



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
CAMPUS ARAGÓN

“REVISIÓN DEL DISEÑO DEL RESORTE ELIGO DE LA  
SUSPENSIÓN SECUNDARIA DEL S.T. C. METRO”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO  
P R E S E N T A :  
FERNANDO FONSECA GARCÍA

ASESOR:  
ING. JAVIER NAVA PÉREZ



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FERNANDO FONSECA GARCIA  
Presente

Con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobado su tema de tesis y asesor.

TÍTULO:  
"REVISIÓN DEL DISEÑO DEL RESORTE ELIGO DE LA SUSPENSIÓN SECUNDARIA DEL  
S. T. C. METRO"

ASESOR: Ing. JAVIER NAVA PÉREZ

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México, 29 de enero de 2004.

LA DIRECTORA

ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



C p Secretaría Académica  
C p Jefatura de Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
C p Asesor de Tesis

LTG/AIRA

## DEDICATORIAS

*A Dios, por cuidar a mis seres queridos y darme la fuerza para salir adelante en los momentos de desesperación. Gracias por iluminar mi camino...*

*A Mi Madre Gloria, porque siempre has creído en mí a pesar de todo, tu apoyo y comprensión me motivan para continuar luchando, te quiero mucho y no te fallaré.*

*A Mi Padre Fernando, heredé tu carácter fuerte y orgulloso pero sin él no hubiera llegado a este momento tan importante, debo agradecerte que nunca te desentendieras de nuestra familia, ahora te entiendo más y seguiré tu ejemplo. Te quiero mucho.*

*A Mis Padres, porque juntos han sacado adelante a nuestra familia con sacrificio, lucha y esfuerzo, nos han dado lo mejor de ustedes y eso estará presente el resto de mi vida.*

*A Mis Hermanos: Oscar y Alberto, porque hemos compartido muchas cosas en familia, el legado de nuestros padres nos hace sobresalir y enfrentar la adversidad. Si somos persistentes triunfaremos.*

*A Mis Abuelas (in memorian): Isabel y Elvira, aunque ya no están con nosotros su amor y esfuerzo siguen presentes en nuestras vidas. Las extraño pero se que me cuidan desde el cielo.*

*A Mi Prima Cristina (in memorian), porque siempre transmitiste alegría y nos hacías reír en todo momento, estoy seguro que donde te encuentres estarás haciendo lo mismo. Te extrañamos pero tengo la certeza de algún día te volveremos a ver.*

*A Mi Padrino Arturo (in memorian), que en donde quiera que esté lo estaremos recordando con mucho cariño.*

*A Mi Tío Francisco, por su apoyo para lograr este objetivo tan importante, sé que hemos vivido momentos difíciles pero al final los hemos superado. Espero que su felicidad sea completa y placentera, sabe que cuenta conmigo, lo admiro y lo respeto.*

*A Mis Tíos, les agradezco de corazón que me reciban en sus hogares de una manera tan especial y me hagan sentir parte de ustedes, les agradezco su apoyo y les ofrezco lo mejor de mí.*

*A Mis Amigos, a ustedes amigos míos porque se han tomado la molestia de ayudarme y apoyarme en momentos cruciales de mi vida además de que hemos compartido alegrías y tristezas, a todos y cada uno de ustedes gracias.*

*A Mis Profesores, sus enseñanzas y experiencia me han guiado en el transcurso de los años, la formación que me han brindado ha sido excelente y muy provechosa. Gracias.*

*A ti Anette, por tu cariño y apoyo, a ti mujer que cambiaste mi vida y que compartes conmigo alegrías y tristezas, tú que conoces mis secretos y mi personalidad oscura, tú que me has visto reír y llorar, gracias por estar a mi lado.  
T.A.M.*

# INDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>CAPITULO I. CONCEPTOS BASICOS</i>	
<i>1.1 Aceros</i>	5
1.1.1 <i>Estructuras Cristalinas</i>	5
1.1.2 <i>Tipos de Estructuras Cristalinas</i>	5
1.1.3 <i>Imperfecciones de los cristales</i>	6
1.1.4 <i>Sistemas de Designación</i>	8
1.1.5 <i>Importancia del Carbono</i>	8
1.1.6 <i>Grupo de Aleaciones</i>	11
<i>1.2 Tratamientos Térmicos</i>	12
1.2.1 <i>El Sistema Hierro-Carbono</i>	12
1.2.2 <i>Tratamiento Térmico de las Aleaciones Ferrosas</i>	15
1.2.3 <i>Concepto de Tratamiento Térmico</i>	20
<i>1.3 Dureza</i>	25
1.3.1 <i>Ensayo Brinell</i>	25
1.3.2 <i>Ensayo Rockwell</i>	27
1.3.3 <i>Ensayo Vickers</i>	28
1.3.4 <i>Ensayo Knoop</i>	28
1.3.5 <i>Escleroscopio</i>	28
1.3.6 <i>Dureza Mohs</i>	29
1.3.7 <i>Durómetro</i>	29
1.3.8 <i>Dureza y Resistencia</i>	29
1.3.9 <i>Procedimientos de Ensayo de Dureza</i>	30
<i>1.4 Esfuerzo y Deformación</i>	30
1.4.1 <i>Esfuerzo</i>	30
1.4.2 <i>Deformación</i>	32
1.4.3 <i>Elasticidad</i>	32
1.4.4 <i>Diagrama Esfuerzo-Deformación</i>	32
<i>1.5 Fatiga</i>	34
1.5.1 <i>Tipos de ciclos de esfuerzos</i>	35
1.5.1 <i>Relaciones empíricas</i>	36
<i>1.6 Elastómeros</i>	37
1.6.1 <i>Vulcanización</i>	40

## CAPITULO II. RESORTES Y SUSPENSIONES ELÁSTICAS

2.1	<i>Resortes</i>	44
2.1.1	<i>Resortes Helicoidales</i>	44
2.1.2	<i>Resortes Helicoidales de compresión</i>	44
2.1.3	<i>Resortes Helicoidales de tensión o extensión</i>	46
2.1.4	<i>Resortes Helicoidales de torsión</i>	48
2.1.5	<i>Resortes discoidales o Belleville</i>	50
2.1.6	<i>Resortes varios</i>	51
2.2	<i>Análisis de Esfuerzos en Resortes Helicoidales</i>	52
2.3	<i>Deformación en Resortes Helicoidales</i>	55
2.3.1	<i>Módulos y constantes de resortes</i>	55
2.4	<i>Diseño de Resortes Helicoidales</i>	59
2.4.1	<i>Diámetros</i>	60
2.4.2	<i>Diámetros estándar del alambre</i>	60
2.4.3	<i>Longitudes</i>	61
2.4.4	<i>Fuerzas</i>	61
2.4.5	<i>Razón de resorte</i>	62
2.4.6	<i>Índice de resorte</i>	62
2.4.7	<i>Número de bobinas</i>	63
2.4.8	<i>Espaciamiento</i>	63
2.4.9	<i>Ángulo de espaciamiento</i>	63
2.4.10	<i>Consideraciones de instalación</i>	64
2.4.11	<i>Margen de bobina</i>	64
2.4.12	<i>Materiales que se utilizan para fabricar resortes</i>	65
2.4.13	<i>Tipos de carga y esfuerzos permisibles</i>	65
2.4.14	<i>Tensiones</i>	65
2.4.15	<i>Deflexión</i>	67
2.4.16	<i>Pandeo</i>	68
2.5	<i>Funcionamiento de una Suspensión Elástica</i>	74
2.5.1	<i>Funcionamiento Estático</i>	74
2.5.2	<i>Funcionamiento Dinámico</i>	75

## CAPITULO III. DESCRIPCION DEL MATERIAL RODANTE DEL S.T.C. METRO

3.1	<i>Concepto de Tren</i>	81
3.2	<i>Formación de Elementos</i>	81
3.2.1	<i>Características de los carros</i>	82

3.3	<i>Unión entre carros</i>	83
3.4	<i>Alumbrado</i>	84
3.5	<i>Ventilación</i>	84
3.6	<i>Material Rodante sobre Neumáticos</i>	85
3.6.1	<i>Características Generales</i>	85
3.7	<i>Características Dinámicas</i>	86
3.8	<i>Carrocería</i>	87
3.9	<i>Equipos de Control y Auxiliares</i>	87
3.10	<i>Bogies (Carretillas)</i>	89
3.11	<i>Mantenimiento del Material Rodante</i>	91
3.12	<i>Suspensión Primaria</i>	93
3.13	<i>Suspensión Secundaria</i>	93
3.14	<i>Factores que afectan al Resorte Eligo</i>	93
3.15	<i>Especificaciones del Resorte Eligo para Suspensión Secundaria</i>	94
 <b>CAPITULO IV. REVISION DEL DISEÑO DEL RESORTE ELIGO DE SUSPENSION SECUNDARIA DEL S.T.C. METRO</b>		
4.1	<i>Antecedentes</i>	99
4.2	<i>Planteamiento del Problema</i>	99
4.3	<i>Revisión del Diseño a través de Pruebas y Análisis aplicados a los Resortes Eligo</i>	99
4.3.1	<i>Análisis de Prueba Estática</i>	100
4.3.2	<i>Análisis de Prueba Dinámica</i>	112
4.3.3	<i>Análisis Químico</i>	114
4.3.4	<i>Análisis Metalográfico</i>	116
4.3.5	<i>Análisis del Elastómero por el Método de Líquidos Penetrantes</i>	118
4.4	<i>Resumen de los Análisis aplicados al Resorte Eligo</i>	120
4.5	<i>Conclusiones de los Análisis aplicados al Resorte Eligo</i>	121

<i>CONCLUSIÓN</i>	122
<i>GLOSARIO</i>	124
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	127

# *INTRODUCCIÓN*

El transporte público más utilizado es el S.T.C. Metro que transporta diariamente a 4.5 millones de personas en toda la ciudad siendo hasta el momento el transporte más económico de la capital.

Pero como equipo, el metro debe ser eficiente, seguro y económico además de que debe desarrollarse en el transcurso del tiempo de tal manera que ofrezca un mejor servicio a un costo real pero equitativo para todos los usuarios.

El S.T.C. Metro desde 1976 promueve que los componentes que conforman al bogie parte fundamental del material rodante sean fabricados en el país, manejando este proyecto como una integración nacional. Al inicio de este, se tuvo un avance del 30%, a mediados de los años 80 era ya de un 90%, actualmente el 98% de los componentes del bogie se fabrican en México. Dentro del 2% restante equivalente a los componentes que son importados se encuentra el resorte eligo de la suspensión secundaria cuyos proveedores son de procedencia francesa y japonesa respectivamente. Siguiendo el proyecto de integración nacional, el resorte eligo comienza a fabricarse en el país desarrollando finalmente un prototipo nacional el cual fue puesto en operación para evaluar su desempeño.

