por un maquinado diferente, podían afectar apreciablemente el rendimiento a la fatiga.

Las muestras pulidas, en las cuales las finas rayaduras se orientan en forma paralela a la dirección del esfuerzo de tensión principal, son las que nos dan los valores más elevados en la prueba de fatiga. Estas probetas son las que en general se utilizan en los ensayos de laboratorio.

La siguiente tabla no muestra la forma en que varía la vida a la fatiga de una viga en cantiliver, dependiendo del tipo de acabado superficial.

Tipo de Acabado.	Rugosidad Sup., M. Pulg.	Vida media a fatiga, ciclos
Torneado	105	24 000
Pulido a mano	5	137 000
Parcialmente pulido a mano	6	91 000
Superacabado	7	212 000

TABLA 3. Rugosidad de la Superficie.

TENSIONES RESIDUALES SUPERFICIALES.

Se deben a la presencia de deformaciones plásticas no homogéneas, que perdurarán después de haberse eliminado la causa que las originó, como resultado de una deformación en frío, tratamientos térmicos, cambio no uniforme de volumen a causa de efectos térmicos (como en la soldadura por fusión), etc.

Se sabe que las tensiones residuales de compresión, en las capas superficiales, pueden reducir la resistencia al agrietamiento de un metal, como ocurre por ejemplo en los ensayos de fatiga, por lo tanto, una tensión de compresión residual en la

superficie es benefica para las piezas sometidas a cargas repetidas o a efectos de fatiga y puede producir un valioso aumento en el coeficiente de seguridad del diseño de un equipo mecánico.

Por lo tanto toda tensión residual debe eliminarse o mejor aun convertirse en una acción de compresión. Puede lograrse una capa superficial pretensada de compresión mediante operaciones como tratamiento por chorro de perdigones o de granallado, - trabajo en frío por laminado en rodillos de acero duro, cementación, nitruración, etc.

6). TAMANO Y FORMA DE LA PIEZA.

Las formas constructivas ejercen considerable influencia sobre la capacidad de los elementos de máquinas a resistir las acciones de las tensiones variables.

La experiencia ha demostrado que la mayoría de los casos existe un efecto de tamaño; es decir, la resistencia a la fatiga de miembros grandes es más baja que la de pequeños.

El problema de ensayar en fatiga probetas de gran tamaño presenta dificultades grandes y además existen pocas máquinas de fatiga que puedan acomodar probetas que tengan un intervalo amplio de secciones transversales.

Al cambiar el tamaño de la probeta de fatiga resultan afectados dos factores:

a).- Al aumentar el diámetro aumenta el volumen y el área superficial de la probeta. La variación del área superficial es de gran importancia, puesto que generalmente las grietas por fatiga se inician en la superficie.

b).- En las probetas lisas o entalladas, cargadas a flexión o torsión, decrece el gradiente de tensiones a través del -

diámetro y aumenta el volumen del material sometido a tensiones altas a medida que crece el diámetro.

En la figura 9, se muestra un esquema del principio de la influencia del factor de forma y las dimensiones absolutas de los elementos de máquinas sobre la resistencia a la fatiga.

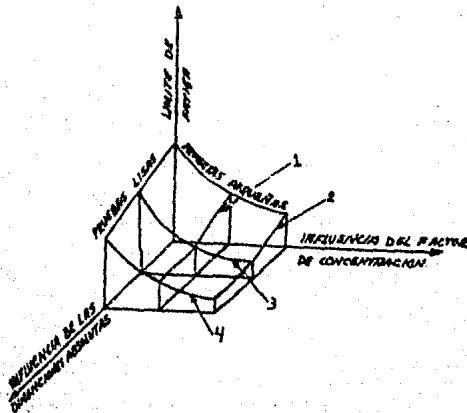


FIGURA 9

7). CONCENTRACION DE ESFUERZOS:

La magnitud del esfuerzo nominal en un componente cargado cíclicamente se mide muchas veces por la cantidad de sobre-esfuerzo esto es, la cantidad en que se excede el límite por fatiga de larga duración del material empleado en el componente. El número de ciclos de carga que puede soportar un componente bajo sobre-esfuerzos es alto; así pues, el término fatiga a altos ciclos se emplea con frecuencia. El incrementar la magnitud del esfuerzo nominal tiene los siguientes efectos:

- a).- Se aumenta la probabilidad de inicio de grietas múltiples.
- b).- Se incrementa el espacio entre estrías.
- c).- Se incrementa la región de fractura final y rápida.

Con sobre-esfuerzos muy altos, se producen fracturas por fatiga a bajos ciclos. La línea divisoria arbitraria pero comúnmente aceptada entre la fatiga a altos ciclos y la fatiga a bajos ciclos se considera alrededor de los 100 000 ciclos. En la práctica se hace esta distinción al determinar si el componente dominante de la deformación impuesta durante la carga cíclica es elástica (altos ciclos) o plástica (bajos ciclos), que a su

vez depende de las propiedades del metal así como de la magnitud del esfuerzo nominal. Bajo condiciones extremas, la línea divisoria entre la fatiga a altos ciclos y bajos ciclos puede ser aun menor de 100 ciclos.

Concentraciones de esfuerzos.- Las muescas, ranuras, agujeros, filetes, cuerdas, chaveteros, etc., son casos comunes en el diseño. Todas estas discontinuidades seccionales aumentan el nivel de esfuerzos por arriba del que se estima basandose en el área transversal mínima. Además de reducir la resistencia a la fatiga o la vida a la fatiga, el aumento en la severidad de la concentración de esfuerzos tiene los siguientes efectos en las características de las grietas por fatiga:

- a).- Es más fácil que se inicien las grietas múltiples.
- b).- Las marcas de playa se vuelven convexas hacia el punto de origen de la grieta.
- c).- Bajo carga rotacional las marcas de playa pueden rodear completamente la zona final de fractura.
- d).- Se pueden introducir estados de esfuerzo combinado, influyendo así a la dirección del crecimiento de la grieta.

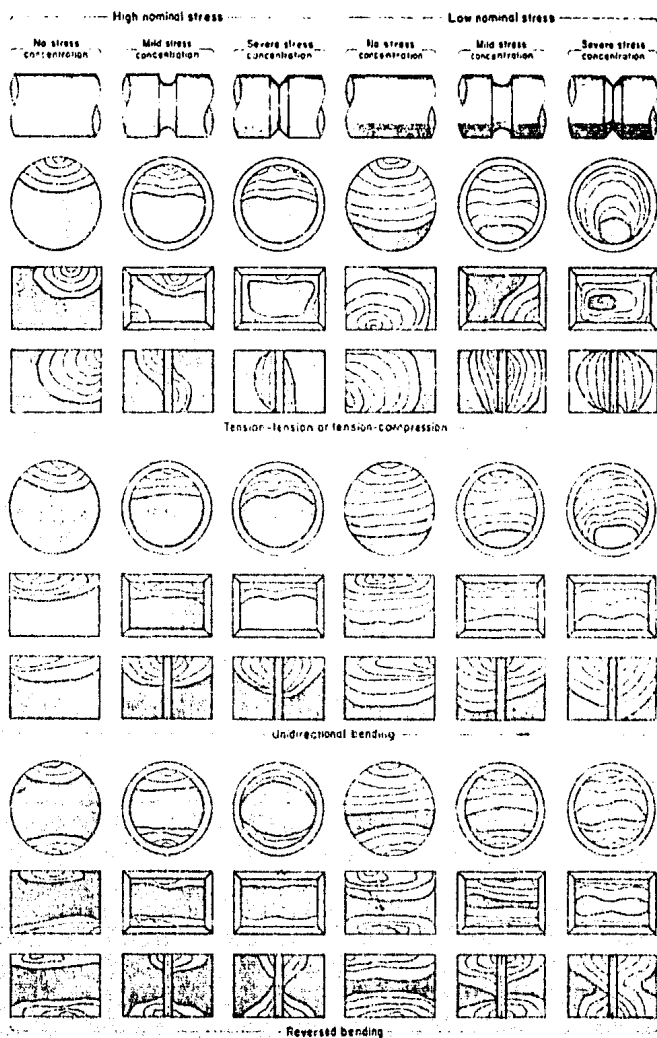


FIGURA 10. Representación esquemática de las marcas de superficies de fractura por fatiga producidas en componentes graves y muescadas con secciones transversales redonda, cuadrada y rectangular, y en placas gruesas, bajo varias condiciones de carga a bajos y altos esfuerzos nominales.

La figura 10, muestra esquemáticamente como afectan la magnitud del esfuerzo nominal, el rigor de la concentración de esfuerzos, y el tipo de carga, a la apariencia de la superficie de fractura de componentes con secciones transversales redondas, cuadradas y rectangulares, así como la de las placas gruesas. El diagrama de la figura 10, está hecho para servir únicamente como guía. Se encontraran desviaciones de este diagrama para diversos materiales, pruebas y condiciones de servicio.

La figura 10, se basa en los siguientes principios:

1.- Conforme aumenta el esfuerzo local en regiones de inicio potencial de grietas, también aumenta el número de núcleos de grietas o sitios de inicio. Por eso, a altos sobre-esfuerzos o en presencia de una concentración de esfuerzos severa, se verán orígenes de grieta. En la mayoría de los casos se unirán las diversas grietas para formar un solo origen de grieta. Antes de que se forme un solo frente de grieta, cada una de las microgrietas estará separada por las marcas de trinquete. En forma alternativa, un poco arriba del límite de fatiga, o del esfuerzo mínimo para la fractura, solo habrá un origen y toda la fractura partirá de este punto.

2.- En ausencia de concentradores de esfuerzos en la superficie, las grietas se propagan más rápidamente cerca del cen-

tro de la sección que en la superficie. Esto sucede porque en las restricciones de deformación los esfuerzos son triaxiales y más severos fuera de la superficie. Sin embargo, cuando hay una muesca concentradora de esfuerzos en la superficie (como una cuerda de raíz aguda), el esfuerzo cerca de esta muesca puede ser más severo que lejos de la superficie. Bajo condiciones de muescado severo, se observarán algunas veces grietas en forma de W.

3.- Para un material dado, el tamaño de la región de fractura catastrófica (fractura final rápida) relativo al tamaño de la región de propagación subcrítico de la grieta aumentará a medida que el esfuerzo nominal aumente. Bajo una sobrecarga que sea ligeramente mayor que la adecuada para causar fractura, la región de fractura final y rápida será relativamente pequeña; bajo una carga mucho más alta, esta región será relativamente grande.

4.- En una fractura causada por flexión rotacional, la región de fractura final estará a menudo girada o corrida hacia el origen en sentido opuesto a la dirección de rotación. También si todas las otras condiciones son las mismas, la región de fractura final se moverá hacia el centro de la sección conforme el esfuerzo nominal aumenta.

5.- El inicio de la fractura ocurre generalmente en o - cerca de la superficie, porque la mayoría de las situaciones in - genieriles como la flexión o cuando hay concentraciones de es - fuerzo, la superficie está sujeta al mayor esfuerzo.

Se han observado orígenes superficiales en la fatiga - tracción-tracción o tracción-compresión, o en situaciones de es - fuerzo Hertziano como fatiga de rodillos de contacto de baleros - y en los dientes de engranes, si hay una inclusión grande o im - perfección debajo de la superficie en el interior de la muestra - o pieza, pero esto no es muy común.

EFECTO DE LOS CONCENTRADORES DE ESFUERZO EN LA RESISTEN - CIA A LA FATIGA. Las grietas por fatiga se originan comunmente - en la región de concentración de esfuerzos que resulta de la pre - sencia de discontinuidades superficiales (elevadores de esfuer - zos), tales como un escalón, una cuerda de tornillo, un agujero - para el aceite o para un perno, o un defecto superficial. El - factor de concentración de esfuerzo de la discontinuidad, K_t , es una medida de la intensidad del esfuerzo que ocurre. En algunas situaciones, los valores de K_t se pueden calcular usando la teo - ría de la elasticidad o se puede medir usando modelos plásticos - fotoelásticos.

La teoría matemática de la elasticidad se basa en un ma

material isotrópico ideal libre de cualquier discontinuidad interna, un perfil estrictamente exacto, y un aumento en la concentración de esfuerzos debido únicamente a la presencia de la discontinuidad de la superficie. En las partes reales, la intensificación del esfuerzo se ve afectada no solamente por las discontinuidades superficiales sino también, hasta cierto punto, por el tamaño de la pieza, por reajustes locales del esfuerzo debidos a cadencia plástica, por la rugosidad superficial y por la estructura heterogénea del mismo material, incluyendo la anisotropía y las discontinuidades internas inherentes. Por lo tanto, el efecto de un elevador de esfuerzo en una pieza se determina usualmente en forma experimental y se expresa en términos del factor de muesca de fatiga K_t . Este factor es la relación de la resistencia a la fatiga sin concentración de esfuerzos y la resistencia a la fatiga con concentración de esfuerzos. En general los valores determinados experimentalmente de K_t son un poco menores que los de K_t calculados para las mismas muestras.

Bajo condiciones de carga estática un elevador de esfuerzos tiene muy poco o ningún efecto en la mayoría de las situaciones, siempre y cuando el material sea dúctil. Si el esfuerzo excede localmente a la resistencia a la cadencia del material, se provoca una deformación plástica y una redistribución de esfuerzos consecuente. Cuando la cantidad de deformación plástica no es excesiva, no es necesario anticipar ningún efecto

adverso. Por si la pieza está sujeta a esfuerzos fluctuantes o alternos, entonces, si se nuclea la grieta a un esfuerzo inferior a la resistencia a la cedencia del material, no habrá una redistribución de esfuerzos por cedencia plástica y el efecto del concentrador de esfuerzos si ocurrirá.

Los concentradores de esfuerzos afectan el comportamiento de los distintos materiales de manera diferente. Por ejemplo, los materiales relativamente quebradizos tales como los aceros templados y revenidos son muy susceptibles a los efectos de los elevadores de esfuerzos que los materiales dúctiles como los aceros normalizados o recocidos; también, los hierros colados, que contienen innumerables elevadores de esfuerzos internos, muestran pocos efectos adversos adicionales cuando se les introducen externamente elevadores de esfuerzo,

Distribución de esfuerzos.- Para visualizar la distribución de esfuerzos en un lugar hay cambio de sección o de forma, es de gran ayuda considerar a la pieza en términos de la electricidad que fluye a través de un conductor de sección transversal similar. En forma diagramática, el flujo del esfuerzo se puede representar como una serie de líneas paralelas, siendo el esfuerzo inversamente proporcional a la distancia entre las líneas; es to es, las líneas se comprimen en regiones de altos esfuerzos. - En la figura 11, se muestra el flujo de esfuerzos asociado con varios elevadores de esfuerzo encontrados en piezas en servicio.

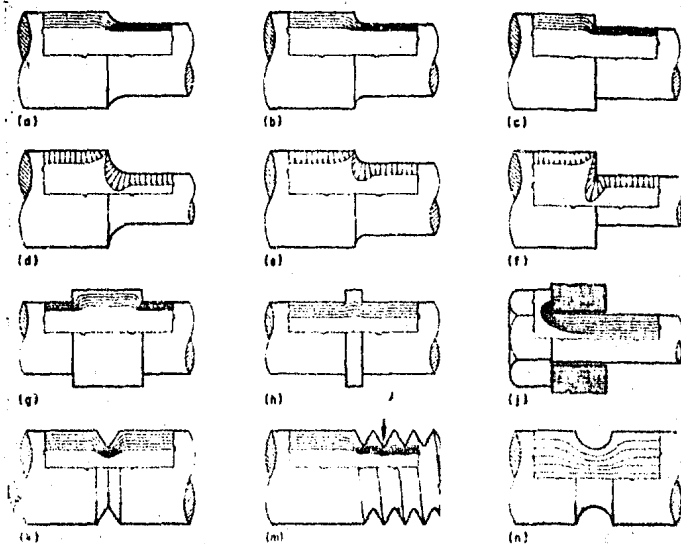


FIGURA 11

En las figuras 11a, 11b, 11c, se muestran los aumentos-progresivos en el esfuerzo conforme decrecen los radios del filete y en la figura 11d, 11e, 11f, se muestra la magnitud relativa y la distribución de esfuerzos resultante de la carga uniforme - de estas piezas.

En la figura 11g, se muestra el esfuerzo causado por la presencia de un collar integrado de ancho considerable. La figura 11h, muestra el decremento en la concentración del esfuerzo - que acompaña a un decremento en el ancho del collar. Las condi-

ciones de esfuerzo son muy similares cuando los collares o piezas similares ajustan a presión en su posición. El flujo de esfuerzo en la unión de una cabeza de perno y su tuerca se presenta en la figura 11j.