Este prototipo nacional presentó durante su operación, pérdida de recuperación elástica y al analizarlo se encontró que el alma de acero, parte fundamental del resorte, se encontraba fracturada. Estos resultados nos llevan a realizar una revisión del diseño del resorte nacional comparándolo funcionalmente con los dos resortes eligo de adquisición extranjera.

El objetivo principal es comparar los resultados de los tres resortes y enfocarnos en el resorte de producción nacional con la finalidad de encontrar algún defecto o anomalía que afecten su comportamiento y rendimiento.

La tesis está conformada por cuatro capítulos.

En el Capítulo I denominado Conceptos Básicos se recopila y explica información referente a aceros, tratamientos térmicos, esfuerzo, deformación, elastómeros, etc., conceptos que soportan la tesis y cuyo contexto apoyarán a los siguientes capítulos.

El Capítulo II nos sirve como marco de referencia para comprender todo lo referente a los resortes y a las suspensiones elásticas, conociendo los tipos que existen, los esfuerzos y deformaciones a los que están sometidos así como también el funcionamiento para el que fueron diseñados.

El Capítulo III ofrece una descripción del Material Rodante que constituye al S.T.C. Metro y nos lleva desde lo que es un tren, tipos de trenes, la conformación y unión entre estos, sus características mecánicas y eléctricas hasta llegar a la suspensión secundaria, sitio donde se localiza nuestro objeto de análisis que es el Resorte Eligo de Suspensión Secundaria. Aquí podemos ver sus especificaciones técnicas y lo vemos representado en dos dibujos, uno con el recubrimiento elastomérico y en el otro solamente el alma de acero.

En el Capítulo IV se procede a la revisión del Resorte Eligo de Suspensión Secundaria a través de pruebas y análisis previamente planteados que siguen una secuencia lógica que va desde el comportamiento que presenta el resorte hasta la estructura del metal sin dejar de mencionar el análisis realizado al elastómero que recubre al acero.

Los resultados obtenidos tendrán que compararse para llegar a las conclusiones pertinentes.

***CAPITULO I.***

***CONCEPTOS BASICOS***

## 1.1 Aceros

El acero es quizá el material que más se utiliza en muchos elementos debido a sus propiedades de alta resistencia, rigidez, durabilidad y relativa facilidad para fabricarlo. En el mercado se dispone de muchos tipos de acero y su clasificación no es precisa.

El término *acero* se refiere a una aleación de hierro, carbono, manganeso y uno o más elementos significativos. El carbono surte un efecto considerable en la resistencia, dureza y ductilidad de cualquier acero con aleaciones. Los otros elementos afectan su capacidad de endurecimiento, su dureza, resistencia a la corrosión, maquinabilidad y conservación de la resistencia a altas temperaturas. Los elementos principales de aleación presentes en los distintos tipos de aceros con aleaciones son el azufre, fósforo, silicio, níquel, cromo, molibdeno y vanadio.

### 1.1.1 Estructuras Cristalinas

Los átomos y las moléculas son los elementos de construcción de la materia. Cuando los materiales en estado líquido se solidifican tienden a cerrar filas y a compactarse estrechamente, adoptando en muchos casos una estructura muy ordenada, y en otros no tan ordenada. Se pueden distinguir dos estructuras fundamentales de la materia: 1) cristalina y 2) no cristalina.

Cuando pasan del estado líquido o fundido al estado sólido, muchas sustancias forman cristales; ésta es virtualmente una característica de todos los metales, así como de muchos materiales cerámicos o polímeros. En una estructura cristalina, los átomos toman posiciones regulares recurrentes en tres dimensiones. El patrón puede repetirse millones de veces dentro de un cristal dado. La estructura puede visualizarse como una celda unitaria, la cual constituye el agrupamiento geométrico básico de los átomos que se repite indefinidamente.

### 1.1.2 Tipos de Estructuras Cristalinas

Son comunes tres estructuras de retículas cristalinas entre los metales: *cúbica centrada en el cuerpo (BCC)*, *cúbica centrada en la cara (FCC)* y *hexagonal compacta (HCP)* todas ellas ilustradas en la figura 1.1.2; las estructuras cristalinas de los metales comunes se presentan en la tabla 1.1.2. Debemos hacer notar que algunos metales sufren cambios de estructura a diferentes temperaturas; por ejemplo, el hierro es BCC a temperatura normal, pero cambia a FCC a temperaturas arriba de 1674 °F (912 °C) y vuelve a BCC a temperaturas superiores a los 2550 °F (1400 °C). Cuando un metal (u otro material) cambia su estructura de esta manera, se dice que es alotrópico.

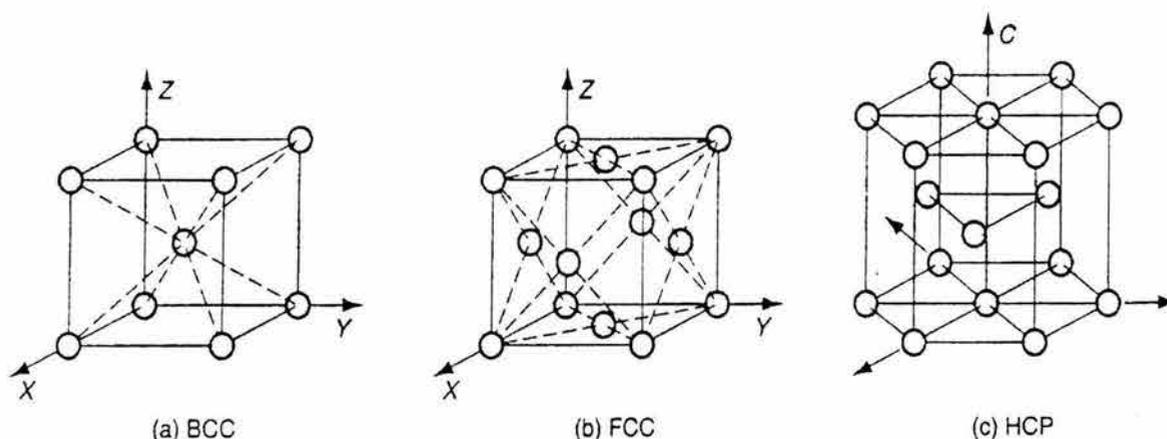


FIGURA 1.1.2 Tres tipos de estructuras cristalinas en metales: (a) cúbica centrada en el cuerpo, (b) cúbica centrada en la cara, y (c) hexagonal compacta.

### 1.1.3 Imperfecciones de los cristales

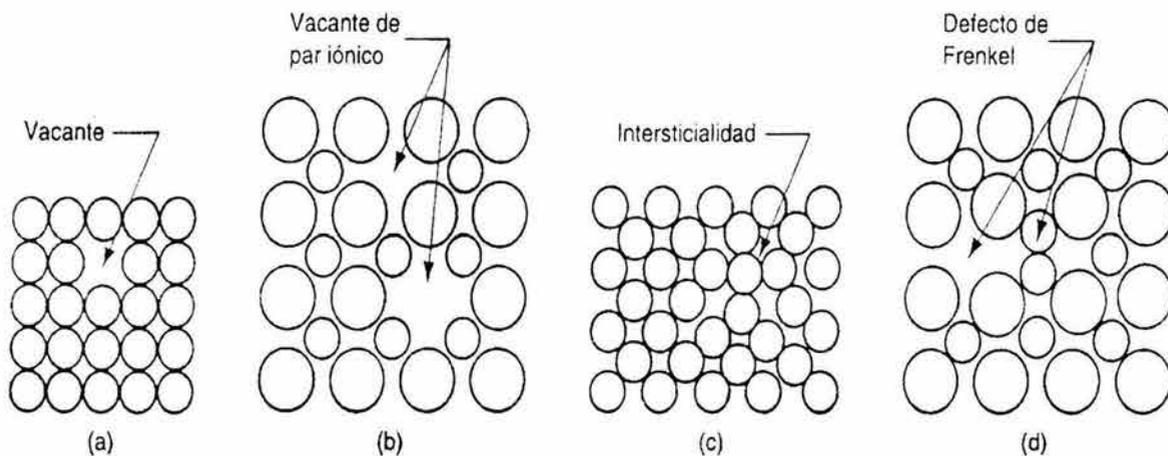
Existen varias razones por las que la estructura reticular de un cristal pueda no ser perfecta. Las imperfecciones surgen a menudo naturalmente, debido a la incapacidad del material que se solidifica para seguir reproduciendo indefinidamente sin interrupción su celda unitaria; los límites de grano en los metales son un ejemplo. En otros casos, las imperfecciones se introducen intencionalmente durante el proceso de manufactura, como es el caso de la adición de un elemento que ligue con el metal para aumentar su resistencia.

TABLA 1.1.2 Estructuras cristalinas de metales comunes (a temperatura ambiente).

Estructura	Metal
Cúbica centrada en el cuerpo (BCC)	Cromo (Cr)
	Hierro (Fe)
	Molibdeno (Mo)
	Tantalio (Ta)
	Tungsteno (W)
Cúbica centrada en la cara (FCC)	Aluminio (Al)
	Cobre (Cu)
	Oro (Au)
	Plomo (Pb)
	Plata (Ag)
	Níquel (Ni)
	Hexagonal compacta (HCP)
	Titanio (Ti)
	Zinc (Zn)

Las diversas imperfecciones en un sólido cristalino son llamadas también defectos. Ambos términos, *imperfecciones o defectos*, se refieren a desviaciones del patrón regular en la estructura reticular de un cristal. Se pueden catalogar como 1) defectos puntuales, 2) defectos lineales y 3) defectos superficiales.

Los *defectos puntuales* son imperfecciones en la estructura del cristal que involucran ya sea un átomo o varios átomos. Los defectos pueden tomar varias formas incluyendo, como lo demuestra la figura 1.1.3: (a) *vacante*, el defecto más simple causado por un átomo faltante dentro de la estructura reticular; (b) *vacante de par iónico*, también llamado *defecto de Schottky*, que consiste en la falta de un par de iones con carga opuesta en un compuesto que tiene un equilibrio total de carga; (c) *intersticialidad* o *intersticialidad*, una distorsión de la red producida por la presencia de un átomo extra en la estructura, y (d) *desplazamiento iónico*, conocido como el *defecto de Frenkel*, que ocurre cuando un ion es removido de su posición regular en la estructura de la red y se inserta en una posición intersticial no ocupada normalmente por dicho ion.



**FIGURA 1.1.3 Defectos puntuales (a) vacante, (b) vacante de par iónico, (c) intersticialidad, y (d) desplazamiento iónico.**

Un *defecto lineal* es un grupo de defectos puntuales conectados que forman una línea en la estructura de la red. El más importante defecto lineal es la *dislocación* que puede tomar dos formas: a) dislocación de borde y b) dislocación de tornillo. Una *dislocación de borde* es la orilla de un plano extra de átomos que existe en la celda, tal como se ilustra en la figura 1.1.3.1 (a). Una *dislocación de tornillo* [figura 1.1.3.1 (b)] es una espiral dentro de la estructura reticular que se enrosca alrededor de una imperfección lineal, de la misma manera que se enrosca un tornillo alrededor de su eje. Ambos tipos de dislocación pueden surgir en la estructura cristalina durante la solidificación (en fundición, por ejemplo), o se pueden iniciar durante un proceso de deformación (formado de metal, por ejemplo) ejecutado sobre el material sólido. Las dislocaciones son útiles para explicar ciertos aspectos del comportamiento mecánico de los metales.