Una sola ranura introduce un efecto de concentración de esfuerzos considerablemente mayor que una cuerda continua, la razón de esto es clara cuando se considera el flujo de esfuerzos. El efecto concentrador de esfuerzos de una sola ranura aguda es como el mostrado en la figura 11k. La concentración de esfuerzos a la derecha de la flecha en la figura 11m, es muy similar al del collar angosto de la figura 11h, debido al alivio mutuo proporcionado por las cuerdas adyacentes. A la izquierda de la flecha sin embargo, la última cuerda se alivia solamente de un lado y por consecuencia hay una concentración de esfuerzos considerable, similar a la de la ranura única de la figura 11k. Es por esto que los tornillos se fracturan tan frecuentemente a través de la última cuerda completa. El efecto de una muesca o una garganta en la concentración de esfuerzos es menos severa que la de una ranura aguda. Una serie de ranuras tendrán un efecto similar al mostrado en la figura 11m.

a).- COEFICIENTE DE FORMA O ENTALLA.

El efecto cuantitativo de una discontinuidad particular en el aumento de esfuerzo, es diferente para distintos materia--

les. Algunos son más sensibles que otros a las entallas. Para tener en cuenta estas diferentes respuestas, se utiliza el llamado coeficiente de forma o entalla q , y que queda definido por:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

Donde: $K_f = \frac{(S_{\text{max. real}})}{S_0}$ = coeficiente de reducción de la resistencia a la fatiga (factor de entalla en la fatiga).

K_t = Factor de concentración de esfuerzos.

Los ensayos de fatiga en materiales de grano más grueso o basto (normalizados o recocidos) dan valores bajos de q ; - los aceros de grano fino (templados y revenidos) tienen valores elevados de q . Aunque no existe una línea divisoria precisa entre grano grueso y fino, si se desea se puede adoptar 100 NDB (BHN) como número de separación de las dos clases.

Peterson recomienda el uso de:

$$q = \frac{1}{1 + a/r}$$

Donde: r es el radio de curvatura (figura 12) y los valores típicos de a para esfuerzos normales con la correspondiente S_u , son: aceros templados (Q & T), $a=0.0025$ (8577 Kg/cm² o

122 Ksi); acero recocido o normalizado, $a=0.01$ (4429 Kg/cm² o 63 ksi); lo que da las ecuaciones de las curvas de la figura 12.

Como hay una considerable dispersión en los resultados de los ensayos, puede tomarse con cierta arbitrariedad el grado de exactitud de q ; algunos valores indicados para aceros aleados de grano fino son $q \approx 1$.

El hierro fundido, con sus escamas de grafito, está realmente saturado de concentradores de esfuerzos, por lo que la adición de otras discontinuidades parece que tiene poco efecto sobre su resistencia a la fatiga; es decir, $q \approx 0$, al menos para dimensiones y radios pequeños.

Al igual que el acero, la q del hierro tiende a aumentar cuando el radio de una superficie de transición redonda o de una ranura aumenta y cuando sus dimensiones aumentan, con K_f de valor que se aproxima a k_f . Incluso para piezas pequeñas con pequeños radios, el proyectista puede desear ser precavido, utilizando $q \approx 0.2$.

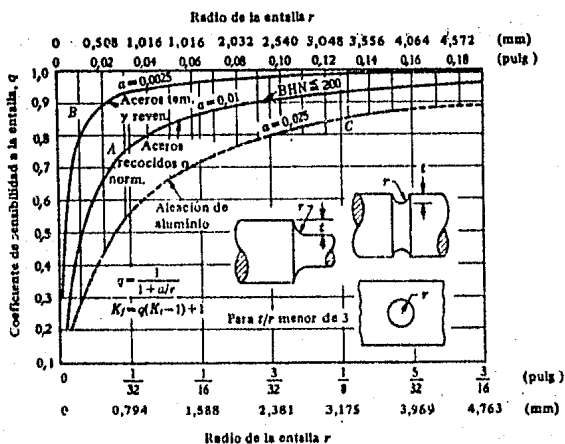


FIGURA 12

b).- SENSIBILIDAD A LA ENTALLA.

En algunos materiales se produce deformación local (sin rotura) en la zona altamente tensionada, del fondo de la entalla. El ángulo de la entalla se reduce a causa de esta deformación, con lo que se facilita el comportamiento dúctil posterior.

Se dice de los metales que se comportan de esta forma, que tiene poca sensibilidad a la entalla. La gran sensibilidad-

a la entalla es característica de los metales normalmente dúctiles que rompen de modo frágil en la zona de entalla sometida a tensiones triaxiales.

El ensayo de tracción ordinario con probetas lisas no sirve para indicar la sensibilidad de los materiales a la entalla. Sin embargo es posible comparar si un material es o no sensible a las entallas y propenso a la fractura frágil en presencia de concentración de tensiones, mediante un ensayo de tracción con probetas entalladas.

La sensibilidad a la entalla puede estudiarse también mediante los ensayos de choque con probeta entallada (los llamados ensayos de resiliencia), estos ensayos se están utilizando ampliamente para los aceros suaves y para el estudio de la fragilidad de revenido.

El ensayo de tracción con probeta entallada se ha empleado para los aceros de alta resistencia, con el fin de estudiar la fragilización de los aceros por el hidrógeno y para investigar la sensibilidad a la entalla de las aleaciones para alta temperatura.

La sensibilidad a la entalla del acero suele evaluarse midiendo la resistencia a la entalla en función de la resistencia a la tracción.

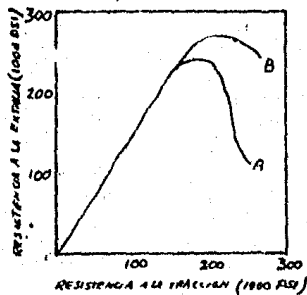


FIGURA 13. Propiedad de tracción con entalla de dos aceros.

El acero A tiene mayor sensibilidad a la entalla que el acero B.

8). CORROSION.

La corrosión puede definirse como la destrucción de un metal mediante reacción química, electroquímica o metalúrgica - con su ambiente.

Uno de los problemas importantes en la industria lo - constituye la corrosión, la principal causa que origina este pro blema es la inestabilidad de los metales en sus formas refinadas, ya que tienden a volver a sus estados de origen a través de los procesos de corrosión.

Principio electroquímico.- Debido a que la corrosión es esencialmente un proceso electroquímico que origina el deterioro en parte o en todo el material como consecuencia de un proceso - de transformación del estado metálico al iónico.

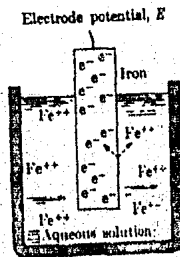


FIGURA 14

La corrosión requiere una diferencia de potencial entre ciertas áreas de la superficie de un metal a través de un electrólito (cualquier solución que contiene iones, estos son átomos o grupos de átomos eléctricamente cargados), por tanto, el electrólito puede ser agua pura, salada o soluciones ácidas o alcalinas. Para completar el circuito eléctrico, deben existir dos -electródos (ánodo y cátodo) los cuales deben conectarse. Estos pueden ser de diferentes metales o distintas áreas sobre la misma pieza de un metal. La conexión de los electrodos en la corrosión se lleva a cabo simplemente por contacto. Debiendo existir una diferencia de potencial entre los electrodos (micropilas).

Algunos tipos específicos de corrosión son:

-La corrosión por formación de pequeños huecos en la superficie, que resulta de inhomogeneidades en el metal, debido a - inclusiones, composición variable de cristales individuales a - través de la pieza fundida y zonas distorsionadas. Estas inhomogeneidades forman diferencias de potencial en sitios localizados - para producir huecos profundos y aislados.

-La corrosión por cavitación, se produce por el choque - de burbujas y cavidades dentro de un líquido. Este tipo de corrosión puede minimizarse o eliminarse cambiando un material más resistente o utilizando una cubierta protectora.

-La corrosión por grieta es un término general que incluye ataque acelerado en el punto de unión de dos metales expuestos a un ambiente corrosivo. Es un tipo de corrosión de un metal que es causada por la concentración de sales disueltas, iones de metal, oxígeno u otros gases y similares, en grietas o cavidades lejanas del flujo principal de fluido, con la resultante de una formación de celdas diferenciales que causan la aparición de pequeños agujeros superficiales profundos. La mejor forma de evitar esto es eliminar las grietas por completo cambiando el diseño o rellenando las uniones que podrían crear dificultades.

-La corrosión por rozamiento es un tipo común de daño a la superficie producido por vibración, la cual causa choques o rozamiento en la interfaz de superficies sometidas a altas cargas y estrechamente ajustadas, especialmente en un medio corrosivo. Está puede evitarse, eliminando la fuente de vibración sujetando en forma más firme o montando de manera más rígida. Otros métodos incluyen el aumento de la dureza superficial de acoplamiento bimetalico de insertar empaquetaduras de hule para absorber el movimiento.

-La corrosión intergranular existe cuando hay una diferencia de potencial, entre un grano y el resto de una aleación. Este tipo de corrosión no se nota visualmente, pero existe una apreciable pérdida en las propiedades mecánicas.

-La corrosión por esfuerzo, se da en ciertos ambientes - cuando los metales se someten a esfuerzos externos o contienen - esfuerzos tensiles internos debido al trabajo en frío.

-La corrosión galvánica (micropila), está asociada con la corriente de una celda galvánica que consta de dos conductores - no semejantes en un electrólito o de dos conductores semejantes - en electrólitos no semejantes, estando los dos metales no seme-- jantes en contacto.

Métodos para prevenir la corrosión; Muchos métodos se - emplean industrialmente para evitar la corrosión, mediante la - selección de la aleación y aleación propias o por medio de pro-- tección de la superficie de un material dado. Los métodos más - importantes son:

- 1.- Utilización de metales de alto grado de pureza.
- 2.- Empleo de adiciones de aleación.
- 3.- Utilización de tratamientos térmicos especiales.
- 4.- Diseño adecuado.
- 5.- Protección catódica.
- 6.- Empleo de inhibidores.
- 7.- Revestimientos superficiales.

FATIGA POR CORROSION. A la acción simultánea de ciclos de esfuerzo y ataque químico, se le conoce como fatiga por corrosión. El ataque corrosivo sin la imposición de esfuerzos, frecuentemente produce picaduras en la superficie de los metales. Las picaduras actúan como muescas y producen una reducción en la resistencia a la fatiga.

Sin embargo, cuando el ataque corrosivo ocurre simultáneamente a la carga de fatiga, resulta una reducción pronunciada en las propiedades a la fatiga, la cual será mayor a la producida por la corrosión previa de la superficie. Cuando la corrosión y la fatiga ocurren simultáneamente, el ataque químico acelera la relación de la propagación de la grieta por fatiga.

Los materiales muestran un límite de fatiga definido, al ser probados en aire a temperatura ambiente, no muestran límite de fatiga cuando las pruebas son realizadas en un medio corrosivo. Mientras que las pruebas ordinarias de fatiga no son afectadas por la velocidad de prueba, en un rango entre 1000 y 1200 ciclos por minuto, cuando las pruebas se realizan en medios corrosivos, hay una dependencia definitiva de la velocidad de la prueba.

Puesto que el ataque corrosivo es un fenómeno dependiente del tiempo, mientras mayor sea la velocidad de prueba, menor-

será el daño por corrosión. Las pruebas corrosión-fatiga pueden realizarse de dos maneras:

I.- En el método usual, la probeta es continuamente sometida a la influencia combinada de la corrosión y los esfuerzos cíclicos, hasta que ocurre la falla.

II.- En la prueba de dos etapas, la prueba corrosión-fatiga es interrumpida después de cierto período y se evalúa el daño que se ha producido hasta el momento, mediante la determinación de la vida útil, la segunda etapa de la prueba se realiza en aire. Las pruebas del tipo anterior, han ayudado a establecer el mecanismo de la fatiga por corrosión,

La acción de esfuerzos cíclicos causa una disrupción localizada en la película de óxido sobre la superficie, dando paso así a la producción de picaduras por corrosión. Se produce un número mucho mayor de picaduras al existir la corrosión fatiga, que si el ataque químico ocurriera en ausencia de esfuerzos.

Los esfuerzos cíclicos tenderan a reunir cualquier producto de la corrosión, que de otra manera podría suprimirla. El fondo de las picaduras será más ánodico que el resto del metal, así que la corrosión procederá hacia adentro, ayudada por la disrupción de la película de óxido, causada por los esfuerzos cíclicos.

El agrietamiento ocurrirá cuando las picaduras sean lo suficientemente agudas para producir una alta concentración de esfuerzos. Existe evidencia para indicar que aún las pruebas realizadas en aire a temperatura ambiente, son influenciadas por la fatiga por corrosión. Las pruebas de fatiga realizadas en cobre, mostraron que su resistencia a la fatiga era mayor en vacío parcial que en aire.

Se conocen una gran variedad de métodos para minimizar el daño por corrosión-fatiga. En general la selección de un material para este tipo de servicio, debe estar basada en sus propiedades de resistencia a la corrosión más que en sus propiedades a la fatiga.

Sin embargo el acero inoxidable, el bronce o el berilio-cobre darán mejor servicio que un acero tratado térmicamente. La protección del metal desde su contacto con el medio corrosivo mediante revestimientos metálicos, es exitoso si el revestimiento no sufre ruptura por los esfuerzos cíclicos. Los revestimientos de zinc o cadmio sobre acero y revestimiento de aluminio sobre aleaciones de aluminio "Alclad", pueden utilizarse exitosamente para muchas aplicaciones corrosión-fatiga, aunque estos recubrimientos puedan causar una reducción en la resistencia a la fatiga al realizar pruebas en aire.

La formación de esfuerzos residuales compresivos en la superficie, tiende a detener la apertura de muescas superficiales, así como no permitir el acceso del medio corrosivo.

El nitrurado es un medio particularmente efectivo para combatir la corrosión-fatiga. Y el granallado ha sido utilizado exitosamente bajo ciertas condiciones. Finalmente la eliminación de concentradores de esfuerzos mediante un diseño cuidadoso, es de suma importancia cuando se debe considerar la corrosión-fatiga.

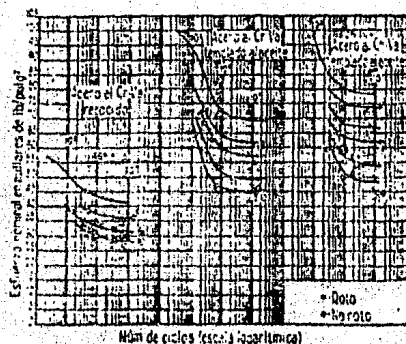
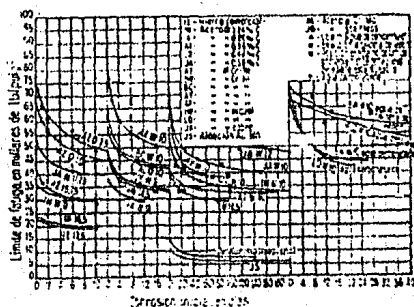


FIGURA 15

9). EFFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA FATIGA.

Los ensayos de los metales a temperaturas inferiores a la ambiente muestran que la resistencia a la fatiga aumenta con el descenso de la temperatura. El hecho de que la resistencia a la fatiga aumente proporcionalmente más que la resistencia a la tracción al disminuir la temperatura, se ha interpretado como una indicación de que el fallo por fatiga a la temperatura ambiente, está asociado a la formación y condensación de vacantes.

En general la resistencia a la fatiga de los metales disminuye al aumentar la temperatura por encima de la ambiente.

10). TRATAMIENTOS DE LOS METALES.

Los tratamientos de los metales son aquellos procesos a los que se someten los metales y aleaciones una vez elaborados, - con objeto de mejorar sus propiedades mecánicas.

El cuadro sinóptico siguiente agrupa los principales - tratamientos empleados en la industria,

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1.- TRATAMIENTOS TERMICOS. | temple.
recocido.
revenido.
normalizado. |
| 2.- TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS. | cementación
cianuración,
nitruración.
sulfinitización. |
| 3.- TRATAMIENTOS MECANICOS. | en caliente (forja)

en frío (deformación
superficial-
y deformación
profunda). |
| 4.- TRATAMIENTOS TERMOMECHANICOS. | |
| 5.- TRATAMIENTOS SUPERFICIALES. | electrodeposición.
anodizado
difusión.
rociado metálico.
revestimiento duro. |

Un tratamiento térmico mal realizado tal como el uso inadecuado de un medio de temple, altas o bajas temperaturas, sobrecalentamientos, introducción de excesivos gradientes de temperatura, etc., puede ser una fuente frecuente de fallas. La decarburización producida durante un tratamiento térmico puede inducir al material a que falle por fatiga o a que se disminuya su resistencia al desgaste.