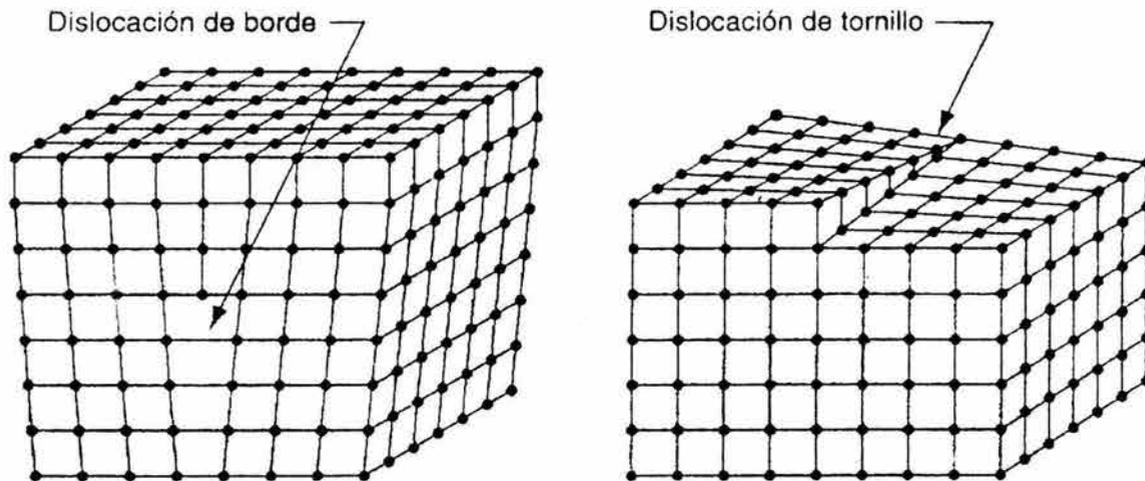


FIGURA 1.1.3.1 Defectos lineales: (a) dislocación de borde y (b) dislocación de tornillo.

Los *defectos superficiales* son imperfecciones que se extienden en dos dimensiones para formar un límite. El ejemplo más obvio de límite es la superficie externa que define la forma de un objeto cristalino. La superficie es una interrupción en la estructura reticular, los límites superficiales internos son los límites de grano.

#### 1.1.4 Sistemas de Designación

Tres organizaciones, el American Iron and Steel Institute, AISI (Instituto Estadounidense del Hierro y el Acero), la Society of Automotive Engineers, SAE (Sociedad Estadounidense de Ingenieros Automotrices) y la American Society for Testing and Materials, ASTM (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales), han desarrollado sistemas uniformes para designar los aceros que se emplean en aplicaciones estructurales y de maquinaria.

Para la mayor parte de los aceros al carbón y con aleaciones, los sistemas AISI y SAE utilizan designaciones de cuatro dígitos en las que los últimos dos dígitos indican la cantidad de carbono que contiene el acero, y los dos primeros señalan el grupo específico de la aleación, que identifica los elementos de aleación más importantes distintos al carbono. La figura 1.1.4 ilustra el sistema y la tabla 1.1.4 identifica los grupos de aleación.

#### 1.1.5 Importancia del carbono

Si bien la mayor parte de las aleaciones de acero contienen menos de 1.0% de carbono, se incluye en la designación debido a su efecto en las propiedades del acero. Como lo ilustra la figura 1.1.4, los últimos dos dígitos indican el contenido de carbono en centésimas de porcentaje. Por ejemplo, cuando los últimos dos dígitos son 20, la aleación incluye aproximadamente 0.20% de carbón. Es permisible cierta variación. El contenido de carbono en un acero con *20 puntos de carbono* varía entre 0.18% y 0.23%.

Conforme se incrementa el contenido de carbono, también aumentan la resistencia y la dureza bajo las mismas condiciones de procesamiento y tratamiento térmico. Como la ductilidad disminuye según aumenta el contenido de carbono, seleccionar un acero adecuado implica cierto compromiso entre resistencia y ductilidad.

Forma general de designación

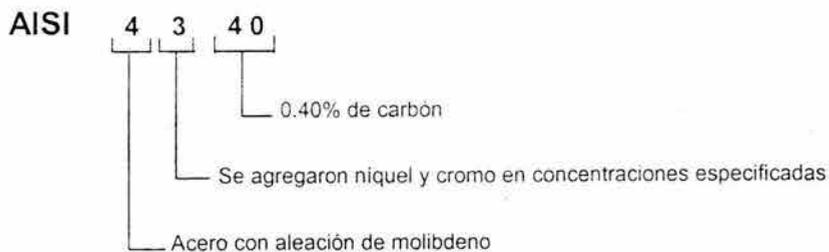
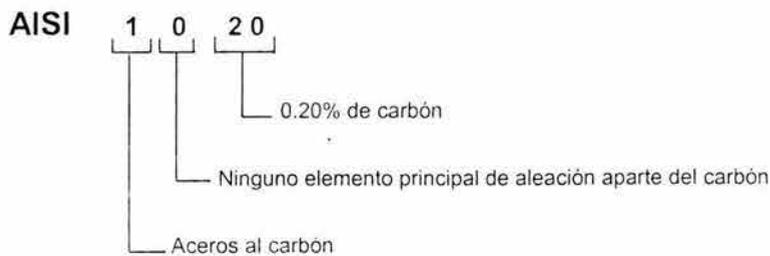
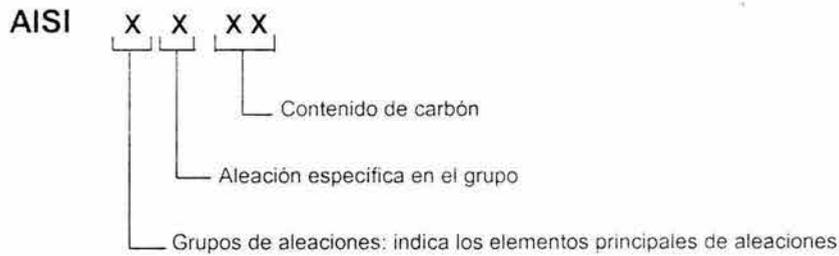


Figura 1.1.4 Sistema de designación del acero

Tabla 1.1.4 Grupos de aleaciones en el sistema de numeración AISI

10xx	Acero puro al carbón: sin elemento significativo de aleación excepto carbón y manganeso; menos de 1.0% de manganeso. También se le da el nombre de <i>no resulturizado</i> .
11xx	Acero para corte libre: resulturizado. El contenido de azufre (por lo regular 0.10%) mejora la maquinabilidad.
12xx	Acero para corte libre: resulturizado y refosforizado. La presencia de mayor cantidad de azufre y fósforo mejora la maquinabilidad y el acabado de la superficie.
12Lxx	Acero para corte libre: el plomo que se agrega al acero 12xx mejora la maquinabilidad.
13xx	Acero con manganeso: no resulturizado. La presencia de 1.75% de manganeso aproximadamente mejora la susceptibilidad a ser endurecido.
15xx	Acero al carbón: no resulturizado; más de 1.0% de manganeso.
23xx	Acero con níquel: nominalmente 3.5% de níquel.
25xx	Acero con níquel: nominalmente 5.0% de níquel.
31xx	Acero con níquel y cromo: nominalmente 1.25% de níquel (Ni); 0.65% de cromo (Cr).
33xx	Acero con níquel y cromo: nominalmente 3.5% de Ni; 1.5% de Cr.
40xx	Acero con molibdeno (Mo): 0.25% de Mo.
41xx	Acero con cromo y molibdeno: 0.95% de Cr; 0.2% de Mo.
43xx	Acero con níquel, cromo y molibdeno: 1.8% de Ni; 0.5% o 0.8% de Cr; 0.25% de Mo.
44xx	Acero con molibdeno: 0.5% de Mo.
46xx	Acero con níquel y molibdeno: 1.8% de Ni; 0.25% de Mo.
48xx	Acero con níquel y molibdeno: 3.5% de Ni; 0.25% de Mo.
5xxx	Acero con cromo: 0.4% de Cr.
51xx	Acero con cromo: nominalmente 0.8% de Cr.
51100	Acero con cromo: nominalmente 1.0% de Cr; el acero contiene 1.0% de carbón (C).
52100	Acero con cromo: nominalmente 1.45% de Cr; el acero contiene 1.0% de carbón (C).
61xx	Acero con cromo y vanadio (V): 0.50% a 1.10% de Cr; 0.15% de V.
86xx	Acero con níquel, cromo y molibdeno: 0.55% de Ni, 0.5% de Cr; 0.20% de Mo.
87xx	Acero con níquel, cromo y molibdeno: 0.55% de Ni, 0.5% de Cr; 0.25% de Mo.
92xx	Acero con silicio: 2.0% de silicio.
93xx	Acero con níquel, cromo y molibdeno: 3.25% de Ni, 1.2% de Cr; 0.12% de Mo.

Fuente: Associated Spring Barnes Group Inc., Engineering Guide to Spring Design. Bristol, Conn., 1987; Carlson, Harold, Spring Designer's Handbook. Nueva York: Marcel Dekker, 1978; Oberg E., et al. Machinery's Handbook, 23a edición. Nueva York: Industrial Press, 1988

En un esquema general de clasificación, un *acero bajo al carbón* es el que tiene menos de 30 puntos de carbono (0.30%). Estos aceros tienen relativamente poca resistencia pero buena capacidad para darles forma. En aplicaciones de elementos de maquinaria donde no se requiere una alta resistencia, a menudo se especifican los aceros bajos al carbón.

Si el desgaste representa un problema potencial, los aceros al bajo carbón se pueden carburizar para incrementar el contenido de carbono en la superficie externa del elemento y mejorar la combinación de propiedades.

Los *aceros al carbón medio* contienen de 30 a 50 puntos de carbono (0.30% a 0.50%). La mayor parte de los elementos de maquinaria que tienen especificaciones de resistencia entre alta y moderada con condiciones de ductilidad satisfactorias y especificaciones de dureza moderada provienen de este grupo.

Los *aceros al alto carbón* tienen entre 50 y 95 puntos de carbono (0.50% a 0.95%). El alto contenido de carbono proporciona mejores propiedades en cuanto a desgaste que son adecuadas para aplicaciones que requieren bordes cortantes durables y aquellas en las que las superficies se someten a desgaste constante. Cuchillos, navajas, formones o buriles y muchos componentes para implementos agrícolas se fabrican con alto contenido de carbono.

Nominalmente, un acero para cojinetes contiene 1.0% de carbono. Los grados comunes son 50100, 51100 y 52100; la designación común de cuatro dígitos se sustituye por cinco dígitos, lo cual indica 100 puntos de carbono.

### **1.1.6 Grupos de aleaciones**

Como se indica en la tabla 1.1.4, el azufre, el fósforo y el plomo mejoran la maquinabilidad de los aceros y se añaden en cantidades significativas a los grados 11xx, 12xx y 12Lxx. Estos grados se emplean para tornillos de partes de maquinaria que requieren de altas tasas de producción donde las partes resultantes no son sometidas a condiciones de mucha tensión o desgaste. En las otras aleaciones, estos elementos se controlan a un nivel muy bajo debido a sus efectos adversos, como una mayor fragilidad.

El níquel mejora la fortaleza, la capacidad de endurecimiento y la resistencia a la corrosión del acero y se incluye en la mayor parte de los aceros con aleaciones. El cromo mejora la capacidad de endurecimiento, la resistencia al desgaste y las raspaduras y a las temperaturas elevadas. En altas concentraciones, el cromo proporciona una resistencia significativa a la corrosión. El molibdeno, a su vez, mejora la capacidad de endurecimiento y la resistencia a altas temperaturas.

La tabla 1.1.6, presenta una lista de algunos aceros comunes y de sus aplicaciones típicas.

El acero que se selecciona para una aplicación particular debe ser económico y proporcionar propiedades óptimas en relación a resistencia, ductilidad, fortaleza, maquinabilidad y capacidad para darle forma.

Tabla 1.1.6 Uso de algunos aceros

Número AISI	Aplicaciones
1015	Partes de metal laminado; partes maquinadas (pueden ser carburizadas)
1030	Partes en forma de barra para uso general, palancas o manijas, eslabones o uniones, cuñas de unión.
1045	Flechas o ejes, engranes
1080	Piezas para equipo agrícola (rejas, discos, dientes de rastrillos, dientes de podadoras de césped) que se someten a fricción; resortes.
1112	Piezas de tornillos para máquinas.
4140	Engranes, flechas o ejes, piezas forjadas.
4340	Engranes o ejes, piezas que requieren de un buen endurecimiento directo.
4640	Engranes, flechas o ejes, levas.
5150	Flechas o ejes para trabajo pesado, resortes, engranes.
52100	Pistas de rodamiento, bolas y baleros (acero para cojinetes).
6150	Engranes, piezas forjadas, flechas o ejes, resortes.
8650	Engranes, flechas o ejes.
9260	Resortes

Fuente: Associated Spring Barnes Group Inc., Engineering Guide to Spring Design. Bristol, Conn., 1987. Carlson, Harold. Spring Designers Handbook. Nueva York: Marcel Dekker, 1978; Oberg E., et al. Machinery's Handbook, 23a edición. Nueva York: Industrial Press, 1988

## 1.2 Tratamientos Térmicos

### 1.2.1 El Sistema Hierro-Carbono

Los aceros, las aleaciones ferrosas, los hierros y los aceros fundidos se utilizan ampliamente en función de sus propiedades versátiles y su bajo costo. Los aceros y los hierros fundidos están representados por el sistema binario hierro-carbono. El hierro comercialmente puro contiene hasta 0.008% de carbono, los aceros hasta 2.11% de carbono, y los hierros fundidos hasta 6.67% de carbono, aunque la mayor parte de los hierros fundidos contienen menos de 4.5% de carbono.

El **diagrama de fases del hierro-carburo de hierro** se muestra en la fig. 1.2.1. Aunque este diagrama puede extenderse hacia la derecha, hasta 100% de carbono (grafito puro), el rango que es significativo para aplicaciones de ingeniería es hasta 6.67% de carbono dado que el  $Fe_3C$  es una fase estable.

El hierro puro se funde a una temperatura de 1538 °C (2798 °F) como se muestra por la frontera izquierda de la fig. 4.8. Conforme el hierro se enfría, primero forma ferrita delta, después austenita, y finalmente ferrita alfa.

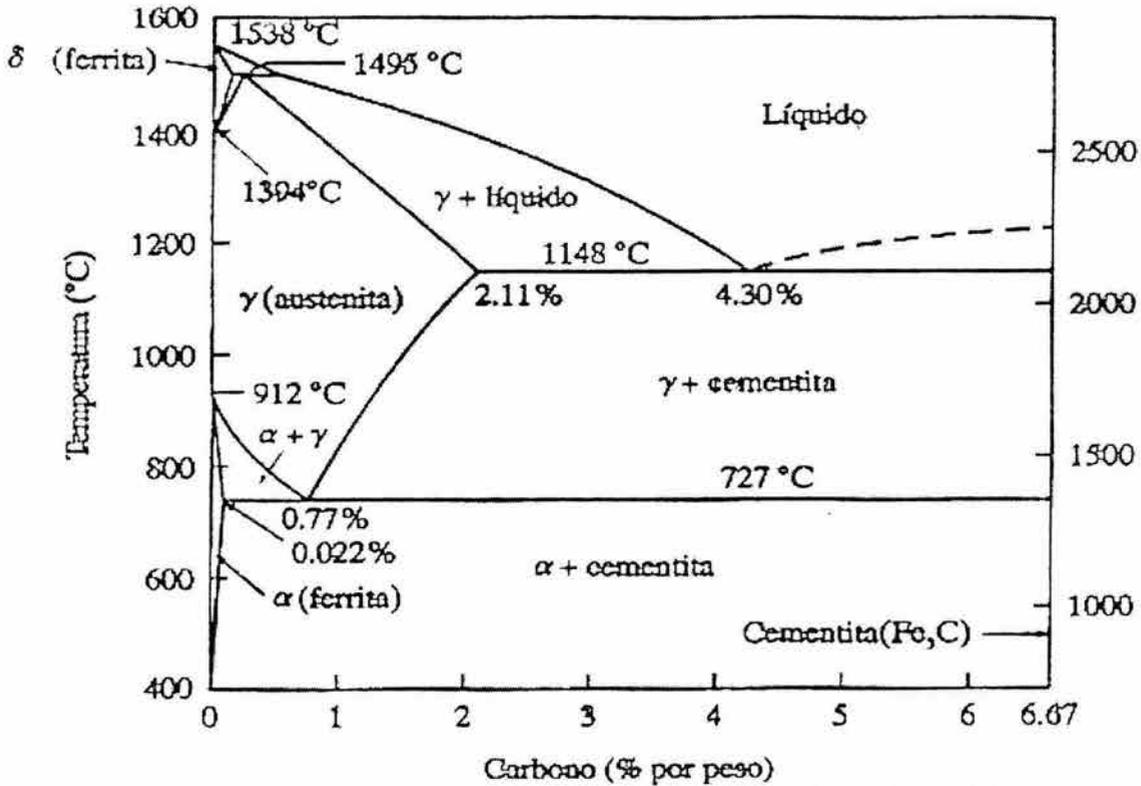


FIGURA 1.2.1 El diagrama de fases hierro-carburo de hierro. Dada importancia del acero como material de ingeniería, este diagrama es uno de los diagramas de fases más importantes.

♦ **Ferrita**

La **ferrita alfa**, o simplemente **ferrita**, es una solución sólida de hierro cúbico centrado en el cuerpo; tiene una solubilidad sólida máxima de 0.022% de carbono a una temperatura de 727 °C (1341 °F). La ferrita delta es estable únicamente a temperaturas muy elevadas y no tiene un significado práctico en ingeniería.

La ferrita es relativamente blanda y dúctil, es magnética desde la temperatura ambiente hasta 768 °C (1414 °F). Aunque en el hierro (*bcc*) sólo se puede disolver muy poca cantidad de carbono de manera intersticial, la cantidad de carbono puede afectar de manera significativa las propiedades mecánicas de la ferrita. Además, el hierro puede contener cantidades importantes de cromo, manganeso, níquel, molibdeno, tungsteno y silicio en soluciones sólidas, que le imparten propiedades deseables.

◆ **Austenita**

Entre 1394 °C (2541 °F) y 912 °C (1674 °F), el hierro sufre una **transformación polimorfa**, de una estructura *bcc* a una estructura *fcc*, convirtiéndose en lo que se conoce como *hierro gama* o, de manera más común, en **austenita** (según W. R. Austen, 843-1902). Esta estructura tiene una solubilidad sólida de hasta 2.11% de carbono a 1148 °C (2098 °F).

Gracias a que la estructura *fcc* tiene más posiciones intersticiales, la solubilidad sólida de la austenita tiene dos órdenes de magnitud más elevados que la ferrita, ocupando el carbono las posiciones intersticiales (fig. 1.2.1.1a).

La austenita es una fase importante en el tratamiento térmico de los aceros. Es más densa que la ferrita, y su estructura *fcc* monofásica es dúctil a temperaturas elevadas; en consecuencia, posee buena formabilidad.

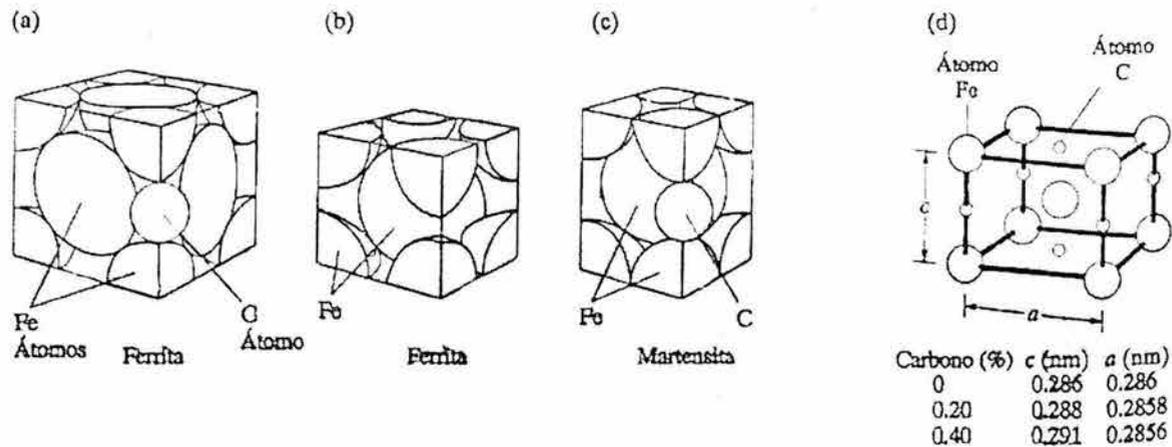


FIGURA 1.2.1.1 Celdas unitarias para (a) austenita, (b) ferrita y (c) martensita. En (d) se muestra el efecto del porcentaje de carbono (por peso) en las dimensiones de la red de martensita. Note la posición intersticial de los átomos de carbono. Observe también, el aumento en la dimensión *c* con un mayor contenido de carbono; este efecto hace que la celda unitaria de la martensita tenga la forma de un prisma rectangular.