El aumento de la resistencia a la fatiga que se consigue con el empleo de algunos tipos de endurecimiento (nitruración, cementación, etc.) va seguido del cambio de otras propiedades del material, por ejemplo, la reducción de la resiliencia. Por eso al elegir el método que se debe usar para endurecer las piezas, conviene tener en cuenta todo el conjunto de los cambios que ocasionan estos métodos a las propiedades mecánicas del material.

Con el fin de mejorar el estado físico de las capas superficiales de las piezas en la construcción de maquinaria o equipos se emplean métodos especiales, de los cuales se mencionan y describen a continuación algunos de ellos:

-Temple superficial es aquel que se obtiene a base de calentar la pieza con corrientes de alta frecuencia, disminuye considerablemente la sensibilidad del material a la concentración

de tensiones. Según la calidad del acero el límite de fatiga aumenta o disminuye. Toda la superficie útil de la pieza se debe endurecer para que no queden sitios de transición débiles como resultaría entre la parte templada y la sin templar.

-La cementación con el subsiguiente templado aumenta considerablemente la resistencia de los elementos de máquinas (de 1.5 a 2 veces). El surgimiento de la grieta por fatiga en las piezas cementadas se observa principalmente en el margen de la capa endurecida y el núcleo; a una súbita concentración de tensiones la rotura puede empezar en la superficie,

-La nitruración ejerce un efecto de endurecimiento, al ensayar probetas lisas (hasta el 30%), en presencia de concentración de tensiones (hasta el 60%) y en los casos en que la pieza trabaja en medios saturados de agentes corrosivos. La microgeometría del mecanizado precedente no ejerce ninguna influencia en la resistencia a la fatiga de las piezas nitruradas.

-La cianuración también aumenta la resistencia mecánica por fatiga de las piezas (tales como ruedas dentadas, ejes, etc.) que deben tener una superficie endurecida de poca profundidad. Al profundizar la capa de endurecimiento el límite de fatiga, al principio aumenta algo y luego se estabiliza.

-El tratamiento por chorro con perdigones crea una capa fina endurecida de 0.2 a 0.8 mm de espesor, la cual resulta más efectiva si hay concentradores tecnológicos y constructivos de tensiones.

11). DISENO.

El diseño de una pieza o máquina es uno de los factores más importantes que debe tener en cuenta el Ingeniero Mecánico, ya que puede originar fallas durante el servicio de éstas.

Las fallas debidas en el diseño frecuentemente están asociadas con:

- a).- Insuficiente flexibilidad en el sistema, tal como podría ocurrir en muelles, calderas, tanques, reformadores, líneas de conducción, etc.
- b).- Presencia de esquinas agudas o muescas en puntos de altas concentraciones de esfuerzos.
- c).- Inadecuada selección del factor de seguridad.

Podemos poner de ejemplo el caso de un recipiente a presión que ésta sujeto en servicio a fatiga térmica o mecánica y que presenta muescas, durante su operación se iniciaran grietas exactamente en el interior de dicha muescas; por esto es muy importante que estas sean evitadas especialmente cuando el fenómeno esté presente. Una pieza que posee dos secciones con espesores diferentes, sin que el cambio de mayor a menor espesor sea

continuo, quedará un ángulo agudo que actuará como concentrador de esfuerzos y será el punto de inicio de falla de dicha pieza.

En los casos donde el diseño conduce a una falla, la fatiga térmica, fatiga mecánica o la fatiga por corrosión, son frecuentemente factores iniciadores de grietas que posteriormente se propagarán a través del espesor del componente que se trate, resultando la ruptura final.

En lo que se refiere al factor de seguridad se debe considerar el más apropiado, ya que este influirá en una forma determinante en el fallo o el buen servicio de una pieza o máquina, por lo cual el Ingeniero Mecánico debe considerar los siguientes aspectos para su selección:

- a).- Variaciones que ocurren en las propiedades del material,
- b).- El número de ciclos de carga esperados durante la vida de una pieza o máquina.
- c).- El tipo de carga para el cual se planea el diseño.
- d).- El tipo de falla que puede ocurrir.

e).- Deterioros que puedan ocurrir en el futuro debido a mantenimiento defectuoso o a causas naturales imprevistas.

f).- La importancia que tiene el elemento particular en la seguridad de la estructura en su totalidad.

Nota: -Si es esencial utilizar secciones ligeras y pesadas en forma adyacente o esquinas afiladas se recomienda usar un acero endurecible en aire.

12). SELECCION DEL MATERIAL.

En tiempos pasados cuando los requerimientos de servicio eran generalmente menos críticos que los de la industria actual, los aceros al carbón eran los materiales normalmente adecuados para la mayoría de las aplicaciones. Actualmente una variedad de materiales ferrosos y no ferrosos que contienen diferentes elementos aleantes son utilizados, y se encuentran agrupados bajo especificaciones de ingeniería (ASTM, ASME, etc.) o reconocidas por asociaciones comerciales. Sin embargo, si la prevención de una falla, es dependiente de la selección del material, no debe perderse de vista el aspecto económico,

No puede generalizarse el criterio o seguir para seleccionar un material, cada problema debe ser considerado individualmente aunque aquellos estén relacionados con el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de esfuerzos y ambientes, tales como:

- Resistencia al desgaste.
- Efecto de las temperaturas elevadas.
- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia a la fatiga.
- Métodos de fabricación,
- Tratamientos térmicos.

Lo mejor es correlacionar las características metalúrgicas con los requisitos del material en funcionamiento, en la mayoría de los casos, la selección del material no se limita a un solo tipo o a una serie particular para resolver en forma funcional un problema concreto, por lo tanto se consideraran en los diferentes materiales, la productividad esperada y su costo.

a).- ASPECTOS METALURGICOS RELACIONADOS CON LA FATIGA.

El bajo límite de fatiga transversal de los aceros que contienen inclusiones (endógenas, exógenas) se atribuye a la concentración de tensiones que estas producen y que pueden ser muy elevadas cuando un conjunto de inclusiones alargadas, está orientada transversalmente a la tracción principal. Sin embargo, el hecho de que aun con la casi ausencia de inclusiones en los aceros fabricados en vacío, quede una apreciable anisotropía en el límite de fatiga, indica que deben de influir otros factores importantes.

Investigaciones posteriores sobre este tema han demostrado que las variaciones importantes del límite transversal de fatiga no se pueden correlacionar con las variaciones en el tipo, número o tamaño de las inclusiones originadas por los diferentes métodos de desoxidación. Las propiedades transversales de fatiga son al parecer, una de las propiedades importantes en ingeniería más sensibles a la estructura.

b).- PRUEBAS PARA PROPIEDADES MECANICAS.- Las pruebas mecánicas más utilizadas para determinar las propiedades mecánicas son:

- a).- Dureza (Brinell, Rockwell, Vickers),
- b).- Tracción.
- c).- Impacto.
- d).- Fatiga.

A continuación se da una explicación breve de cada una de estas pruebas:

a.1).- Prueba de dureza Brinell.- El procedimiento estándar requiere que la prueba se haga con una bola de 10 mm de diámetro bajo una carga de 3000 kg. para metales ferrosos a 500 kg., para metales no ferrosos. Para metales ferrosos, la bola bajo presión es presionada sobre la muestra a prueba por lo menos durante 10 seg. para materiales no ferrosos el tiempo es de 30 seg. El diámetro de la impresión producida es medido por medio de un microscopio que contiene una escala ocular, generalmente graduada en decimos de milímetros, que permite estimaciones de hasta casi 0.05 mm.

El número de dureza Brinell (HB) es la razón de la carga en kilogramos al área en milímetros cuadrados de la impresión, y se calcula mediante la fórmula:

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

Donde:

L= Carga de prueba en kg.

D= Diámetro de la bola en mm.

d= Diámetro de la impresión en mm.

Por lo general no se necesita hacer el cálculo, ya que existen tablas para convertir el diámetro de la impresión al número de dureza Brinell.

a.2).- Prueba de dureza Rockwell.- En esta prueba de dureza se utiliza un instrumento de lectura directa basado en el principio de medición de profundidad diferencial. La prueba se lleva a cabo al elevar la muestra lentamente contra el marcador, hasta que se ha aplicado una carga determinada menor.

Esto se indica en un disco medidor. Luego se aplica la carga mayor y, con la carga menor todavía en acción, el número de dureza Rockwell es leído en el disco medidor. Como el orden de los números se invierte en el disco medidor, una impresión poco profunda en un material duro dará un número grande en tanto que una impresión profunda en un material blando dará un número pequeño.

Las escalas Rockwell más comúnmente empleadas son la B (marcados de bola de 1/16 de pulg. y 100 kg. de carga) y la C (marcador de diamante y 150 kg. de carga), ambas obtenidas con el probador normal.

a.3).- Prueba de dureza Vickers.- En esta prueba, se utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de 136° entre las cargas opuestas. El intervalo de carga está generalmente entre 1 y 120 kg. El probador de dureza Vickers funciona bajo el mismo principio que el probador Brinell, y los números se expresan en términos de carga y área de la impresión. Como resultado de la forma del marcador, la impresión sobre la superficie de la muestra será un cuadrado. La longitud de la diagonal del cuadrado es medida por medio de un microscopio equipado con un micrometro ocular que contiene fillos móviles. La distancia entre fillos se indica en un contador calibrado en milésimas de milímetro. Por lo general, hay tablas para convertir la diagonal medida al número de dureza Vickers (HV) o por medio de la fórmula:

$$HV = \frac{1.854 L}{d^2}$$

Donde:

L= Carga aplicada, en kg.

d= Longitud de la diagonal del cuadrado de la impresión en mm.

b).- Prueba de tracción,- Después de la prueba de dureza, la prueba de tracción es realizada más frecuentemente para determinar ciertas propiedades mecánicas. Una probeta preparada específicamente se coloca en las cabezas de la máquina de prueba y se somete a una carga axial por medio de un sistema de carga de palanca, mecánico o hidráulico. La fuerza se indica en un disco calibrado. Si se conoce el área transversal original de la muestra, puede calcularse el esfuerzo desarrollado a cualquier carga. La deformación o alargamiento se mide en una longitud establecida, generalmente 2 pulg., por un disco medidor llamado extensómetro. Entonces la deformación unitaria puede determinarse dividiendo el alargamiento medido entre la longitud original marcada en la probeta.

Las propiedades que se pueden determinar con una prueba de tensión son:

- Límite proporcional,
- Límite elástico.
- Punto de cedencia o fluencia.
- Resistencia de cedencia o fluencia.
- Resistencia límite.
- Resistencia a la ruptura.
- Ductilidad.- La ductilidad de un material se determinará a partir de la cantidad de deformación que le es posible soportar.

tar hasta que se fractura. Esta se determina en una prueba de tensión mediante dos mediciones:

I).- Alargamiento,

$$\text{Alargamiento (por ciento)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

Donde: L_f = Longitud de la medida final,

L_o = Longitud de la medida original.

II).- Reducción de área transversal o estrusión.

$$\text{Reducción de área (porcentaje)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

Donde: A_o = Área transversal original,

A_f = Área transversal final,

-Módulo de elasticidad o módulo de young,

c).- Prueba de impacto o resiliencia. - Aunque la tenacidad de un material puede obtenerse calculando el área bajo el diagrama esfuerzo-deformación, la prueba de impacto indicará la tenacidad relativa.

Para las pruebas de impacto se utilizan muestras tipo muesca. Dos tipos de muesca de tipo general se utilizan en pruebas de flexión por impacto: la muesca ojo de cerradura y la muesca en V. Asimismo, se utilizan dos muestras, la Charpy y la Izod.

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 al tornillo de banco, 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 muestra. La muestra Charpy se golpeará atrás de la muesca en V, en tanto que la muestra Izod, colocada con la muesca en V de cara al péndulo, se golpeará arriba de la muesca en V.

El peso del péndulo multiplicado por la diferencia de alturas indicará la energía, generalmente en libras-pie, absorbidas por la muestra, o sea la resistencia al impacto de la muestra con muesca. Se mide en unidades de trabajo (kilómetros),

d).- Prueba de fatiga.- Es bien sabido que un material no puede soportar, durante largos periodos de cargas cíclicas, esfuerzos tan altos como los que soportaría bajo una carga estática. El límite de fluencia y la resistencia máxima a la tensión son medidas útiles de la capacidad del material para soportar carga cuando éstos operan bajo cargas estáticas. La prueba de fatiga determina los esfuerzos que una muestra de un material, con dimensiones patrón, puede resistir con seguridad por un número

ro determinado de ciclos. En un tipo común de prueba de fatiga, la muestra se carga en flexión pura. Esta gira posteriormente y con cada ciclo de rotación, todos los puntos de su circunferencia pasan de un estado de compresión a uno de tensión. Así, cada revolución constituye un ciclo completo de regresión de esfuerzos que en una prueba normal se repite varios miles de veces por minuto. Las pruebas con probetas se hacen hasta romperse empleando diferentes cargas, y el número de ciclos antes de la ruptura se registra para cada una. Posteriormente se trazan los datos como esfuerzo contra el logaritmo del número de ciclos para fractura.

Hay muchos factores que afectan los valores obtenidos en una prueba de fatiga y la curva S-N normalmente muestra una gran dispersión. Quizá el más significativo de éstos sea el acabado superficial.

Para realizar las pruebas mencionadas anteriormente es conveniente consultar las siguientes normas nacionales;

I). Prueba de dureza Rockwell.	-----	NOM-B-119
II). Prueba de dureza Vickers.	-----	NOM-B-118
III). Prueba de dureza Brinell.	-----	NOM-B-116
IV). Prueba de Tracción.	-----	NOM-B-310
V). Prueba de Impacto (Charpy).	-----	NOM-B-120
VI). Prueba de Impacto (IZOD).	-----	NOM-B-172
VII). Prueba de Fatiga.	-----	NOM-D-48-1974

Las normas se pueden consultar en la DGN (Dirección Gral. Normas).

13). FALLAS POR FATIGA PREMATURA.

La falla por fatiga prematura es un caso que presenta - en una pieza o máquina cuando ésta no cumple con los requisitos- establecidos en el diseño.

El papel del Ingeniero Mecánico es de vital importancia en la prevención máxima de este tipo de falla, por lo cual debe- tener en consideración los siguientes aspectos:

- a).- Selección del material.
 - b).- Forma y tamaño de la pieza.
 - c).- Acabado superficial.
 - d).- Efectos de la corrosión.
 - e).- Efectos de la temperatura.
 - f).- Tratamiento térmico.
 - g).- Ajuste.
 - h).- Ensamble.
 - i).- Mantenimiento.
- etc.

El considerar estos factores no implica que totalmente- se prevenga la falla prematura ya que existen factores tales co mo lo son:

- a).- Factor humano.
- b).- Factor económico.
- c).- Causas imprevistas.

Los cuales son factores que pueden influir en una falla prematura y no son fácilmente manejables, por lo cual como se mencionó, en el tema de diseño se debe calcular un factor de seguridad adecuado tomando en cuenta a la persona o personas que vayan a operar la máquina y así mismo lo referente a lo económico basandose en un determinado presupuesto.

Predicción de la vida a la fatiga.- En la práctica, la predicción de la vida a la fatiga de un material es complicada porque, salvo mediante unos cuantos materiales relativamente quebradizos, la vida a la fatiga de un material es muy sensible a pequeños cambios en las condiciones de carga, esfuerzos locales y características locales del material. Debido a que es difícil tomar en cuenta a estos cambios menores en la predicción de esfuerzos dinámicos o en los criterios de falla por fatiga, hay una alta incertidumbre inherente en las predicciones analíticas de la vida a la fatiga. Por esto, se requiere que el Ingeniero Mecánico en la etapa de diseño se base en la experiencia con partes similares y eventualmente en pruebas de prototipos o de partes producidas. Aunque las pruebas de laboratorio realizadas en pequeñas probetas no son suficientes para establecer la vida-

a la fatiga de la pieza, es útil examinar estos datos porque -
las pruebas de laboratorio son las que pueden formar criterios-
capaces para poder predecir la falla por fatiga, y aíslan las -
variables de carga relacionadas con la fatiga.

14). ESTUDIO PRACTICO DE UNA MUELLE.

NUESTRO ESTUDIO PRACTICO COMPRENDE:

a).- INTRODUCCION.

b).- NOMENCLATURA DE UNA MUELLE.

c).- DESCRIPCION DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA MUE--
LLE 3845913.

ESTUDIO METALOGRAFICO EN CADA ESTACION DEL PROCESO.

d).- PRUEBA DE VIDA A LA FATIGA DE CUATRO MUESTRAS.
TOMADAS DURANTE EL PROCESO.

e).- CONCLUSIONES.

a).- INTRODUCCION:

La mayoría de las suspensiones de un vehículo se basan en un sistema de muelle y amortiguador. Los muelles se comprimen para absorber las irregularidades del terreno, seguidamente recobran su posición normal, rápidamente. Si solamente se utilizarán muelles, estas oscilarían varias veces, antes de absorber la energía acumulada al superar un bache, y este movimiento incontrolado haría difícil la conducción.

Por lo tanto para reducir la velocidad con que la muelle recobra su posición normal, se utiliza un amortiguador entre la muelle y el chasis, para mortiguar el efecto de rebote.

Hay una serie de señales demostrativas de que un sistema de suspensión está averiado: a) Al girar una esquina a veces se percibe una excesiva inclinación, b) Cuando el coche pasa por un bache las ruedas pueden clavarse o perder agarre, c) Puede empezar a vibrar toda la parte delantera del coche y llegar a un momento en que el coche no pueda ser controlado ni frenado con seguridad, d) Las vibraciones en la parte trasera pueden hacer que el coche se bambolee y pierda estabilidad.

La Figura 16, muestra al eje trasero montado sobre una muelle semiélfptica, sujetos con pernos en "U".

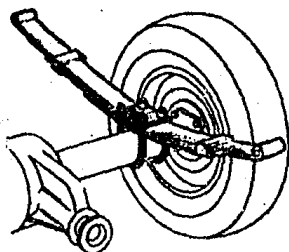


FIGURA 16

La figura 17, muestra un sistema de suspensión, compuesto de una muelle, amortiguador y una barra Panhard acoplada por un extremo al eje y por el otro a la carrocería, evita que el eje se mueva lateralmente y a veces comparte su punto de montaje en el eje con el amortiguador telescópico.

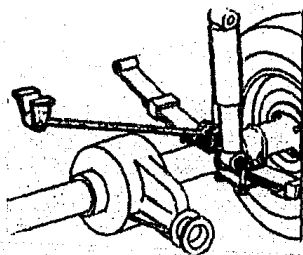


FIGURA 17

De lo anteriormente expuesto puede darse una cuenta, que la muelle es un elemento mecánico importante dentro del sis-

tema de suspensión de un vehículo. Una falla en dicha muelle - puede ocasionar desde costosas reparaciones al vehículo hasta lesiones o muerte.

La muelle es un elemento mecánico sometido a esfuerzos variables y cíclicos y por lo tanto sometido a "fatiga".

b).- NOMENCLATURA DE UNA MUELLE.

NUMERO DE HOJAS.- (Ver figura 18), las hojas son designadas por números empezando con la hoja principal la cual es el número 1, la hoja adjunta es la número 2 y así sucesivamente.

LINEA DE REFERENCIA.- Muchas dimensiones definidas a continuación se refieren a la línea de referencia. En la figura 18, es mostrada como la línea y X-X, la línea de referencia pasa a través de los centros de los ojos de la muelle.

LINEA DE BASE DEL ANGULO DE ASIENTO.- (Ver figura 18), es la línea dibujada a través de los puntos terminales de la hoja activa (No. 1) de la muelle a cada ojo formado a lo largo de la superficie de tensión de la hoja principal.

LONGITUD DE CARGA.- (Ver figura 19), es la distancia entre los centros de los ojos de la muelle, cuando la muelle es flexionada a una posición especificada de carga.

LONGITUD DE CARGA DEL LADO FIJO.- (Ver figura 19), es - la distancia del centro del ojo del lado fijo a la línea de referencia del centro del barreno de la muelle.

LONGITUD DE ASIEN TO.- Es la longitud de la base de la - hoja donde se aloja el tornillo de centro.

ANGULO DE ASIEN TO.- Es el ángulo comprendido entre la - tangente del asiento de la muelle y la línea base del ángulo de asiento. Cuando a la muelle se le aplica carga a la hoja mas - corta como se aprecia en la figura 18, el ángulo de asiento puede ser positivo o negativo dependiendo de la dirección de la línea tangente del asiento de la muelle y la línea base del ángulo de asiento.

ESPESOR DE LA MUELLE.- Es igual a la suma de los espesores de cada una de las hojas que componen a la muelle.

APERTURA Y ALTURA TOTAL.- (Ver figura 18), distancia de la referencia a el punto donde la línea del centro del tornillo de centro de la muelle intercepta a la superficie de la muelle - que esta en contacto con el asiento de la muelle.

Si la superficie en contacto con el asiento esta en la - hoja principal, esta distancia es llamada "apertura".

Si la superficie en contacto con el asiento esta en la hoja mas corta, esta distancia es llamada "altura total".

CLARO.- Diferencia en apertura o altura total y la posición de la carga de diseño y la posición extrema (máximo esfuerzo) a la cual la muelle puede ser flexionada en un vehiculo.

CONVEXIDAD.- No es estrictamente definida.

CURVATURA.- La curvatura ($1/R$) es el reciproco del radio (R).

CARGA Y RATE.- Son términos empleados para describir la característica básica de una hoja de muelle.

LA CARGA.- Es la fuerza en Newton (N) que ejercida por la muelle a una altura especificada.

EL RATE.- Es el cambio de la carga por unidad de flexión de la muelle (N/M).

MUELLE CON CURVATURA POSITIVA

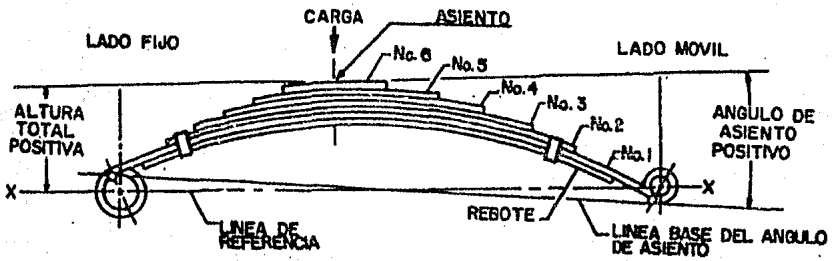


FIGURA 18

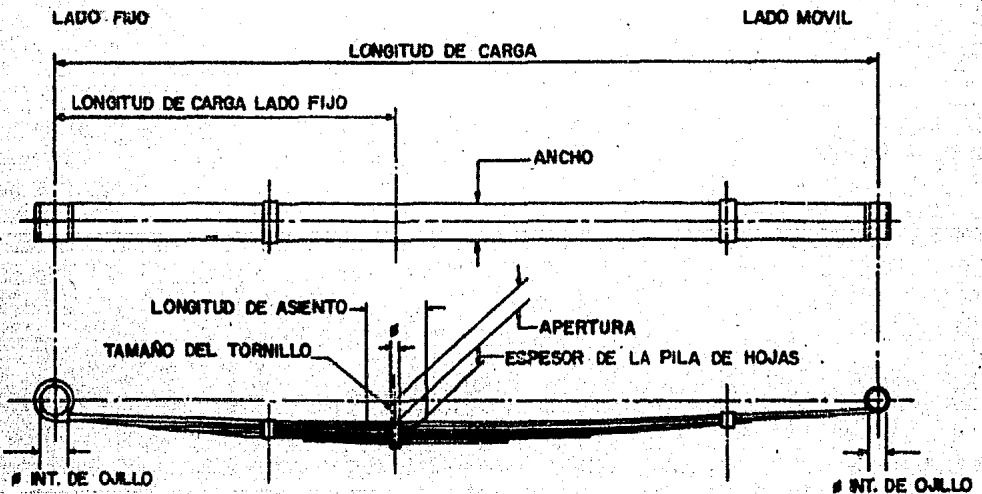
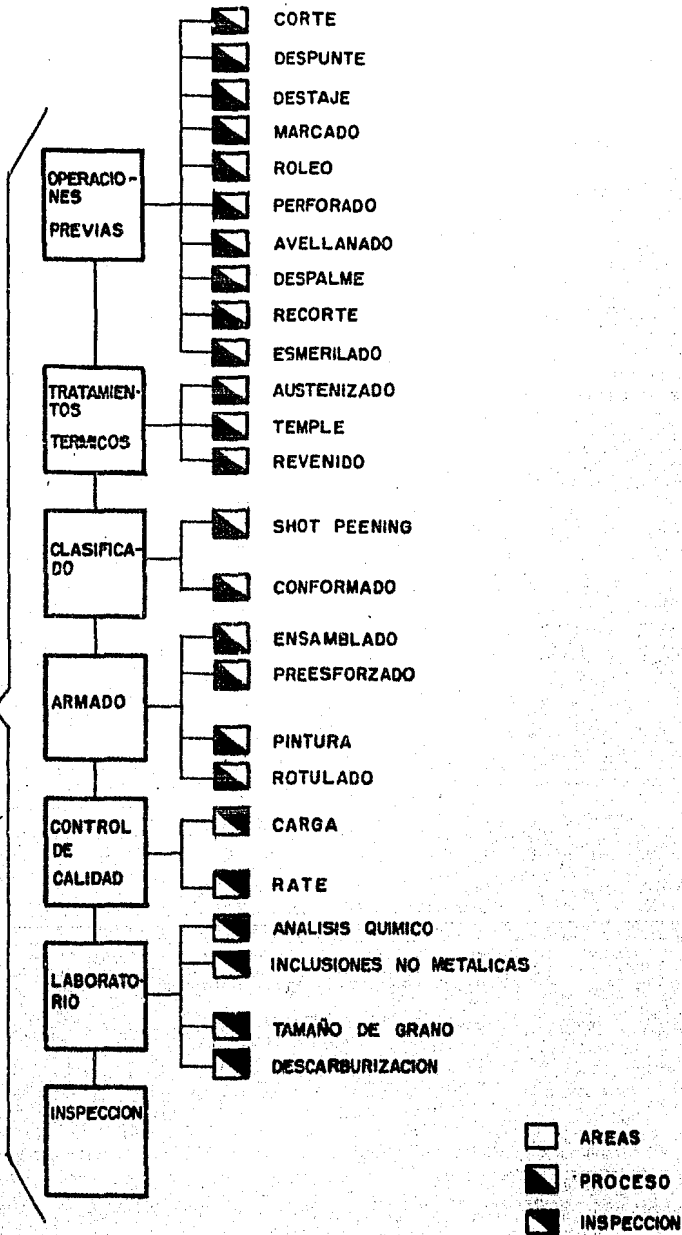


FIGURA 19

DIAGRAMA DE BLOQUES DE AREAS, PROCESO, E INSPECCION.



AREAS
 PROCESO
 INSPECCION

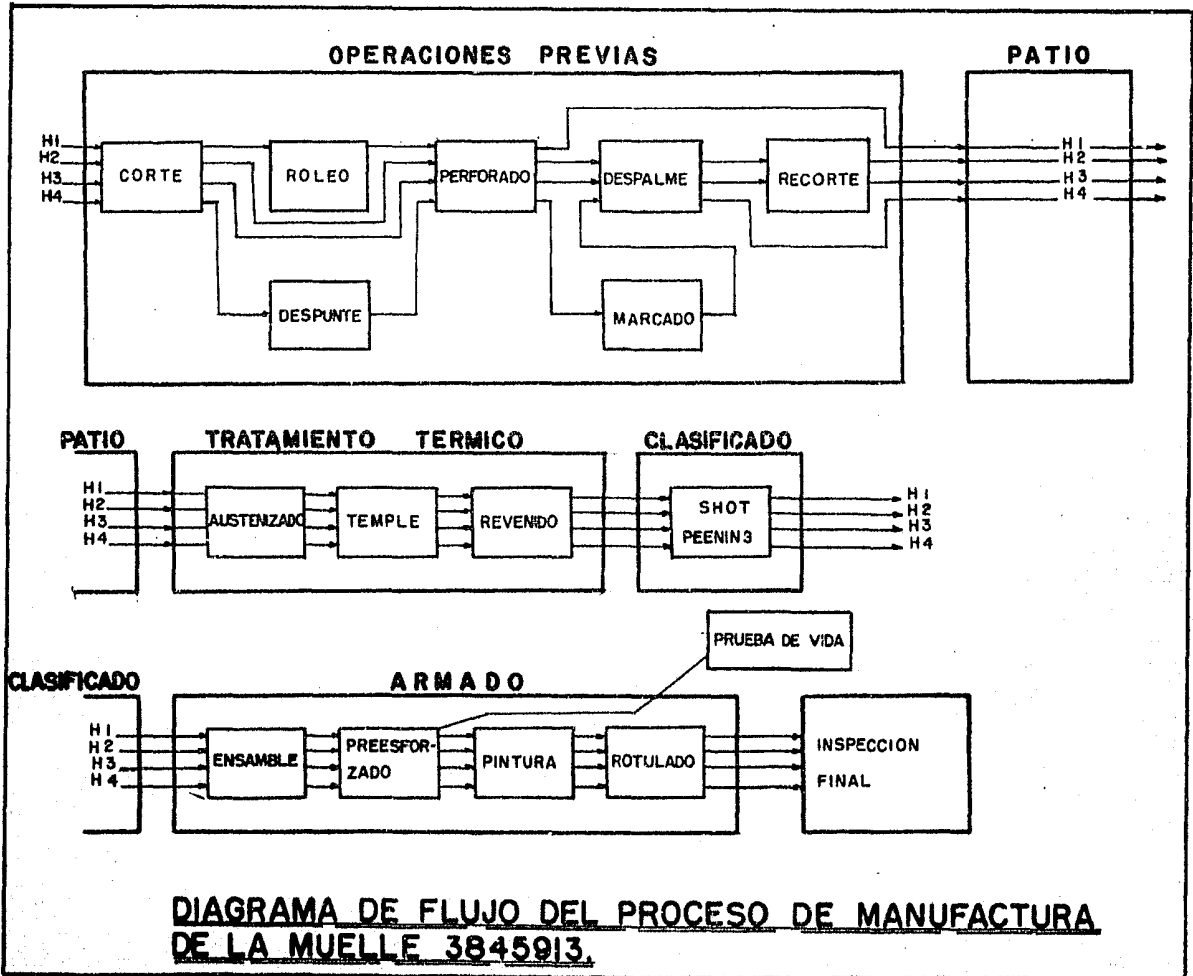


DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA MUELLE 3845913.

c).- DESCRIPCION DEL PROCESO DE MANUFACTURA Y ESTUDIO METALOGRAFICO.

MATERIAL Y ANALISIS QUIMICO:

Los requerimientos básicos para las hojas de las muelles de acero es que el grado de solución del acero debe tener suficiente templabilidad para las dimensiones requeridas, asegurando completamente una estructura martensítica revenida a través de toda la sección. Una estructura martensítica revenida aumenta las propiedades de fatiga.

Las hojas de las muelles han sido fabricadas en varias aleaciones de acero de grano fino tales como:

SAE: 9260, 4068, 4161, 6150, 8660, 5160, 5160H, 50B60.

La templabilidad de estos aceros depende de su composición química, a continuación presentamos una tabla para relacionar el grado del acero con el espesor de la sección.

ESPESOR (MM)	ACERO (SAE)
8.0 MAX	5160
16.0 MAX	5160H
37.5 MAX	50B60

La materia prima usada para nuestro caso es un acero - SAE 5160 las muestras fueron tomadas de los siguientes atados - 3566,3567,3568.

El análisis químico fue obtenido por vía húmeda, se trata de un acero bajo en cromo con las siguientes especificaciones:

ATADO	SAE	%C	%MN	%S	%CR	
3566	5160	0.62	0.82	0.028	0.78	MAX
		0.56	0.80	0.24	0.74	MIN
3567	5160	0.59	0.88	0.022	0.78	MAX
		0.56	0.79	0.023	0.84	MIN
3568	5160	0.63	0.80	0.029	0.79	MAX
		0.60	0.76	0.029	0.78	MIN

Los aceros al cromo de la serie 51XX contienen entre - 0.55 y 0.65% de carbono y de 0.70 a 1.15% de cromo, estos aceros son endurecibles en aceite y se utilizan para resortes, tornillos para motores, pernos, ejes, muelles, etc.

Las funciones principales de un acero al cromo son:

- 1.- Aumenta la resistencia a la corrosión.
- 2.- Aumenta la templabilidad.
- 3.- Añade alguna resistencia a altas temperaturas.
- 4.- Resiste a la abrasión y al desgaste
(con el alto contenido de carbono).