También, para impartir varias propiedades, se pueden disolver grandes cantidades de níquel y manganeso en el hierro *fcc*. El acero es no magnético en su forma austenítica, ya sea a elevadas temperaturas o, para los aceros inoxidables austeníticos, a temperatura ambiente.

◆ **Cementita**

La frontera derecha de la fig. 1.2.1 representa la **cementita**, que es 100% carburo de hierro ( $Fe_3C$ ), con un contenido de carbono de 6.67%. La cementita, del latín *cementum* (que significa "astillas de piedra") también se conoce como **carburo**.

Este carburo no debe ser confundido con otros carburos que se utilizan en dados, herramientas de corte y abrasivos, como el carburo de tungsteno, el carburo de titanio y el carburo de silicio.

La cementita es un compuesto intermetálico muy duro y frágil y tiene una influencia significativa en las propiedades de los aceros. Puede incluir otros elementos de aleación como el cromo, el molibdeno y el manganeso.

### 1.2.2 Tratamiento Térmico de las Aleaciones Ferrosas

Las varias microestructuras que se han descrito hasta ahora se pueden modificar mediante técnicas de **tratamiento térmico**, esto es, mediante el calentamiento y enfriamiento controlado de las aleaciones a diversas velocidades. Estos tratamientos inducen **transformaciones de fase** que influyen de manera importante propiedades mecánicas como la resistencia mecánica, dureza, ductilidad, tenacidad y resistencia al desgaste de aleaciones.

Los efectos del tratamiento térmico dependen de la aleación, de su composición y microestructura, del grado de trabajo en frío anterior, y de las velocidades de calentamiento y enfriamiento durante el tratamiento térmico.

Los procesos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano son ejemplos de tratamiento térmico, involucrando cambios en la estructura del grano de la aleación. Debido a su significado tecnológico, las estructuras que se consideran son la perlita, la esferoidita, la bainita, la martensita y la martensita revenida.

#### ◆ **Perlita**

Si la ferrita y las láminas de cementita en la estructura de perlita del acero eutectoide son delgadas y empacadas de manera compacta, la microestructura se conoce como **perlita fina**. Si son gruesas y muy espaciadas se conoce como **perlita gruesa**. Si la velocidad de enfriamiento es relativamente elevada, como en el aire, se produce perlita fina, si el enfriamiento es lento, como se haría en un horno, se produce perlita gruesa.

La transformación de austenita a perlita queda mejor ilustrada en las figs. 1.2.2 b y c. Estos diagramas se conocen como **diagramas de transformación isotérmica**, o *diagramas de tiempo temperatura (TTT)*. Se elaboran a partir de los datos dados en la fig. 1.2.2 a, que muestra el porcentaje de austenita que se transforma en perlita como función de la temperatura y del tiempo. Mientras más elevada sea la temperatura o más largo sea el tiempo, mayor será el porcentaje de austenita transformado en perlita.

Para cada temperatura existe un tiempo mínimo para que se inicie la transformación.

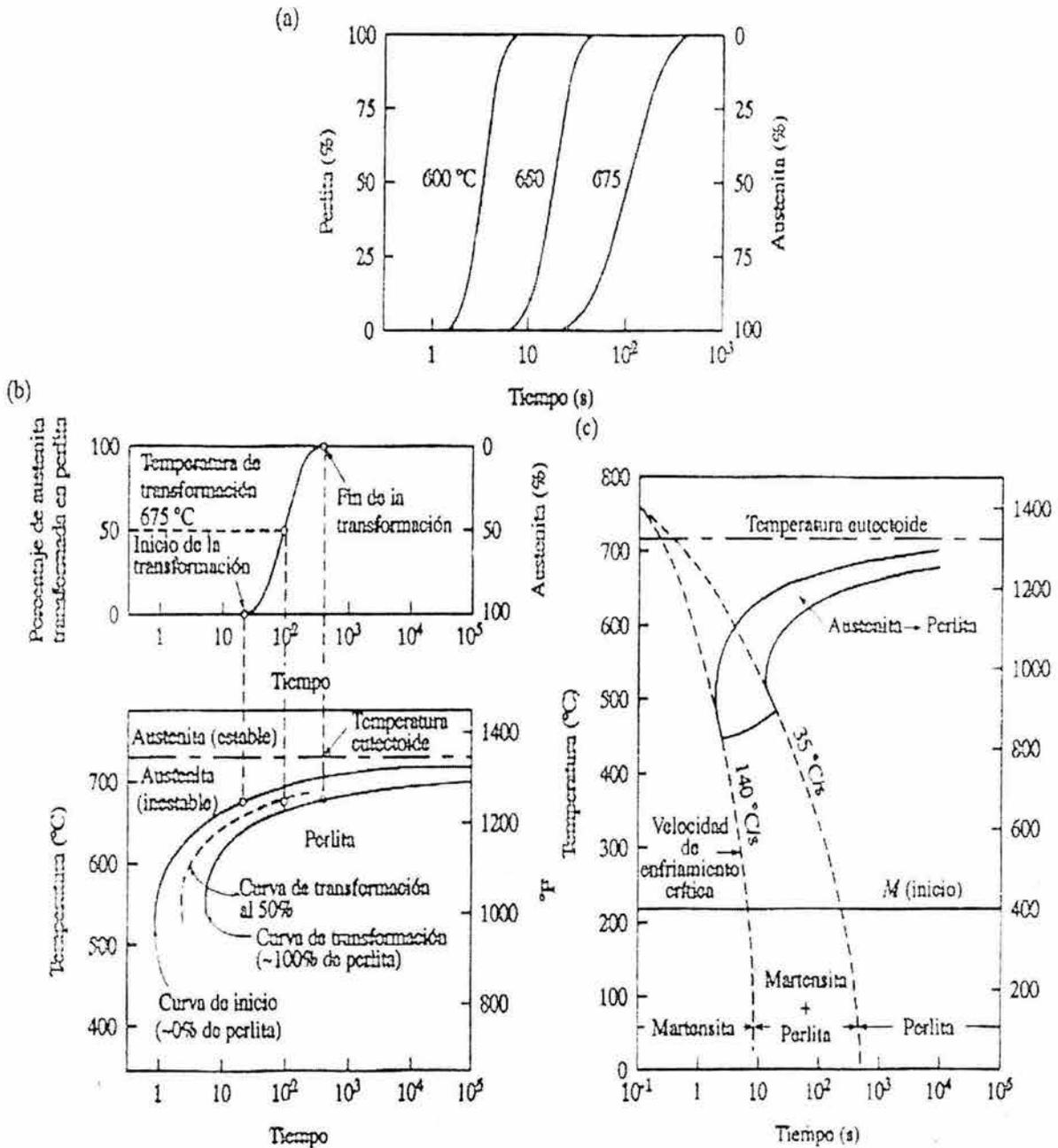


FIGURA 1.2.2 (a) Transformación de la austenita a perlita de la aleación hierro-carbono como una función del tiempo y la temperatura. (b) Diagrama de transformación isotérmica obtenido de (a) para una temperatura de transformación de 675 °C (1247 °F). (c) Microestructuras obtenidas de una aleación de hierro carbono eutectoide, como una función de la velocidad de enfriamiento. Fuente: ASM Internacional.

Este periodo define la velocidad crítica de enfriamiento; con tiempos más largos, la austenita se empieza a transformar en perlita. Esta transformación se puede trazar en las figs. 1.2.2 b y c.

Las diferencias en dureza y tenacidad de las diversas estructuras obtenidas se muestran en la fig. 1.2.2.1.

La perlita fina es más dura y menos dúctil que la perlita gruesa. Los efectos correspondientes a los varios porcentajes de carbono, cementita y perlita en otras propiedades mecánicas de los aceros aparecen en la fig. 1.2.2.2.

♦ **Esferooidita**

Cuando la perlita se calienta justo por debajo de la temperatura eutectoide y entonces se mantiene dicha temperatura durante un cierto periodo de tiempo, como por ejemplo, un día a 700 °C (1300 °F), las láminas de cementita se transforman a formas aproximadamente *esféricas* (fig. 1.2.2.3). A diferencia de las laminillas de cementita, que actúan como elevadores de esfuerzo, las **esferoiditos** (partículas esféricas), en razón a su forma redondeada, son menos propensas a concentraciones de esfuerzo.

En consecuencia, esta estructura tiene una tenacidad más elevada y una dureza menor que la estructura de la perlita. De esta forma, puede trabajarse en frío, dado que la ferrita dúctil tiene una elevada tenacidad, y las partículas de carburo esferoidal impiden la iniciación de grietas dentro del material.

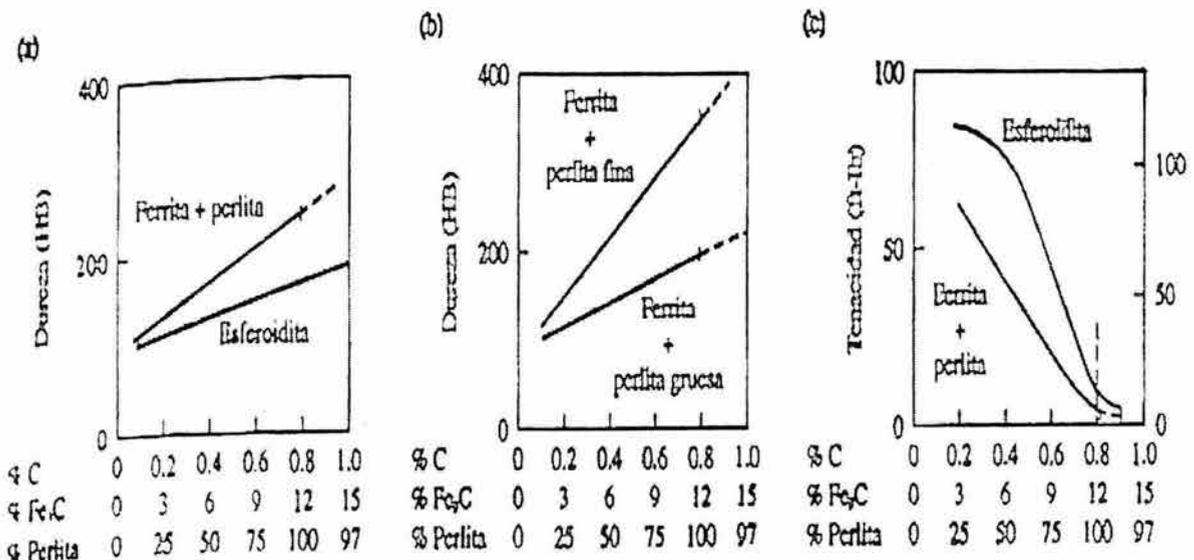


FIGURA 1.2.2.1 (a) y (b) dureza y (c) tenacidad para los aceros al carbono recocidos, como una función de la fórmula de carburo. Los carburos en la perlita son laminares. La perlita fina se obtiene incrementando la velocidad de enfriamiento. La estructura esferoidito tiene partículas de carburo en forma de esferas. Note que el porcentaje de perlita empieza a reducirse después de 0.77% de carbono. Fuente: L.H. Van Vlack; Materials for Engineering. Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1982.