METALOGRAFIA:

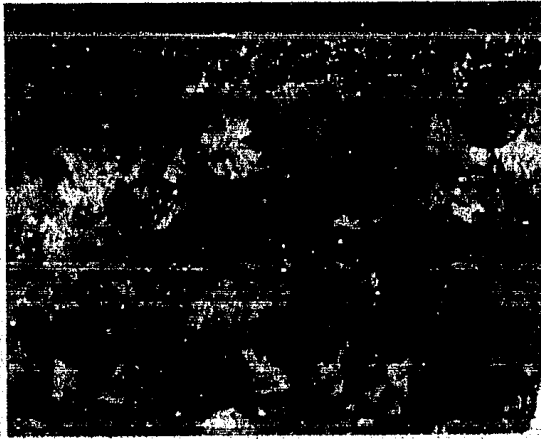
En condiciones normales se tiene:

Dureza: 22 Rockwell C

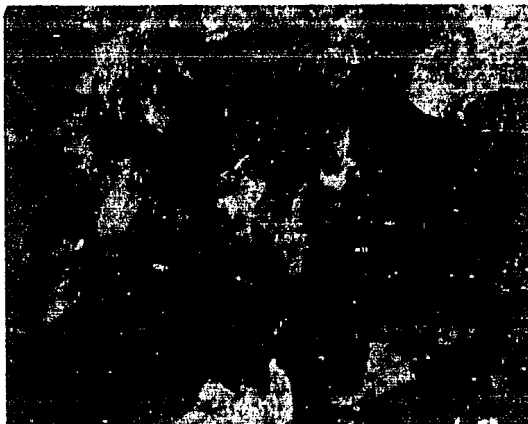
Decarburización: 0.01-.015 MM

Tamaño de grano: ASTM 7

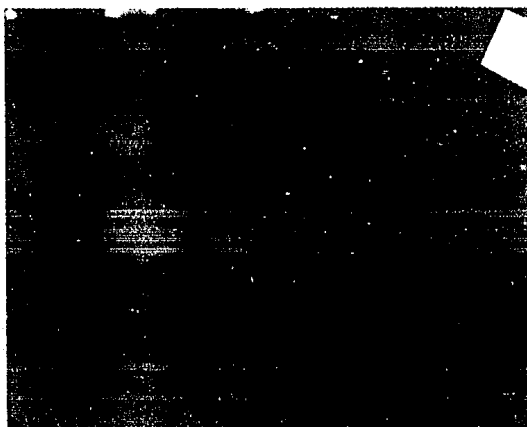
Microestructura: Perlita fina con poca ferrita.



FOTOMICROGRAFIA 1. - DE UN ACERO 5160, EN CONDICIONES NORMALES,
100X, NITAL 3%.



FOTOMICROGRAFIA 2.- DEL MISMO ACERO PERO RESALTANDO LA PERLITA Y LA FERRITA, 400X, NITAL 3%.



FOTOMICROGRAFIA 3.- IMPUREZAS DEL ACERO 5160, SE TRATA DE SULFUROS (ZONAS OSCURAS ALARGADAS), SERIE FINA - TAMAÑO 2 O SEA A-2F ASTM SE PUEDE OBSERVAR - TAMBIEN PEQUEÑOS PUNTOS DE OXIDO (ZONAS OSCURAS CIRCULARES).

CORTE DE LA SOLERA EN HOJAS

En esta operación se corta la solera de acero 5160 a la longitud adecuada para cada una de las hojas de la muelle, esta operación se realiza en máquinas cizalladoras accionadas por levas motrices.

Esta operación es una operación de cizallamiento en el cual el metal es sometido a esfuerzo de cizallamiento entre dos bordes cortantes, hasta el punto de fractura o mas alla de su última resistencia.

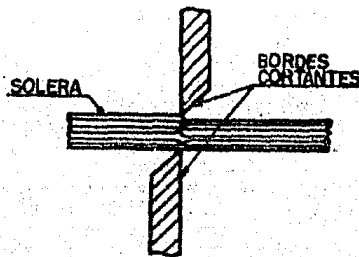


FIGURA 20

Cuando el metal es fracturado esfuerzos residuales son dejados en el metal, estos esfuerzos son indeseables; para eliminarlos el metal debe recalentarse bajo el rango cristalino de temperatura, en este rango los esfuerzos son extraídos sin cambio apreciable en las propiedades físicas o estructura de grano.

El calentamiento en el rango cristalino elimina los esfuerzos residuales y el metal regresa a la condición original, - este calentamiento se hace en el despalme.

DESPUNTE

En esta operación a la hoja 4 unicamente se le quitan - las esquinas quedando la solera de la siguiente manera:



FIGURA 21

Para darle un confort a la muelle y evitar la abrasión - con la hoja adyacente.

ROLEO

En esta operación a la hoja primera se le da la forma - del ojillo de la muelle en cuya cavidad se albergará a un buje - de hule acanalado.

Esta operación se realiza en una máquina hidráulica a - base de dados, en 3 estaciones:

En la primera estación se le da una cierta curvatura y se le hace un corte a 45 grados en la punta de la solera del plano de la sección transversal de la solera.

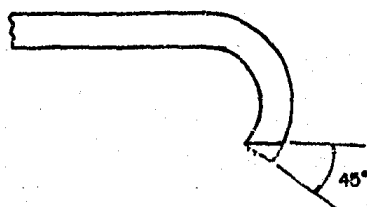


FIGURA 22

En la segunda estación se le da otra curvatura.

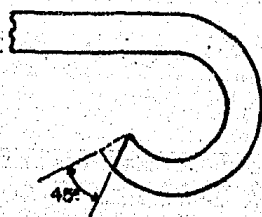


FIGURA 23

En la última sección se le da la curvatura total y se cierra el ojillo.

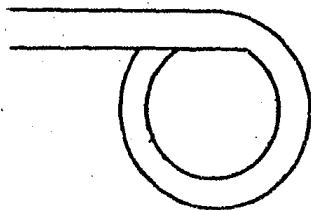


FIGURA 24

Para realizar esta operación se calienta el material en un rango de temperatura aproximada de 850-900 grados centígrados con un tiempo de exposición de 4.4 minutos en promedio, estos parámetros dependen de la persona que esta en turno, esto se hace de un lado primero y luego del otro, la hoja queda de la siguiente manera:



FIGURA 25

Todos los procesos de trabajo en caliente presentan unas cuantas desventajas que no pueden ignorarse, debido a la alta temperatura del metal existe una rápida oxidación o escamado de la superficie con acompañamiento de un pobre acabado superficial.

Cuando el acero se expone a una atmósfera de oxidación debido a la presencia de vapor de agua o de oxígeno en el horno, se forma una capa de óxido férrico llamada "escama", una delgada capa de escama tiene muy poco efecto en la rapidez real de enfriamiento, pero una gruesa capa de escama de 0,005 pulg. de profundidad retarda la rapidez real de enfriamiento.

Debido a no tener un control de la temperatura y tiempo necesarios para alcanzar la temperatura de recristalización óptima se presenta el fenómeno conocido como "descarburización" eliminando el carbono de la capa superficial cuando se calienta en una atmósfera que contiene dióxido de carbono (CO_2), la superficie carente de carbono, no se transformará a martensita en un endurecimiento ulterior y el acero se dejara con una cubierta suave.

Debido a que la muelle se somete a esfuerzos que son máximos en la superficie o cerca de ella, la descarburización es peligrosa ya que puede ser inicio de una grieta prematura.

METALOGRAFIA:

DUREZA: 25 Rockwell C

Decarburización: 0.1-0.15 MM

Tamaño de grano: ASTM 5

Microestructura: Perlita fina con descarburización en -
la superficie.



FOTOMICROGRAFIA 4.- ROLEO HOJA 1, OBSERVESE EL TAMAÑO DE GRANO -
DE LA SUPERFICIE, NITAL 3%, 100X, Y LA SUPER
FICIE DESCARBURIZADA.

PERFORADO DE LAS HOJAS

El perforado se le da a todas las hojas de la muelle, - en esta operación se hace un barreno a las hojas a una distancia especificada en el diseño, con el objeto de que despues se pueda introducir el tornillo de fijación de la muelle.

El barreno se hace en un troquel en el cual el metal es sometido a esfuerzos de tensión como de compresión.

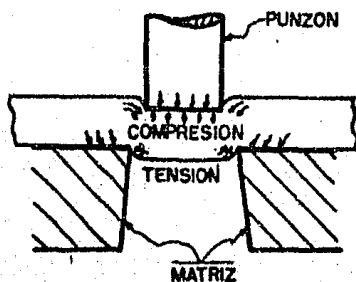


FIGURA 26

Se produce un alargamiento más allá del límite elástico; a continuación deformación plástica, reducción del área y finalmente comienza la fractura a través de los planos de desprendimiento en el área reducida y se vuelve completa.

Esta operación se realiza, en frío debido a que el diámetro del punzon (25/64") del troquel es mayor que el espesor de la solera, las hojas quedan así:

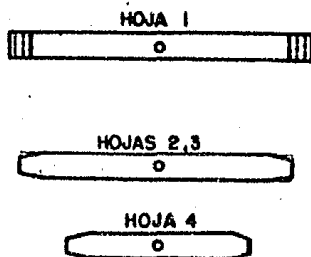


FIGURA 27

MARCADO

Se le aplica a la hoja 4 únicamente, en esta operación se estampa en número estándar de la muelle, la fecha, el logotipo del cliente y el número de la muelle según se trate; esto se hace mediante una máquina de estampado en frío.

DESPALME

Se le aplica a las hojas 2,3 y 4 en esta operación se calienta a las hojas en sus extremos a una temperatura de 850-900 grados centígrados durante 3 minutos aproximadamente (esta temperatura y tiempo depende de la persona que este en turno).

Inmediatamente se forja por laminado los extremos y se reduce el área transversal de la sección; debido a esto hay un flujo del metal hacia las orillas producto de la presión ejercida por los rodillos.

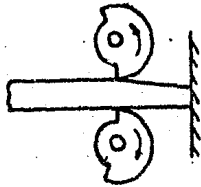


FIGURA 28

En flujo continuo se pasa la solera adelgazada por los extremos a un troquel el cual efectúa el "recorte" el excedente de las puntas de los extremos, eliminando las impurezas del metal acumulados en las orillas de los extremos de las hojas como consecuencia del flujo del metal, las hojas 2,3 y 4 quedan de la siguiente manera:

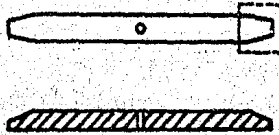


FIGURA 29

Esta configuración da confort a la muelle en general y evita la posible abrasión de las hojas. Los esfuerzos residuales acumulados en las puntas debido al "corte" desaparecen al alcanzar la temperatura de forja.

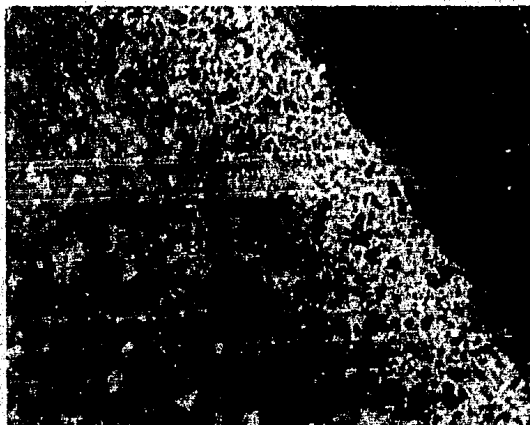
METALOGRAFIA:

Dureza: 23 Rockwell C

Decarburización: 0.10-0.15 MM

Tamaño de grano: ASTM 7

Microestructura: Perlita fina con borde decarburado.



FOTOMICROGRAFIA 5.- DESPALME HOJA 4, NITAL 3%, 100X, OBSERVAR LA SUPERFICIE DECARBURADA.

Comparando con la fotomicrografía de roleos y esta se puede observar que aunque los dos procesos se calientan al material y los están sujetos a descarburización, en el roleo la temperatura a la cual se somete el material es mayor apreciándose en el tamaño de grano.

Dentro de los puntos que hay que considerar en las operaciones de roleo y despálme para evitar una falla prematura son:

Existe un transportador en donde se coloca la solera que pasará a través del horno, regulándose la velocidad mediante el cambio de las RPM en las poleas variadoras, esto de vital importancia ya que $V=F(D,T)$.

Si la velocidad es muy pequeña el tiempo de exposición del metal al calor superará el rango de temperatura de recristalización del metal produciéndose una descarburización, trayendo como consecuencia la posibilidad de una falla prematura así como una superficie carente de carbono.

Si la velocidad es grande el metal puede o no puede alcanzar el estado plástico traduciéndose a una mayor cantidad de fuerza para deformar el metal por parte de los rodillos así como el troquel y la prensa hidráulica en el roleo por lo tanto es de vital importancia la velocidad del transportador, temperatura alcanzada de la solera y el tiempo de exposición.

Una vez hechos estos procesos en operaciones previas se almacenan en un patio, para que en su turno respectivo se les aplique un tratamiento térmico.

TRATAMIENTOS TERMICOS

Los tratamientos térmicos que se les dan a las hojas de las muelles son:

- 1.- Temple.
- 2.- Revenido.

Para efectuar el proceso se calienta el material en un horno de gas de trabajo continuo una temperatura de 920 grados centígrados durante 13,8 minutos en promedio, para que el metalferroso se austenice.

Es importante mencionar que el acomodo de las hojas tiene su razón de ser ya que si se acomoda una hoja sobre otra la transferencia de calor a través de ellas se disminuye y por lo tanto requeriremos más tiempo de exposición de las hojas en el horno para un calentamiento uniforme. El acomodo se hizo de la siguiente manera:

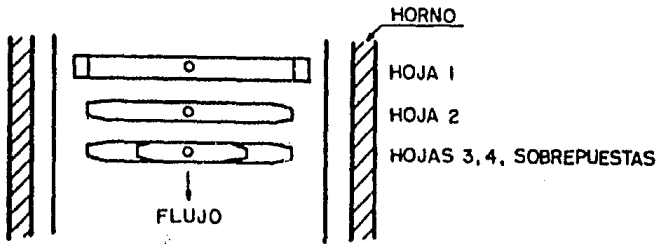


FIGURA 30

Se introducen por paquetes y cada paquete consiste del número de hojas necesarias para formar una muelle.

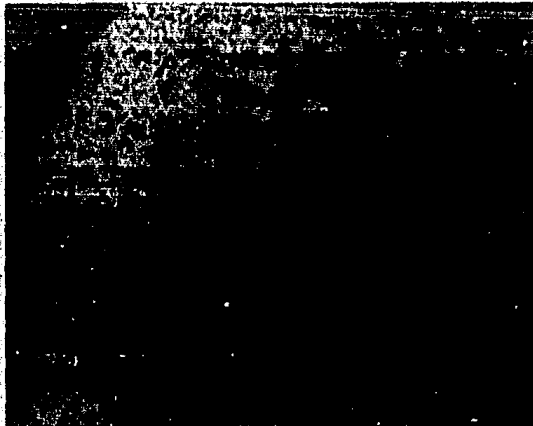
METALOGRAFIA.- AUSTENIZADO HOJA 2

DUREZA: 23 Rockwell C

Descarburización: En zonas localizadas únicamente

Tamaño de grano: ASTM 7

Microestructura: Perlita fina con ferrita.



FOTOMICROGRAFIA 6.- Observar la homogeneidad del grano y la descarburización, en una zona localizada, NITAL 3%, 100X.

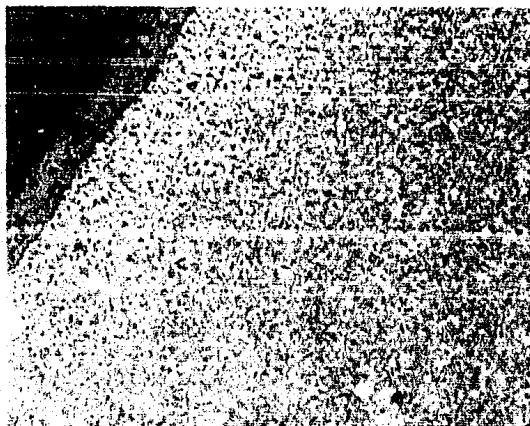
METALOGRAFIA.- AUSTENIZADO DE LA HOJA 1

Dureza: 25 Rockwell C

Descarburización: 0.1-0.15 MM

Tamaño de Grano: ASTM 7

Microestructura: Perlita fina con ferrita.



FOTOMICROGRAFIA 7.- Observar la homogeneidad de la estructura de la perlita fina en la zona descarburada, NITAL 3%,100X.

TEMPLE

Se realizará en aceite mineral a una temperatura de 65-
grados en promedio con la circulación del mismo debido a un agi-
tador, esto mejora la rapidez de enfriamiento y la temperatura -
del aceite puede mantenerse constante además hace que la pelcu-

la de vapor en el metal se elimine tan rapidamente como se forma y por lo tanto hay un enfriamiento uniforme.

El tiempo de exposición en el primer compartimiento de la tina de aceite es de 27 segundos en promedio bajando la temperatura de la solera a 215 grados centígrados, pasa al otro compartimiento y se enfria la solera todavia mas hasta unos 116 grados centígrados en promedio.

En el primer compartimiento de la tina existe un carrete formador en el cual se tienen los moldes de curvatura para cada una de las hojas de la muelle.

METALOGRAFIA.

Dureza: 57 Rockwell C

Microestructura: Martensita.



FOTOMICROGRAFIA 8.- Observar la red martensítica, NITAL 3%, 400X este acero en estas condiciones es duro y frágil).

REVENIDO

Debido a que después del temple el acero queda con tensiones residuales y fragilidad por la dureza obtenida, por tanto, después del endurecimiento le sigue un tratamiento de revenido - el cual consiste en calentar el acero a alguna temperatura menor que la inferior crítica. El propósito del revenido es liberar - los esfuerzos residuales y mejorar la ductilidad y tenacidad del acero.

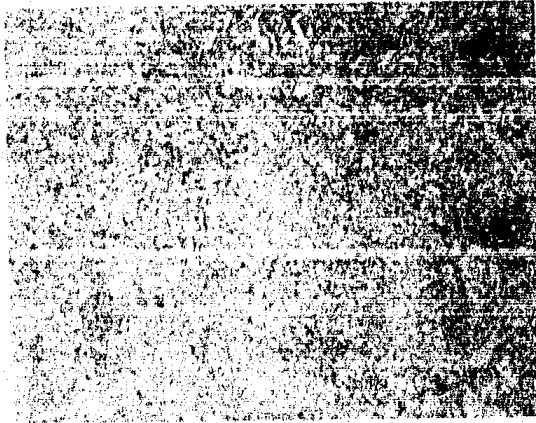
Este aumento en ductilidad generalmente se obtiene a - costo de la dureza o de la resistencia, como se puede observar - en el reporte de características metalográficas.

Para efectuar el revenido se colocan los paquetes en un transportador de banda del horno respectivo, sus condiciones son: temperatura de 450 grados centígrados durante 56 minutos, luego - en el mismo transportador se le enfria en agua alcanzando una - temperatura de 35 grados.

METALOGRAFIA.

Dureza: 44 Rockwell C

Microestructura: Martensita revenida.



FOTOMICROGRAFIA 9.- Martensita revenida, NITAL 5%, 400X

Unas mediciones típicas basadas en la experiencia para las hojas de muelle son las siguientes:

Dureza: BHN 388-461 (300 KG CARGA)

Diámetro indentación de 3.10-2.85 MM

Rockwell C 42-49

Comparando con lo anterior el rango de dureza obtenido esta dentro de este marco establecido.

Despues del revenido, control de calidad toma cada hora una muestra (muelle completa) y mide durezas a lo largo de cada una de las hojas de la muelle. De tal manera que si estas mediciones estan fuera de rango (388-461 BHM), se toman las precauciones necesarias. Cuando la dureza es alta se le aplica otro proceso de revenido y cuando la dureza es baja se inicia el proceso desde el temple y se modifican parámetros de control (temp.horno de temple y tiempo de exposición, temp. del aceite mineral, temp. del horno de revenido y tiempo de exposición),

INSPECCION CARGA Y RATE

Esta inspección se realiza en un bastidor hidráulico, a la muestra tomada durante el proceso de tratamiento térmico con el objetivo de cuantificar "la carga y el rate" de la muestra y de esta manera poder decidir si los parámetros de control en el tratamiento térmico son los adecuados.

Se tiene que hay para cada tipo de muelle una inspección diferente, basados en una especificación de diseño.

HOJA DE INSTRUCCION DE INSPECCION

PARA

CONTROL DE CALIDAD

CARACTERISTICAS ELASTICAS

CLIENTE: CHRYSLER

PARTE No. 3845918

ESPECIFICACIONES RASSINI

REF.	A	B	1a.	C	D	2a.	E	F	3a.
S/B	6.180"	4.180"	5.180"						

ESPECIFICACIONES DE CLIENTE

REFERENCIAS

ALT. DE CARG.	CARGA	RATE
1	-.375	VER TABLA
2		
3		

a) Todas las alturas están consideradas sin paquete.

b) Antes de checar, flexionar la muelle _____ pulg. a partir de la carga A

No de muelle Carga Flexión L/c

3845911	610-650 Lb.	8.5"
12	650-690 "	8.5"
13	690-730 "	8.0"
14	730-770 "	8.0"
15	770-810 "	8.0"

Distancia entre centros: 58.000" \pm 0.125"

Longitud frontal : 24.000" \pm 0.062"

Flexión mínima : VER TABLA

Angulo de asiento : de 4° a 5°

Ref. 5.555" Para ángulo 5.925"

Esta operación se realiza como sigue:

1.- Se introduce a la muelle unos portabujes en los ojillos de la hoja principal y se coloca en los soportes de la bancada del bastidor hidráulico.

2.- Se aplica la carga hasta tener la muelle en posición horizontal y se mide la distancia entre los centros de los ojos de la muelle o longitud de carga y la longitud del lado frontal o longitud de carga de lado fijo.

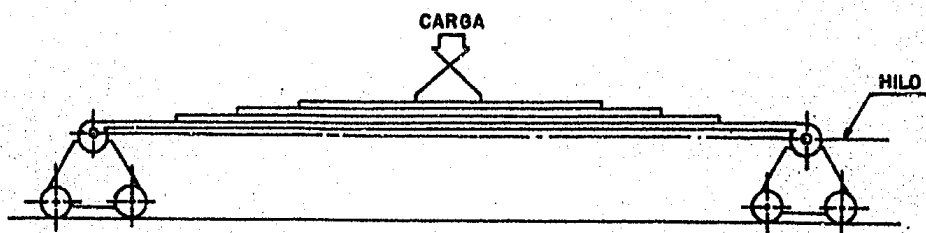


FIGURA 31

3.- Después se libera la carga y se mide la altura libre o apertura total.

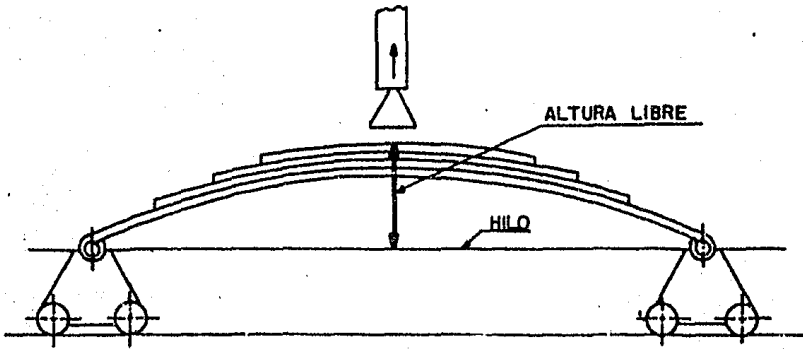


FIGURA 32

4.- Los datos anteriores se anotan en la hoja de reporte de características elásticas.

5.- Según la especificación se coloca a 6.180" a la muele sin paquete (medida de la bancada a la hoja principal), cuando el piston esta en su carrera máxima, se golpea con un martillo para liberar esfuerzos y se lee la carga en un dinamometro - integrado al bastidor.

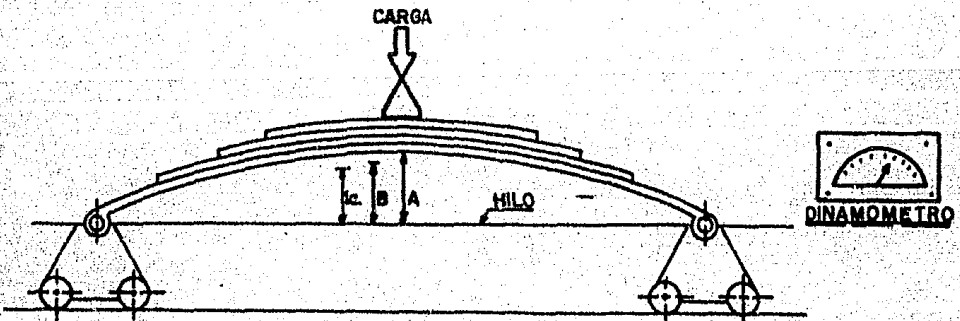


FIGURA 33

6.- A continuación se sube el piston (mínima carrera) y se coloca un calibre de 1" y se baja el piston se vuelve a golpear con el martillo y se lee la carga.

7.- De igual manera que el paso anterior pero ahora se coloca un calibre de 2" y se lee la carga.

8.- Se vuelve a medir la altura libre o apertura total (sin carga).

9.- Se mide el ángulo de asiento con un clinómetro.

10.- La hoja de reporte queda de la siguiente manera:

El rate se obtiene:

$$\text{RATE} = \frac{\text{CARGA "B"} - \text{CARGA "1a"}}{1"} = 1b/1n$$

SHOT-PEENING

El SHOT-PEENING es un tratamiento por chorro de perdigones de acero, que se aplica sobre la superficie de las hojas de la muelle por el lado de tensión a tracción.

Este proceso se realiza en una máquina marca Whelabrator con un tiempo de exposición de 2 minutos en promedio y una granalla de acero redonda, mezcla R-230 y R-330.

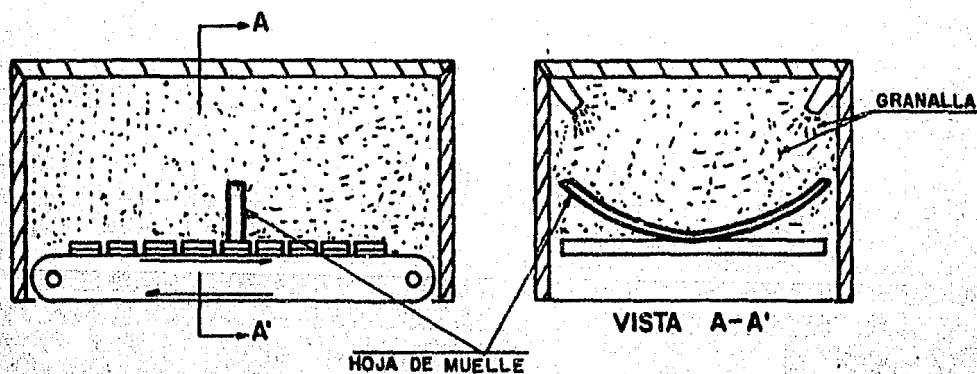


FIGURA 35

Con el golpeo de perdigones aumentamos las propiedades de fatiga de una muelle. Cuando la carga es aplicada a una hoja la capa de la superficie esta sujeta a un máximo esfuerzo de convadura.

Una superficie de la hoja estará en tracción y la cara opuesta sera de compresión, la superficie que es concava en posición libre es generalmente de tracción bajo carga mientras que la superficie convexa es generalmente de compresión.

La falla por fatiga generalmente comienza cerca de la superficie del lado de tracción, entonces esfuerzos residuales de tracción son sumados algebraicamente a los esfuerzos de carga, la introducción de esfuerzos residuales compresivos reduce la operación de esfuerzos y aumenta la vida a la fatiga.

En este momento decimos que la superficie esta terminada o sea nos referimos a la condición superficial de las hojas de la muelle después que el acero ha sido formado y tratado térmicamente. Normalmente a las hojas de las muelles de los automóviles se le trata térmicamente y en condiciones de "SHOT-PEENED".

Después del tratamiento térmico se producen óxidos por vía química exhibiendo una apariencia azul o azul oscuro, el SHOT-PEENED se caracteriza porque da una apariencia lustrada a la hoja.

ENSAMBLE

El ensamble de la muelle se lleva a cabo con la ayuda de un transportador de tablillas, sobre el cual estan colocadas las hojas que componen a una muelle; aqui se ordenan y se les añade unas laminas entre cada hoja al centro de la misma, así como unos insertos de hule en los extremos de la muelle para evitar la abrasión entre cada hoja, tambien se introduce un buje de hule acanalado en un ojillo de la muelle y se fijan con un tornillo de acero 1045 tratado térmicamente, al centro de la muelle.

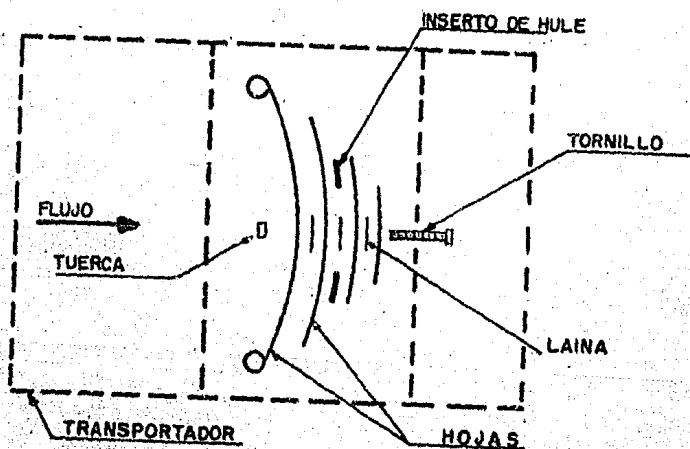


FIGURA 35

PRESFORZADO

Una vez armada la muelle, se procede a flexionarla de acuerdo a la especificación del cliente, para un mejor acomodo y la liberación de esfuerzos.

El flexionado se realiza en las máquinas flexionadoras horizontal y vertical dependiendo de la muelle que se trate.

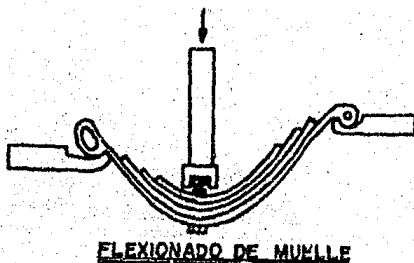


FIGURA 36

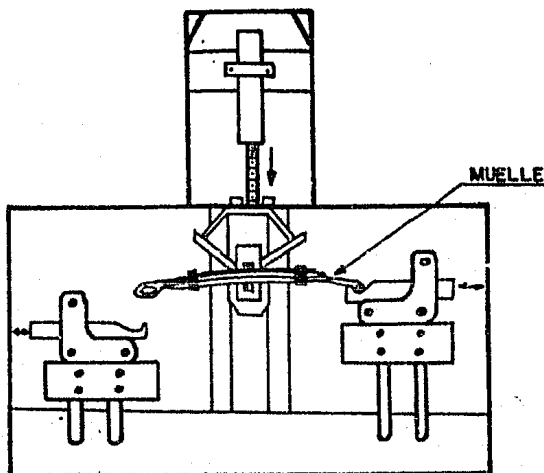
MAQUINA FLEXIONADORA VERTICAL

FIGURA 37

El pesado es la operación en donde se lleva a cabo la medición del "RATE" mediante un dinámometro.

La forma de medir es colocando a la muelle en un bastidor hidráulico como se muestra en el siguiente dibujo, y flexionar a la muelle a una altura determinada y medir la carga que se necesita entonces obtendremos la carga por unidad de flexión o "RATE".

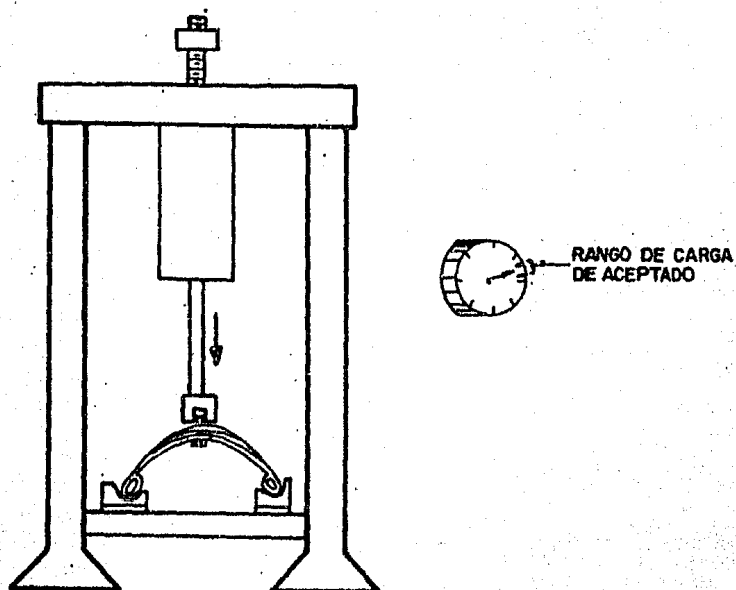


FIGURA 38

Las muelles que al medirles la carga, están fuera del rango ya sea arriba o abajo de este son separadas,

Cuando la medición es superior se procede a realizar nuevamente la operación de flexionado y cuando la medición es inferior se procede a una flexión por el lado de tensión a tracción, como se muestra en la siguiente figura:

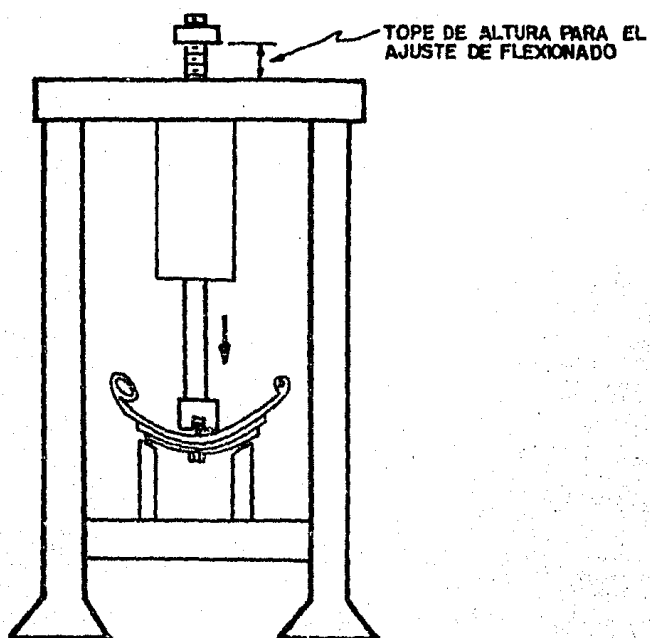


FIGURA 39

PRUEBA DE VIDA

Es el número de ciclos que debe soportar una muelle sin presentar falla. Se le considera como una prueba de vida acelerada (ver inciso d).