### ◆ Bainita

Visible únicamente a través del microscopio electrónico, la **bainita** es una microestructura muy fina, consistiendo de ferrita y cementita, algo parecido a la perlita, pero con una morfología diferente. Se puede producir en aceros con elementos aleantes y a velocidades de enfriamiento más elevadas que aquellas requeridas para la transformación en perlita. Esta estructura, conocida como **acero bainítico** (según E. C. Bain, 1891-1971), es por lo general más resistente y más dúctil que los aceros perlíticos en el mismo nivel de dureza.

En consecuencia, esta estructura tiene una tenacidad más elevada y una dureza menor que la estructura de la perlita.

De esta forma, puede trabajarse en frío, dado que la ferrita dúctil tiene una elevada tenacidad, y las partículas de carburo esferoidal impiden la iniciación de grietas dentro del material.

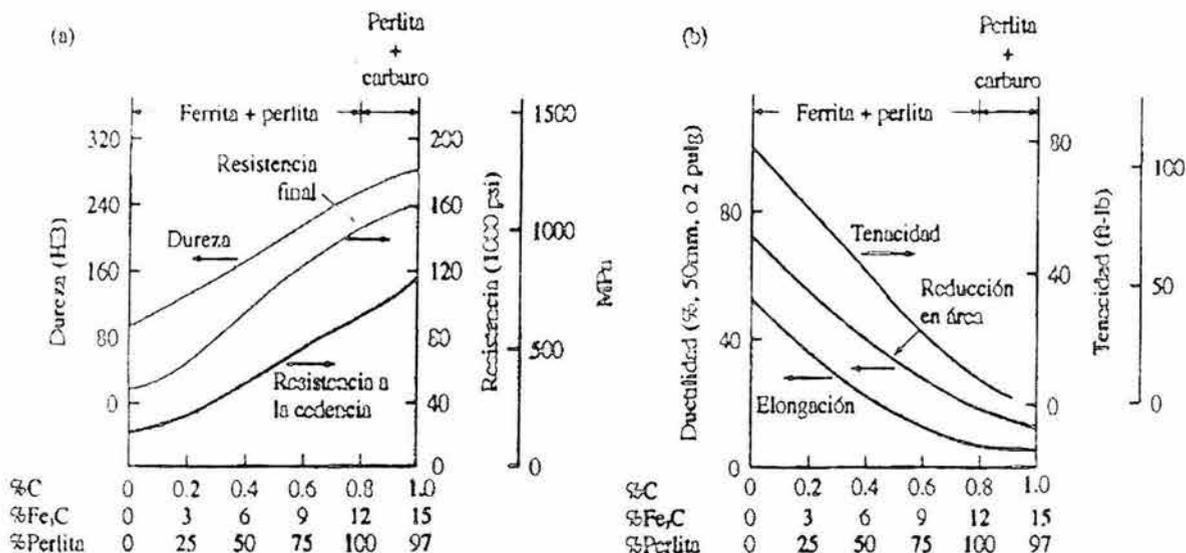


FIGURA 1.2.2.2 Propiedades mecánicas de los aceros recocidos, como una función de la composición y de la microestructura. Obsérvese en (a) el incremento en dureza y en resistencia, y en (b) la reducción en ductilidad y en tenacidad, con cantidades crecientes de perlita y de carburo de hierro. Fuente: L.H. Van Vlack; Materials for Engineering, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1982.

### ◆ Martensita

Cuando la austenita es enfriada a una velocidad elevada, como el enfriado en agua, su estructura *fcc* se transforma en una estructura **tetragonal centrada en el cuerpo** (*bct*). Esta estructura se puede describir como un prisma rectangular centrado en el cuerpo, que está ligeramente alargado a lo largo de uno de sus ejes principales (fig. 1.2.1.1d). Esta microestructura se conoce como **martensita** (según A. Martens, 1850-1914).

Dado que la martensita no tiene tantos sistemas de deslizamiento como una estructura *bcc* (y el carbono está en posiciones intersticiales), es extremadamente duro y frágil (fig. 1.2.2.4); carece de tenacidad, y por tanto, tiene un uso limitado.

La transformación martensítica ocurre casi de manera instantánea (fig. 1.2.2) ya que involucra no un proceso de difusión sino un mecanismo de deslizamiento (deformación plástica), un fenómeno dependiente del tiempo, que es el mecanismo que también ocurre en otras transformaciones.

El material sufre cambios en el volumen dadas las diferencias en densidades que resultan de las transformaciones de fase.

Por ejemplo, cuando la austenita se transforma en martensita, su volumen más pequeña, pero similar, cuando la austenita se transforma en perlita.

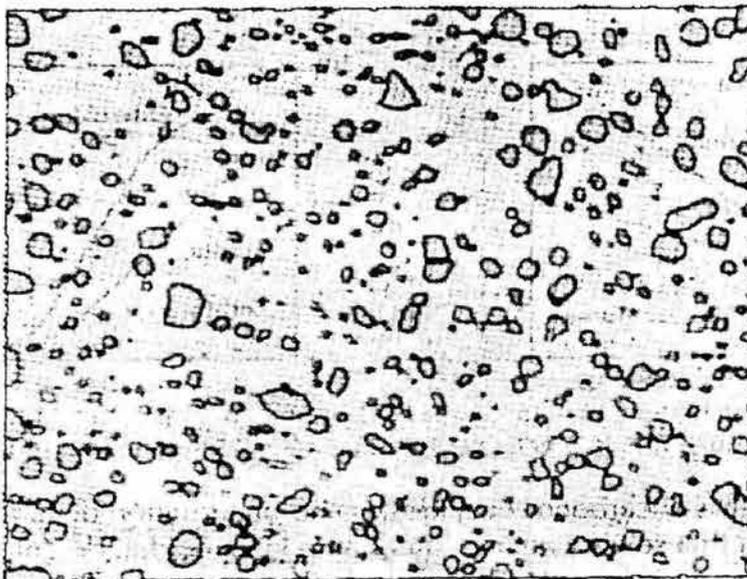


FIGURA 1.2.2.3 Microestructura del acero eutectoide. Se forma la esferoidita al reventar el acero a 700 °C (1292 °F). Ampliación: 1000X. Fuente: Cortesía de USX Corporation.

Estas expansiones, y los gradientes térmicos presentes en una pieza enfriada, generan esfuerzos internos dentro del cuerpo. Pueden hacer que durante el tratamiento térmico las piezas sufran *distorsiones* o incluso se agrieten; el **agrietamiento por temple** de los aceros es causado por un enfriamiento rápido durante el templado.

#### ♦ *Martensita revenida*

Se reviene la martensita a fin de mejorar sus propiedades mecánicas. El **revenido** es un proceso de calentamiento mediante el cual se reduce la dureza y se mejora la tenacidad.

La martensita tetragonal centrada en el cuerpo se calienta a una temperatura intermedia, típicamente 150 °C - 650 °C (300 °F - 1200 °F) donde se descompone en una microestructura de dos fases formada por ferrita alfa cúbica centrada en el cuerpo y pequeñas partículas de cementita.

Con un incremento en el tiempo de revenido y de la temperatura, la dureza de la martensita revenida se reduce (fig. 1.2.2.5). La razón es que las partículas de cementita se unen y crecen, y la distancia entre las partículas en la matriz de ferrita blanda se incrementa conforme las partículas menos estables y más pequeñas de carburo se disuelven.

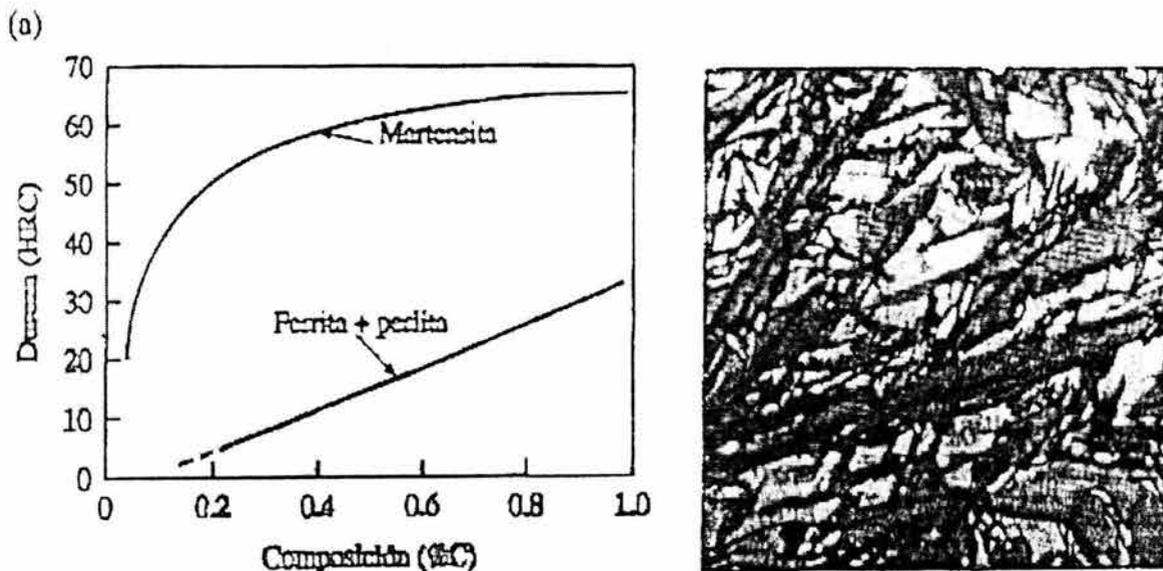


FIGURA 1.2.2.4 (a) Dureza de la martensita, como una función del contenido de carbono. (b) Micrografía de la martensita conteniendo 0.8% de carbono. Las regiones de forma de placa de color gris son martensita; tiene la misma composición que la austenita original (regiones blancas). Ampliación: 1000X. Fuente: cortesía de USX Corporation.

### 1.2.3 Concepto de Tratamiento Térmico

*Tratamiento térmico* es el proceso en el que el acero se somete a la acción de temperaturas elevadas para modificar sus propiedades.

El tratamiento térmico, en su acepción más generalizada, significa la aplicación de calor, bien sea para hacer el metal más maquinable, transformándolo en más blando, o más dúctil, o para conseguir ciertos cambios deseados (y benéficos) en constitución y propiedades físicas, generalmente no unidos a trabajos de índole mecánica. Sin embargo, el uso corriente ha dejado restringida la denominación a la última aplicación exclusivamente.

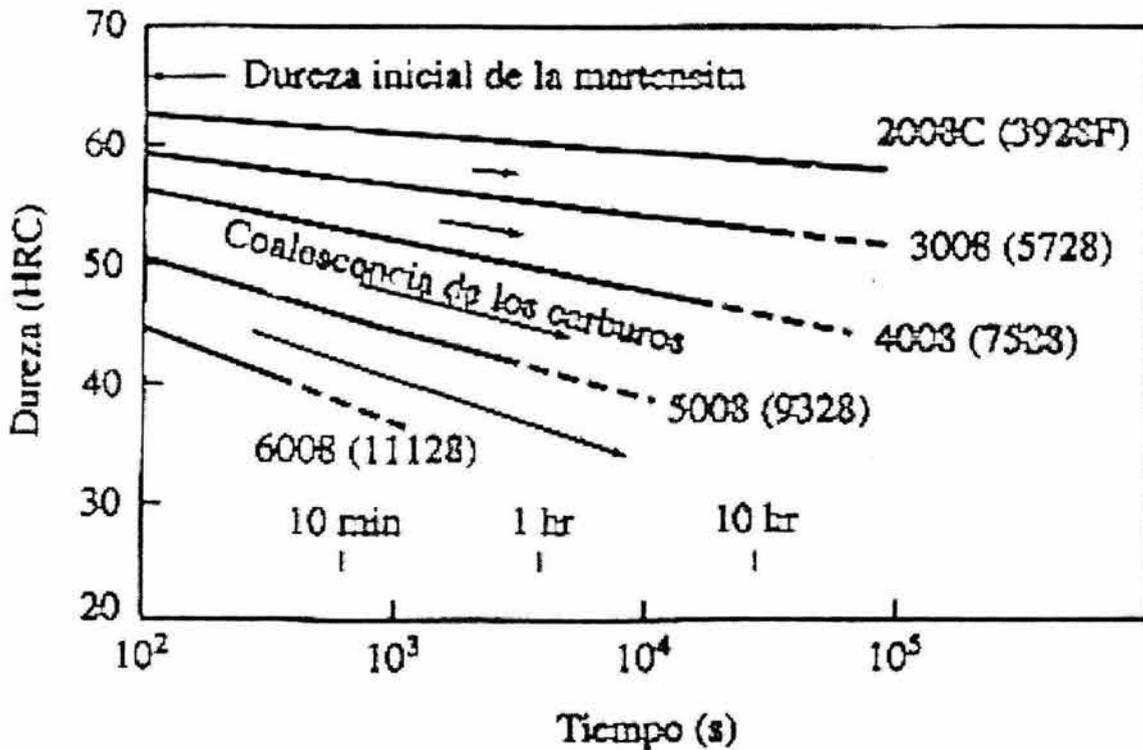


FIGURA 1.2.2.5 Dureza de la martensita, como una función del tiempo de templado, para acero 1080 enfriado a 65 HRC. La dureza se reduce, porque las partículas de carburo se unen y crecen en tamaño, incrementando por tanto la distancia interpartícula de la ferrita más blanda.

La denominación <<Tratamiento térmico>> se emplea con frecuencia, aunque indebidamente, en el sentido restringido de temple seguido de calentamiento, como se efectúa en los ejes, etc.; cuando se emplea así no se considera que corresponde a recocido o cualquier otro tratamiento designado adecuadamente con esta denominación.

El tratamiento térmico, es un fenómeno reversible, se verifica en los dos sentidos, y, por consiguiente, si no se emplea con conocimiento de causa o si no se tienen en cuenta su existencia y consecuencias, cuando se calienta el material con el fin de trabajarlo, puede dar lugar a efectos engañosos o incluso perjudiciales.

Debe tenerse en cuenta que el tratamiento térmico actúa como un intensificador del desarrollo de las propiedades del acero, de modo semejante al del revelado de una placa fotográfica; si la calidad inicial del material es buena, puede mejorarse mucho éste, pero si es mala, el estado final obtenido será probablemente inferior al de antes del tratamiento, aunque en algunos casos, si se conoce la deficiente calidad, se pueden tomar precauciones que corrijan esta y que efectúen una cura parcial, aunque rara vez completa.

El que resulte benéfico o perjudicial depende también del grado, la velocidad y sobre todo la uniformidad del calentamiento y del enfriamiento. Nunca se encarecerá bastante esa cuestión de la uniformidad; puede significar que la misma clase de material, tratado del mismo modo, tenga las mismas propiedades; estos tres puntos cardinales pueden resumirse como sigue:

#### **A) Uniformidad del material**

- a) El mismo material; composición entre los límites especificados.
- b) Homogeneidad del material; ausencia de defectos químicos representados por una segregación perjudicial; inclusiones de sustancias extrañas, etc.; ausencia de defectos físicos, tales como el rechupe, cavidades, tensiones perjudiciales o intensas que, en un caso extremo, pueden dar lugar a grietas.

#### **B) Uniformidad de tratamiento**

- a) Instalación adecuada que incluya hornos, baños de temple y pirómetros; la capacidad de estos elementos ha de ser amplia, de modo que no esté sobrecargada al tener que tratar una producción dada.
- b) El calentamiento y el enfriamiento deben ser regulados de modo que cada pieza, desde un extremo a otro y en toda su sección desde la periferia al centro, así como todas las piezas tratadas conjuntamente en un mismo lote, tengan, en lo posible, la misma temperatura en todas las ocasiones.

#### **C) Uniformidad de resultados**

Si las otras dos condiciones se han cumplido, ésta se sigue necesariamente. Se deben, sin embargo, prever los medios para comprobar constantemente los resultados, con el fin de que cualquier error o falta de cuidado se pueda descubrir y corregir prontamente.

El tratamiento térmico afecta las propiedades físicas y mecánicas de dos modos distintos, regulando: a) los constituyentes, y b) el tamaño del grano. El efecto que un cierto tratamiento producirá varía considerablemente con la composición química; a este respecto, el carbono es el elemento predominante y principal; pero otros elementos como el manganeso, el cromo, el tungsteno, etc., también ejercen una considerable influencia.

De los distintos procesos disponibles, aquellos que más se emplean en aceros son el recocido, la normalización, el endurecimiento directo (enfriamiento por inmersión y temple) y el endurecimiento superficial.

### ◆ **Recocido**

El *recocido total* [figura 1.2.3 (a)] se lleva a cabo calentando el acero por arriba de su temperatura crítica superior y conservándolo así hasta que la composición es uniforme. Después, el acero se calienta muy despacio en el horno hasta alcanzar una temperatura por debajo de la crítica mínima o inferior. El proceso se completa con el enfriado lento a temperatura ambiente fuera del horno. Este tratamiento da por resultado una forma blanda, poco resistente del material, libre de tensiones significativas a nivel interno. A menudo, las partes se maquinan o se les da forma en frío en la condición de recocido.

El *recocido para aliviar tensiones* [figura 1.2.3 (b)] se utiliza con frecuencia después de soldar, maquinar o dar forma en frío para mitigar las tensiones residuales y minimizar así distorsiones subsecuentes. El acero se calienta entre 1,000 °F y 1,200 °F (540 a 650 °C), estas temperaturas se mantienen para lograr uniformidad; después se enfría lentamente al aire libre y temperatura ambiente.

### ◆ **Normalización**

La *normalización* [figura 1.2.3 (c)] se realiza en forma similar al recocido, pero a mayor temperatura, por arriba del rango de transformación en el que se forma la austenita, 1,600 °F (870 °C) aproximadamente.

El resultado es una estructura interna en el acero y, en alguna medida, mayor resistencia que lo que produce el recocido. La maquinabilidad y la fortaleza por lo regular se mejoran a lo largo de la condición en que se roló.

### ◆ **Endurecimiento directo – enfriamiento por inmersión y temple**

El *endurecimiento directo* [figura 1.2.3 (d)] se logra calentando el acero por arriba del rango de transformación en el cual se forma austenita y después se enfría con rapidez en un medio de *inmersión*.

El enfriamiento rápido provoca que se forme martensita, una forma dura y resistente del acero. El grado en que se forma martensita depende de la composición de la aleación. Una aleación que contiene un 80% de su estructura en la forma de martensita a lo largo de toda su sección transversal tiene una *alta capacidad de endurecimiento*. Esta es una propiedad importante que se debe buscar cuando se seleccione un acero que requiera gran resistencia y dureza. Los medios de inmersión comunes son agua, salmuera, y aceites minerales especiales. La elección de un medio de inmersión depende de la velocidad a la que debe proceder el proceso de enfriamiento. En la mayor parte de los aceros para maquinaria se utiliza inmersión en aceite o en agua indistintamente.

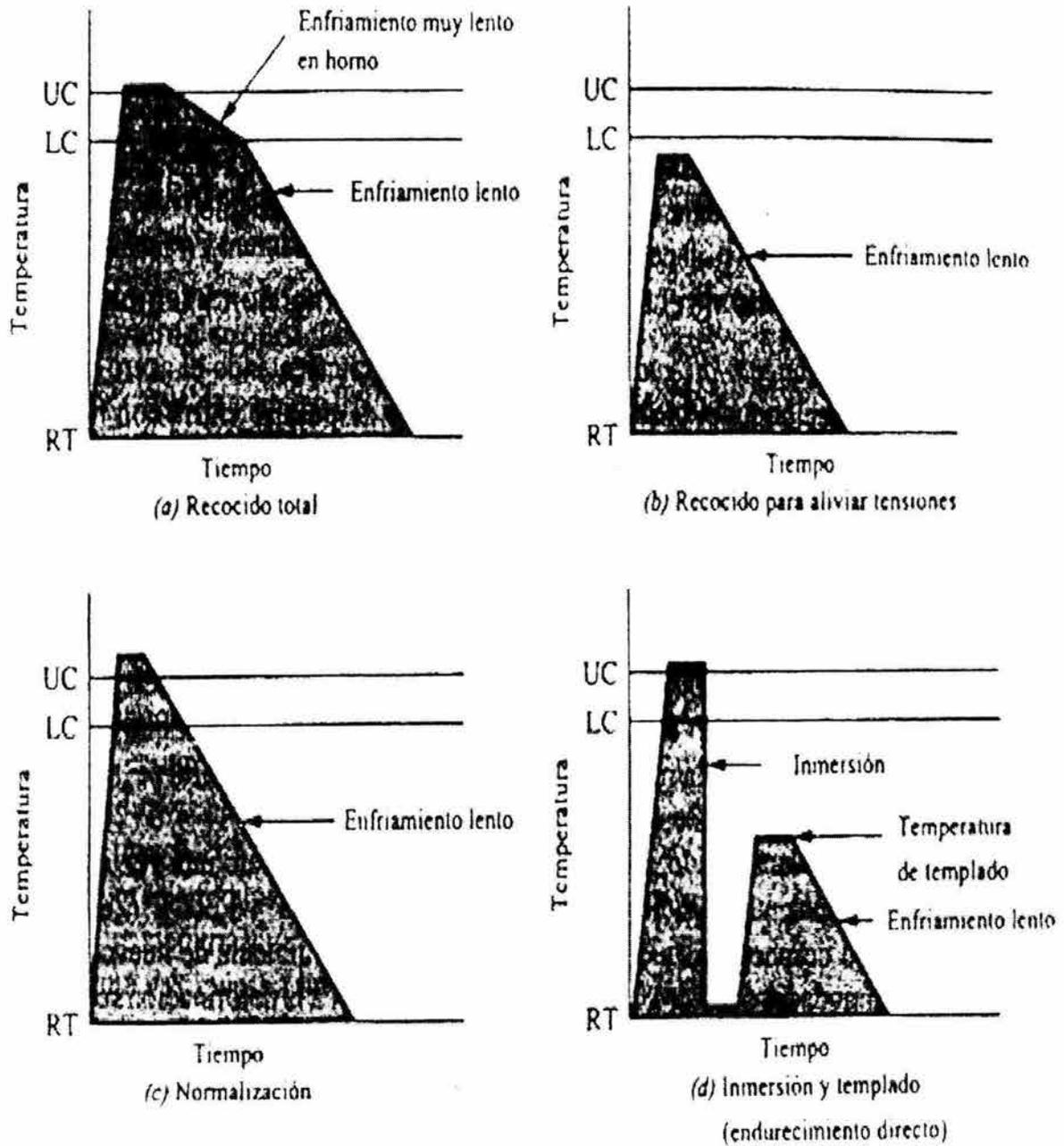


FIGURA 1.2.3 Tratamientos térmicos para acero.