PINTURA

Se refiere a un material añadido a la superficie de las

hojas o de las áreas expuestas de la muelle. Esto se hace con el fin de prevenir la corrosión durante su almacenamiento y en operación ambiental.

Todas las áreas expuestas al ser protegidas deben de estar libres de "escama y suciedad", la superficie con SHOT-PEENED debe de ser protegida lo más rapido posible para prevenir la formación de algun punto de corrosión.

Una área no protegida o descubierta puede contribuir a una corrosión localizada y reducir el limite de fatiga. Antes de que una protección sea especificada ya sea de grasa, aceite, pintura o plástico, se debe de evaluar de acuerdo a los efectos que deba de tener en la vida a la fatiga de la muelle.

El grueso y la adhesión de la pintura debe de ser dentro de tolerancias las cuales han sido establecidas para el tipo de material usado, para una adecuada protección corrosiva y un funcionamiento satisfactorio. En nuestro caso se usa "TECTYL".

ROTULADO

En esta operación se imprime el logotipo de la razón social.

INSPECCION FINAL

En esta área se verifican las características dimensionales y acabado de la muelle.

d).- PRUEBA DE VIDA.

Se realiza en una máquina recíprocamente de acuerdo a especificaciones de diseño del cliente. El funcionamiento de esta depende de los siguientes parámetros:

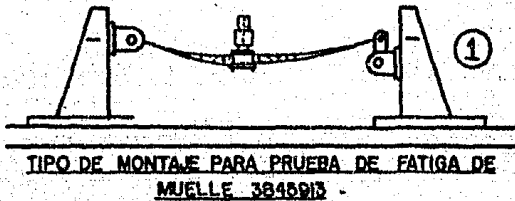


FIGURA 40

CONTROL DE CALIDAD

REPORTE DE PRUEBA DE FATIGA

CONTROL DE CALIDAD

REPORTE DE PRUEBA DE FATIGA

REMITIDA POR:		PLANTA	O.F. Y F.E.	PRUEBA No.	
PARTE, NOMBRE Y No.		CLIENTE	ESPECIFICACION	FECHA:	
CONDICIONES DE MONTAJE					
CARACTERISTICA	ESPECIF.	RESULT.	CARACTERISTICA	ESPECIF.	RESULT.
Dist. soporte frontal			Carga máx. de prueba		
Dist. entre soportas			Torque de Clamp.		
Alt. soporte frontal			Tipo de montaje		
Alt. soporte trasero			Modulo de prueba		
Altura de carga			Ciclos por minuto		
Altura de montaje			Especificación (ciclos)		
Carrera			Hojas fracturadas		
Arriba de alt. de carga			Localización fract.		
Abajo de alt. de carga			Inicio-Termino día y Hr.		
CONDICIONES DE LA MUELLE					
CARACTERISTICA	ESPECIFICACION	RESULTADOS ANTES DE PRUEBAS	DESPUES DE 50,000 CICLOS	ALTURAS DE COMPRESION	
Altura libre					
1a. Carga					
2a. Carga					
3a. Carga					
1er. Rate					
2do. Rate					
3er. Rate					
Flexión					

CONTROL DE CALIDAD

REPORTE DE PRUEBA DE FATIGA

CONTROL DE CALIDAD			REPORTE DE PRUEBA DE FATIGA		
REMITIDA POR:		PLANTA	O.F. Y F.F.	PRUEBA No.	
PARTE, NOMBRE Y No.		AUTOPARTES	4475-310 días transcurridos. Año 5	CONSECUTIVO	
MUELLE TRASERA 38 45 913		CLIENTE	ESPECIFICACION	FECHA:	
		CHRYSLER	3497889	HIZO REPORTE 10-XII-85	
CONDICIONES DE MONTAJE					
CARACTERISTICA	ESPECIF.	RESULT.	CARACTERISTICA	ESPECIF.	RESULT.
Alt. soporte frontal	24.000"	24.000"	Carga máx. de prueba		
Alt. soportes traseros	57.500"	57.500"	Torque de clamp.	901bs/FF	901bs/FF
Alt. soporte frontal	12.500"	12.500"	Tipo de montaje	1	1
Alt. soporte trasero	7.000"	7.000"	Modulo de prueba	SUR	SUR
Altura de carga	-0.375"	-0.375"	Ciclos por minuto	65	65
Altura de montaje	2.125"	2.125"	Especificación (ciclos)	250,000	250,000
Contrato	6.000"	6.000"	Hojas fracturadas	SIN FACTURA	
Arriba de alt. de carga	2.500"	2.500"	Localización fract.		
Abajo de alt. de carga	3.500"	3.500"	Inicio-Termino día y Hr.		
CONDICIONES DE LA MUELLE					
CARACTERISTICA	ESPECIFICACION	RESULTADOS ANTES DE PRUEBAS	DESPUES DE 50,000 CICLOS	ALTURAS DE COMPRESION	
Altura libre					
1a. Carga	6.690 - 730 lbs	740 lbs	722 lbs		
2a. Carga					
3a. Carga					
1er. Rate	100 - 110 lbs/IN	104 lbs/IN	104 lbs/IN		
2do. Rate					
3er. Rate					
Flexión					

UNA VEZ AJUSTADOS LOS PARAMETROS DIMENSIONALES SE INICIA LA PRUEBA DE LA CUAL SE OBTUVIERON LOS SIGUIENTES RESULTADOS:

CONTROL DE CALIDAD

REPORTE DE PRUEBA DE FATIGA

CONTROL DE CALIDAD

REPORTE DE PRUEBA DE FATIGA

REMITIDA POR:	PLANTA AUTOPARTES	DE Y FE 4475-310 días transcurri dos. Año 5	PRUEBA No. CONSECUTIVO
PART. NOMBRE Y No. MUELLE TRASERA 38 45 913	CLIENTE CHRYSLER	ESPECIFICACION 3497889	FECHA: HIZO REPORTE 10-XII-85

CONDICIONES DE MONTAJE

CARACTERISTICA	ESPECIF.	RESULT.	CARACTERISTICA	ESPECIF.	RESULT.
Alt. eje delantero	24.000"	24.000"	Carga máx. de prueba		
Dist. entre ejes	57.500"	57.500"	Taraje de clamp.	90lbs/FF	90lbs/FF
Alt. eje delantero	12.500"	12.500"	Tipo de montaje	1	1
Alt. eje trasero	7.000"	7.000"	Módulo de prueba	SUR	SUR
Altura de carga	-0.375"	-0.375"	Ciclos por minuto	65	65
Altura de montaje	2.125"	2.125"	Especificación (ciclos)	250,000	250,000
Carga	6.000"	6.000"	Hojas fracturadas	SIN FACTURA	
Ariba de alt. de carga	2.500"	2.500"	Localización fract.		
Abajo de alt. de carga	3.500"	3.500"	Inicio-Termino día y Hr.		

CONDICIONES DE LA MUELLE

CARACTERISTICA	ESPECIFICACION	RESULTADOS ANTES DE PRUEBAS	DESPUES DE 50,000 CICLOS	ALTURAS DE COMPRESION
Altura libre				
1a. Carga	5.690 - 730 lbs	740 lbs	722 lbs	
2a. Carga				
3a. Carga				
1er. Rate	100 - 110 lbs/IN	104 lbs/IN	104 lbs/IN	
2do. Rate				
3er. Rate				
Flexión				

UNA VEZ AJUSTADOS LOS PARAMETROS DIMENSIONALES SE INICIA LA PRUEBA DE LA CUAL SE OBTUVIERON LOS SIGUIENTES RESULTADOS:

METODOS DE PRUEBA PARA MUELLES DE HOJAS DE ACERO
EMPLEADOS EN LOS SISTEMAS DE SUSPENSION DE VEHICU
LOS AUTOMOTORES.

DGN----- D-48-1974.

1.- ALCANCE.

La presente norma establece la determinación de las pruebas de carga de diseño o inspección, constante, ángulo de asiento y fatiga, de los muelles de hojas de acero empleados en los sistemas de suspensión de vehículos automotores.

2.- DEFINICIONES.

Para los propósitos de esta norma, se dan las siguientes definiciones:

2.1.- PRE-CARGA.

Es la operación de flexionar al muelle hasta una condición extrema, la cual puede ocurrir en el vehículo.

2.2.- CARGA DE DISEÑO O DE INSPECCION.

Es la fuerza requerida para flexionar el muelle a la altura total o abertura, especificada en el diseño.

2.3.- CONSTANTE.

Es la fuerza necesaria, en kilogramos, para flexionar el muelle en un centímetro.

2.4.- FATIGA O PRUEBA DE VIDA.

ES el número de ciclos de flexión que debe soportar un muelle sin presentar falla, Se le considera como una prueba de vida acelerada.

2.5.- ANGULO DE ASIENTO.

Es el ángulo entre la tangente al centro del asiento del muelle y una línea trazada a través de los puntos terminales de la longitud activa de la muelle en cada ojillo, tomada a lo largo de la superficie de tensión de la hoja principal o de acuerdo a la posición de carga de prueba.

Cuando ambos extremos del muelle tienen ojillos de igual configuración y diámetro o tiene extremos planos sin ojillos, el ángulo de asiento es el ángulo entre la tangente al centro del asiento del muelle y la línea dato.

3.- APARATOS Y EQUIPO,

3.1.- Prensa de capacidad necesaria para medir la carga y la constante del muelle.

3.2.- Máquina recíprocante, con la capacidad necesaria para dar la carrera especificada en el diseño propio del muelle para la prueba de fatiga del mismo.

3.3.- Aditamento en forma de "V" para lograr una aplicación uniforme de la carga sobre el muelle. (Ver figura 1).

3.4.- Montajes iguales o equivalentes a los usados en el vehículo para el cual va a ser utilizado el muelle (bujes, pernos, perchas, columpios, abrazaderas, etc.).

3.5.- Martillo con cabeza de material suave.

3.6.- Placa de acero rectificada, de 100 mm de longitud y un ancho adecuado al ancho del muelle,

3.7.- Transportador con divisiones en minutos.

3.8.- Hilo de cualquier material y diámetro.

4.- PREPARACION DEL ESPECIMEN.

Los especímenes pueden probarse tal como se reciben del proveedor.

5.- PROCEDIMIENTO.

5.1.- PRUEBAS DE CARGA DE DISEÑO Y CONSTANTE.

5.1.1.- Se coloca la muelle en la prensa, haciendo uso de montajes adecuados. (Ver figura 2).

5.1.2.- Se coloca el aditamento en forma de "V" sobre la superficie del muelle (Ver figura 2).

5.1.3.- Se comprime el muelle a la dimensión mostrada en el diseño del mismo (siempre aplicando carga), para que exista un asentamiento de las hojas antes de la prueba y se libere a su estado original. (A esta operación se le denomina pre-carga).

5.1.4.- Se comprime el muelle a una altura de 10 o 20 mm menor que la altura total mostrada en el diseño del mismo.

Se dan algunos golpes a lo largo de todo el muelle con el martillo, con el objeto de lograr un asentamiento en las hojas del mismo y se anota la carga aplicada.

5.1.5.- Se comprime el muelle a la altura mostrada en el diseño del mismo, se le dan algunos golpes con el martillo y se anota la carga aplicada.

La carga aplicada en este paso, se le denomina "carga de diseño o de inspección".

5.1.6.- Se comprime la muelle a una altura de 10 o 20 mm, mayor que la mostrada en el diseño del mismo. Se dan unos golpes al muelle con el martillo y se anota la carga aplicada.

5.2.- PRUEBA DE ANGULO DE ASIENTO.

5.2.1.- Para muelles planas; Se comprime el muelle a la posición plana apoyada sobre los ojillos en pernos del mismo diámetro y menores que el diámetro del ojillo. Se pasa un hilo por la parte superior de los pernos y se coloca la placa de 100-mm, en posición simétrica al tornillo central. Se mide la caída del hilo a la palanca en dicha longitud y se divide entre la longitud de la misma. (Ver figura 3).

5.2.2.- Para muelles en posición de carga; Se comprime el muelle a la posición de carga indicada en el diseño del muelle, apoyada sobre los ojillos, en pernos del diámetro nominal de los ojillos. Se pone un hilo al centro de los pernos y se co

loca la placa de 100 mm con posición simétrica al tornillo central. Se mide la caída del hilo a la placa en dicha longitud y se divide entre la longitud de la misma. (Ver figura 4).

5.2.3.- Prueba de ángulo de asiento (haciendo uso de hilo y transportador); Se mide el muelle según se trata de una prueba de ángulo de asiento para muelle plano o una prueba de ángulo de asiento para muelle en posición de carga. Se coloca el hilo en su posición plana o de carga y se mide directamente el ángulo de asiento con el transportador.

5.3.- PRUEBA DE FATIGA (Ver inciso 7.1.1.),

5.3.1.- Se instala el muelle en posición invertida a la usada en el vehículo, en la máquina recíprocante, usando montajes iguales o equivalentes a los empleados en el vehículo o como se indique en el diseño propio del muelle.

La sujeción en el área de aplicación de la carga, debe efectuarse como se indica en la figura 5.

5.3.2.- Se ajusta la carrera y el número de ciclos por minuto de la máquina recíprocante a las condiciones indicadas en el diseño del muelle.

5.3.3.- Para muelles de servicio pesado, se reaprietan las tuercas de las abrazaderas o mordazas en el área de montaje, cada 10 000 ciclos.

6.- INTERPRETACION DEL RESULTADO.

6.1.- Los valores de carga obtenidos en el inciso 5.1.5. nos da la carga de diseño.

Los valores de carga obtenidos de los incisos 5.1.4. y 5.1.5. nos sirven para calcular la constante de la muelle.

Para el caso de que la compresión sea 10 mm menor y 10 mm mayor que la abertura mostrada en el diseño del muelle, la constante se determina con la diferencia de las cargas obtenidas en los incisos 5.1.4. y 5.1.6., entre la longitud total deflexionada,

Para el caso de que la compresión sea 20 mm menor y 20 mm mayor que la altura mostrada en el diseño del muelle, la constante se determina con la diferencia de las cargas obtenidas en los incisos 5.1.4. y 5.1.6., entre la longitud total deflexionada.

6.2.- El ángulo de asiento (para las pruebas de los in-

cisos 5.2.1. y 5.2.2.), se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$A_s = \text{Arc tg } \frac{B - A}{100}$$

en donde:

A y B = altura en mm.

A_s = ángulo de asiento (puede ser positivo o negativo - según figura 4).

El ángulo de asiento (para la prueba del inciso 5.2.3.) se lee directamente en el transportador.

6.3.- Para la prueba de fatiga, el muelle debe acumular el mínimo número de ciclos especificados en el diseño del mismo.

7.- APENDICE.

7.1.- OBSERVACIONES.

7.1.1.- Para la prueba de fatiga, se deben emplear un mínimo de cinco muestras.

7.2.- BIBLIOGRAFIA.

Especificaciones técnicas de Ford Motor Company, S.A.

Especificaciones técnicas de Chrysler Corporation.

Especificaciones técnicas de Rassini Rheem, S.A.

Especificaciones técnicas de Álvarez Automotriz, S.A.

Norma Oficial Mexicana, "Estructuración de Normas".

DGN-R-50-1972.

7.3.- PARTICIPANTES.

Ford Motor Company, S.A.

Chrysler de México, S.A.

Rassini Rheem, S.A.

Álvarez Automotriz, S.A.

Comité Consultivo de Normalización de la Industria Automotriz.

México, D.F., a 5 de diciembre de 1974.

EL C. DIRECTOR GENERAL DE NORMAS:

ING. CESAR LARRANAGA ELIZONDO.



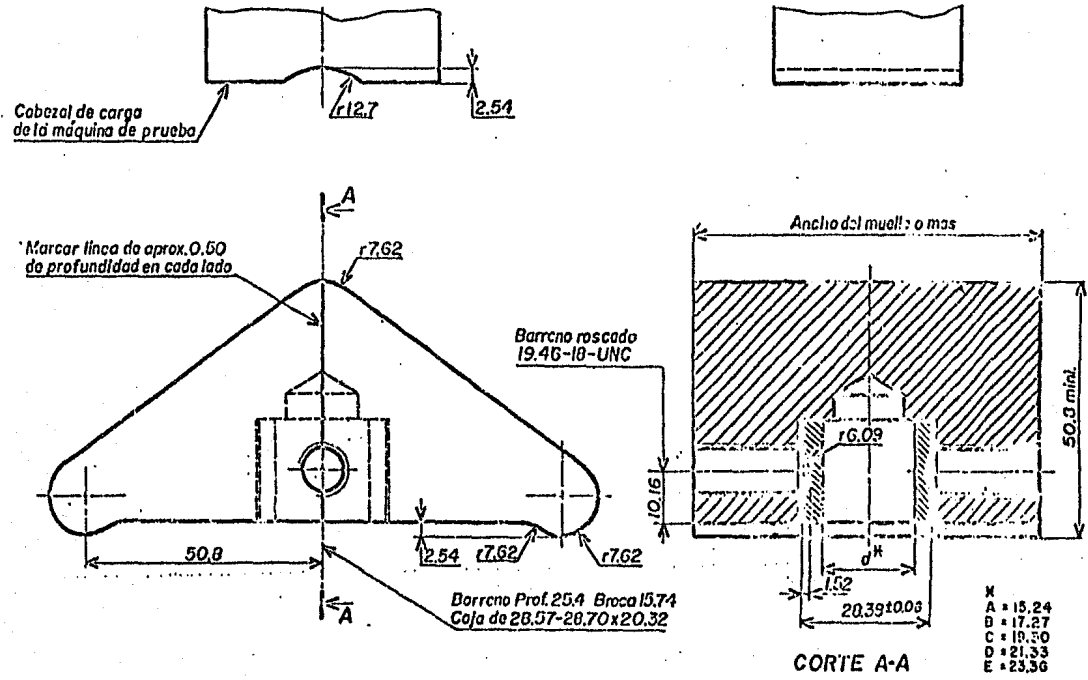
35180-48

DIRECCION GENERAL DE NORMAS

74 10 10

Escala: 1:1

Fig. 1

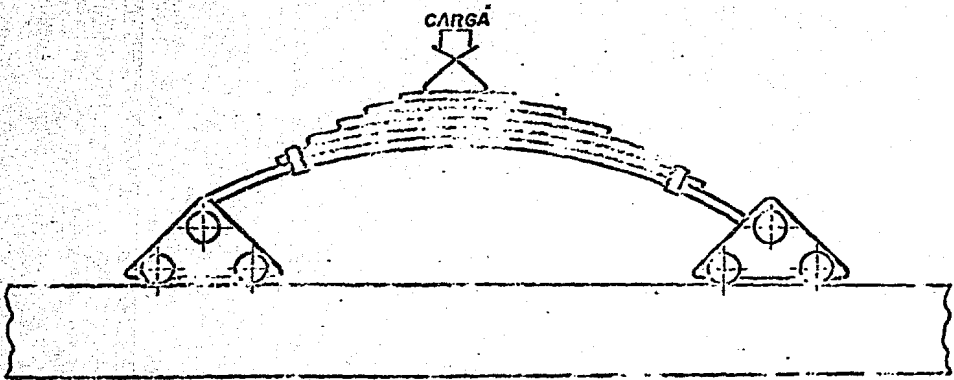


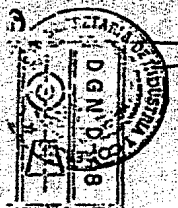


DIRECCION GENERAL DE NORMAS 74 10 23

Enchido No

F16.2





D.G.N.D. 198

DIRECCION GENERAL DE NORMAS

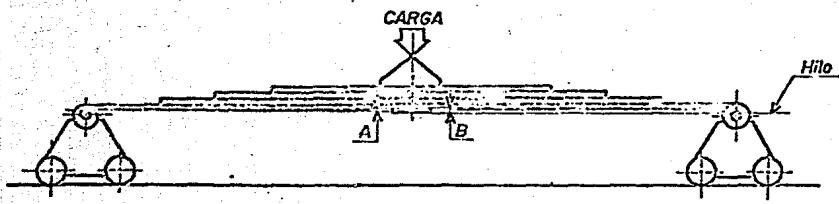
74 10 23

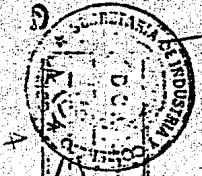
Escala: No

PRIMERA DE APLICACION DE AGUJETA

Acot.: No

5/6.3





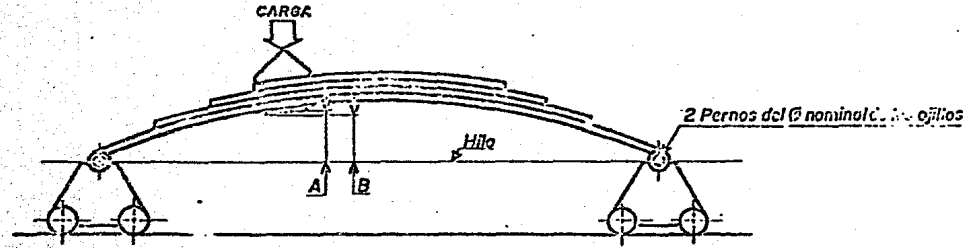
DIRECCION GENERAL DE NORMAS 741023

PRUEBA DE ARJULO DE ASIENTO

Escala: No

Acol: No

Fig. 4





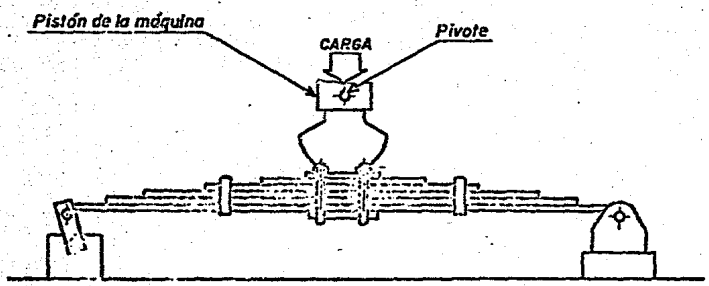
DIRECCION GENERAL DE NORMAS

74 10 23

Fig. 5

Especio: N.º

Acct.: N.º



e).- CONCLUSIONES ESTUDIO PRACTICO

La prueba de vida de una muelle y en general de cualquier pieza que este sometida a esfuerzos cíclicos es de gran importancia, puesto que nos dara la información del comportamiento de la pieza cuando este en servicio.

Dicha información servira para tomar decisiones acerca del diseño y si el proceso de fabricación es el correcto y/o hacer correcciones en los casos en que esta falle.

Cabe mencionar que esta muelle debido al espesor de las hojas reduce la probabilidad de falla por fatiga en comparación con las de mayor espesor, debido a la elasticidad del material.

El no tomar en cuenta o no darle la importancia necesaria a la prueba de vida, traera como consecuencia el no poder tomar decisiones para prevenir errores durante el diseño y el proceso, así como fallas durante el servicio de una determinada pieza (en este caso una muelle).

La prueba debe ser realizada simulando todos los factores que afecten a la muelle en servicio principalmente como lo son: La capacidad de carga y sobrecarga, ciclos de carga variable, medio corrosivo (por ejemplo, entre la atmósfera de la zona

costera del litoral mexicano y la atmósfera de la ciudad de México) y temperatura.

La normalización constituye un medio de unificación de criterios y debe darsele la importancia necesaria, ya que con la información de esta dependerá la confiabilidad de la prueba y, además, competir en el mercado internacional con fabricantes de un cierto producto en cuanto a calidad.

Durante el proceso de fabricación de una muelle se deben de tomar en cuenta los siguientes aspectos:

A) OPERACIONES PREVIAS,

Control de la temperatura, tiempo de exposición de material y flujo de material en la línea de producción.

Por ejemplo: En el caso de la operación de roleo, la operación se realiza en un extremo de la hoja, luego se espera que se enfríe y se realiza la operación en el otro extremo siendo el tiempo de enfriamiento muy tardado. Para lo cual sería conveniente un estudio basado, tanto en la práctica como en la teoría de transferencia de calor, para reducir el tiempo sin perjudicar las propiedades del material.

B) TRATAMIENTOS TERMICOS.

Control del tiempo de la introducción de la pieza al medio de temple y un mejor aprovechamiento de los hornos que se tienen.

Por ejemplo: Durante el paso de la salida del horno de austenizado y el carrete formador, se podría implementar un equipo mecánico para el manejo de la pieza en sincronía con el movimiento del transportador de dicho horno. Mientras no haya cambios es necesario que el operario tenga los medios de seguridad adecuados.

C) CLASIFICADO.

Control de calidad de acabado superficial y profundidad obtenidas en el granallado con patrones de comparación normalizados.

Por ejemplo: Con un rugosímetro se podría determinar la calidad superficial y eliminar concentradores de esfuerzos.

Los ingenieros mecánicos, químicos, metalúrgistas y personas involucradas en el proceso deben de tomar en cuenta las consideraciones anteriores para manejar el proceso productivo y la calidad sin descuidar el factor humano.

15). CONCLUSIONES GENERALES

Una comprensión de los fenómenos de fatiga es esencial para el ingeniero diseñador. En México se diseñan muy pocos componentes mecánicos y el diseño apenas alcanza a incluir un análisis estático, cuando se involucra además, un análisis dinámico, - se puede decir que se esta haciendo ingeniería de un nivel mas - alto, no es, sino rara vez, que se hacen consideraciones de fatiga en el diseño.

En la práctica, la predicción de la vida a la fatiga de un material es complicada porque, salvo unos cuantos materiales - relativamente quebradizos, la vida a la fatiga de un material es muy sensible a pequeños cambios en las condiciones de carga, esfuerzos locales y características del material.

Debido a que es difícil tomar en cuenta estos cambios - en la predicción de esfuerzos dinámicos o de los criterios de falla por fatiga, hay una alta incertidumbre inherente a las predicciones analíticas de la vida a la fatiga.

A partir de la identificación de las causas que provocaron la falla, se deberán iniciar y adoptar las acciones correctivas necesarias que tiendan a evitar fallas similares en el futuro.

Las fallas por fatiga son los tipos mas comunes de fractura en máquinas y probablemente constituyen el 90% de todas las fallas. Tales fallas se desarrollan despues de un gran número de aplicaciones de carga, generalmente a un nivel de esfuerzos inferior a la resistencia a la cedencia del material.

16). GLOSARIO DE TERMINOS.

ANISOTROPIA.- Es la característica de un metal de presentar distintas propiedades cuando se ensaya en diferentes direcciones (como resistencia a la tracción en el sentido de la fibra o transversalmente a ella).

BANDA DE DESLIZAMIENTO.- Es aquella que se forma cuando las líneas individuales de una banda se deslizan en forma continua y así producen escalones en la superficie del cristal.

CORROSION.- Es el deterioro de un metal mediante reacción química o electroquímica con su ambiente.

DEFORMACION ELASTICA.- Es el cambio de dimensiones que acompañan a un esfuerzo en el intervalo elástico; las dimensiones originales se restauran al suprimir el esfuerzo.

DEFORMACION PLASTICA.- Es aquella deformación que permanece al suprimir el esfuerzo que produce la deformación.

DESGASTE.- Es la acción de deterioro gradual de un material.

DESGASTE.- Es el resultado de un proceso producido por-

el rozamiento, el cual destruye gradualmente las superficies útiles de la pieza y modifica las dimensiones y la forma de ésta.

DENSIDAD DE DISLOCACIONES.- Es la longitud de la línea de dislocación que se encuentra en una unidad de volumen del cristal.

DISLOCACION.- Es una imperfección cristalina que representa el límite entre zonas deslizadas y sin deslizar.

DUCTILIDAD.- Es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, medida por la elongación o reducción de área en una prueba tensil.

ESFUERZO.- Esta definido por fuerza por unidad de área, a menudo pensado como la fuerza que actúa en una pequeña área dentro de un plano.

ESFUERZO DE FLUENCIA.- Es aquel en el que existen deformaciones dependientes del tiempo y a bajas aplicaciones de esfuerzo.

ESFUERZO MEDIO.- Es el promedio algebraico del esfuerzo máximo y mínimo en un ciclo $S_m = (S_{m\acute{a}x} + S_{m\acute{i}n})/2$.

ESFUERZO NOMINAL.- Es el esfuerzo calculado por la ecuación de esfuerzo, tal como $S=F/A$ ó $S=Mc/I$.

EXTRUSION.- Son erupciones en la superficie de muestras de fatiga.

FALLA.- Deterioro, daño o destrucción de un componente, que provoca la interrupción de su servicio o de sus funciones.

FATIGA.- Fenómeno que origina la fractura bajo esfuerzos repetidos o fluctuantes, con un valor máximo menor que la resistencia tensil del material.

FATIGA TERMICA.- Es la fractura resultante en la presencia de gradientes de temperatura que varían con el tiempo en tal forma que producen esfuerzos cíclicos en una estructura.

FORJADO.- Es la deformación plástica de un metal, por lo general caliente, en las formas deseadas, con fuerza compresiva, con o sin troqueles.

FRACTURA.- Es la separación de un cuerpo sujeto a un esfuerzo en dos o más partes. Puede ser frágil o dúctil.

FRAGILIDAD.- Es la calidad de un material que da lugar-

a la propagación de fisuras sin deformación plástica apreciable.

INCLUSIONES ENDOGENAS.- Son materiales no metálicos que se forman en el interior de un material metálico.

INCLUSIONES EXOGENAS.- Son materiales no metálicos que se forman en el exterior de un material metálico durante la fabricación.

INTRUSION.- Son depresiones en la superficie de muestras de fatiga.

ISOTROPIA.- Es la calidad de un material de tener propiedades idénticas en todas direcciones.

LIMITE DE FATIGA.- Es el esfuerzo máximo debajo del cual un material puede soportar un número infinito de ciclos de esfuerzos.

METALOGRAFIA.- Es la ciencia que estudia la constitución y estructura de los metales y aleaciones reveladas a simple vista o por herramientas tales como microscopio óptico, rayos X, microscopio de electrones.

NUCLEACION.- Es el inicio de transformación de fases en

sitios discretos, creciendo la nueva fase sobre los núcleos.

PLANO DE DESLIZAMIENTO.- Son los planos cristalinos en los que se produce deslizamiento en una estructura determinada.

PUNTO DE CEDENCIA.- Es el esfuerzo en el cual se inicia el flujo plástico en procesos de carga de tiempo corto.

RAZON DE ESFUERZO.- Es la razón algebraica de dos valores específicos de esfuerzos en un ciclo de esfuerzos.

RESILIENCIA.- Es la resistencia al impacto de un material.

RESISTENCIA A LA FATIGA.- Es el esfuerzo máximo que puede soportarse para un número específico de ciclos sin que haya falla, cuyo esfuerzo es completamente revertido en cada ciclo, a menos que establezca otra cosa.

RESISTENCIA A LA TRACCION.- Es un índice de calidad del material.

TENACIDAD.- Es la capacidad de un metal para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse.

17). BIBLIOGRAFIA

- 1.- METALS HANDBOOK
AMERICAN SOCIETY FOR METALS

- 2.- INTRODUCCION A LA METALURGIA FISICA
SIDNEY AYNER
Mc GRAW HILL

- 3.- ELEMENTOS DE MAQUINAS
V. DOBROVOLSKY
MIR MOSCU,

- 4.- DISEÑO DE ELEMENTOS DE MAQUINAS
V.M. FAIRES
MONTANER Y SIMON S.A, EDITORES.

- 5.- ALREDEDOR DE LAS MAQUINAS HERRAMIENTAS
H. GERLING,
REVERTE S,A.

- 6.- RESISTENCIA DE MATERIALES
V.I. FEODOSIEV
MIR MOSCU

7. - METALURGIA MECANICA

GEORGE E. DIETER

Mc. GRAW HILL

8. - PRINCIPIOS DE METALURGIA FISICA

R.E. REED-HILL

9. - MANUAL SOBRE DISEÑO Y APLICACIONES DE MUELLES

DE HOJA

SAE HSI788

10. - PROCESOS MANUFACTURA

RAUL ESPINOZA ISLAS

UNAM.