El *templado* por lo general se lleva a cabo de inmediato una vez concluida la inmersión e implica recalentar el acero a una temperatura de entre 400° y 1,300 °F (200 a 700 °C) para después enfriarlo despacio hasta que alcance la temperatura ambiente de nuevo.

Este proceso modifica las propiedades del acero: la resistencia a la tracción y a la deformación se incrementan en función de la temperatura de templado, en tanto se mejora la ductilidad, como lo indica un incremento en la elongación porcentual. Por tanto, el responsable del diseño estará en posibilidad de adaptar las propiedades del acero para satisfacer especificaciones particulares. Es más, el acero en la condición en que se hace la inmersión tiene tensiones internas considerables y por lo general es muy quebradizo o frágil. Por lo regular, las partes para maquinaria debe templarse a 700 °F (370 °C) o más después de la inmersión.

#### ◆ **Revenido**

Es un tratamiento térmico que se aplica en los aceros endurecidos para reducir su fragilidad, incrementar su ductilidad y tenacidad y aliviar los esfuerzos en la estructura de la martensita. El tratamiento implica calentamiento y mantenimiento de ésta por debajo de la eutectoide durante aproximadamente una hora, seguido de un enfriamiento lento, ya sea en agua o aceite.

### **1.3 Dureza**

La dureza es una propiedad usada comúnmente; da una indicación general de la resistencia del material y de su resistencia al rayado y al desgaste. De manera más específica, la **dureza** por lo general se especifica como la *resistencia a la indentación o impresión permanente*. Por lo que, por ejemplo, el acero es más duro que el aluminio, y el aluminio es más duro que el plomo.

La dureza no es, sin embargo, una propiedad *fundamental*, dado que la resistencia a la indentación depende de la forma del indentador y de la carga aplicada. Se han desarrollado varios métodos para medir la dureza, utilizando diferentes materiales y formas para el indentador. Los ensayos comunes de dureza se describen a continuación.

#### **1.3.1 Ensayo Brinell**

Introducido por J. A. Brinell en 1900, este ensayo involucra la compresión de una bola de acero de carburo de tungsteno, de un diámetro de 10 mm (0.4 pulg), contra una superficie, con una carga de 500 kilos, 1500 kilos o 3000 kilos (fig. 1.3.1). El número de dureza Brinell (HB) se define como la relación de la carga  $P$  al área de superficie curvada de la indentación o impresión. Mientras más duro sea el material que se va a ensayar, menor será la impresión, por lo que en general se recomienda una carga de 1500 o de 3000 kg a fin de obtener impresiones lo suficientemente grandes para lograr una medición precisa.

Dependiendo del estado del material, se desarrollan uno o dos tipos de impresiones en la superficie después de realizar un ensayo Brinell (fig. 1.3.2) o de cualesquiera otros ensayos de dureza.

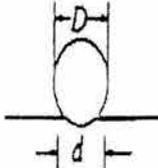
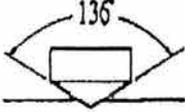
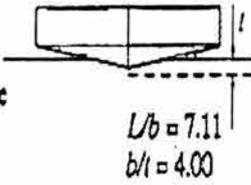
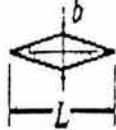
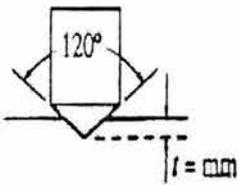
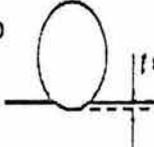
Ensayo	Indentador	Forma de la indentación		Carga, P	Número de dureza	
		Vista lateral	Vista superior			
Brinell	Bola de acero de 10 milímetros o de carburo de tungsteno			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D) (D \cdot \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Pirámide de diamante			1-120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$	
Knoop	Pirámide de diamante			25g-5kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$	
Rockwell				kg		
A } C } D }	Cono de diamante			60	HRA	} = 100 - 500r
				150	HRC	
				100	HRD	
B } F } G }	Bola de acero de 1/16" de diámetro			100	HRB	} = 130 - 500r
				60	HRF	
				150	HRG	
E	Bola de acero de 1/8" de diámetro			100	HRE	

FIGURA 1.3.1 Características generales de los métodos de ensayo de dureza y fórmulas para el cálculo de la dureza. La cantidad P es la carga aplicada. Fuente: H.W. Hayden, et al., The Structure and Properties of Materials, Vol. III (John Wiley & Sons, 1965).

Las impresiones en los metales aleados por lo general tienen un perfil redondeado; en metales trabajados en frío tienen un perfil afilado (fig. 1.3.2b). El método correcto de medir el diámetro de indentación,  $d$ , se muestra en la figura.

El indentador, que tiene un módulo elástico finito, también sufre una deformación elástica bajo la carga aplicada. Como resultado, las mediciones de dureza pudieran no ser tan precisas como se espera. Un método para minimizar este efecto es el uso de bolas de carburo de tungsteno que, debido a su elevado módulo de elasticidad, se distorsionan menos que las bolas de acero. Las bolas de carburo se recomiendan por lo general para números de dureza Brinell superiores a 500.

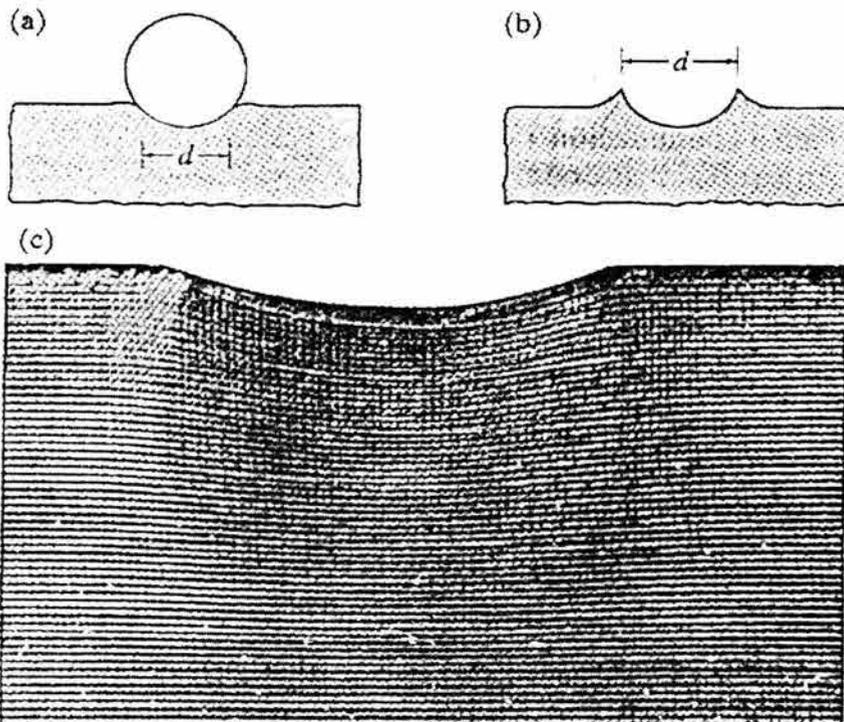


FIGURA 1.3.2 Geometría de la indentación en los ensayos Brinell: (a) metal recocido; (b) metal endurecido por trabajo; (c) deformación de acero dulce bajo un indentador esférico. Observe que la profundidad de la zona permanentemente deformada es de aproximadamente una orden de magnitud más grande que la profundidad de indentación. Para que sea válido un ensayo de dureza, esta zona debe estar totalmente desarrollada en el material. Fuente: M. C. Shaw y C. T. Yang.

### 1.3.2 Ensayo Rockwell

Desarrollado por S.P. Rockwell en 1922, este ensayo mide la *profundidad* de penetración, en vez del *diámetro* de la indentación. El indentador se oprime sobre la superficie, primero con un carga menor y después con una carga mayor. La diferencia en las profundidades de penetración es una medida de la dureza del material.

En la fig. 1.3.1 aparecen algunas de las escalas de dureza Rockwell más comunes (así como los indentadores utilizados).

También se han desarrollado ensayos de **dureza superficial** Rockwell, utilizando el mismo tipo de indentadores, pero con cargas más ligeras.

### 1.3.3 *Ensayo Vickers*

El *ensayo de dureza Vickers*, desarrollado en 1922 y antes conocido como *ensayo de dureza de la pirámide de diamante*, utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide (fig. 1.3.1) y una carga que va desde 1 kilo hasta 20 kilos.

El número de dureza Vickers se indica mediante HV. Las impresiones obtenidas son típicamente inferiores a 0.5 mm (0.020 plg) en diagonal. El ensayo Vickers da esencialmente el mismo número de dureza, independientemente de la carga, y es adecuado para el ensayo de materiales con una amplia gama de dureza, incluyendo los aceros tratados térmicamente.

### 1.3.4 *Ensayo Knoop*

El *ensayo Knoop* (desarrollado por F. Knoop en 1939) utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide alargada (fig. 1.3.1), con cargas aplicadas que van generalmente de 25 gramos a 5 kilogramos. El número de dureza Knoop queda indicado por HK.

Debido a las bajas cargas que se aplican, se trata de un ensayo de **microdureza**. Por tanto, es adecuado para especímenes muy pequeños o muy delgados, y para materiales frágiles, como carburos, cerámicas y vidrios.

Este ensayo también es utilizado para medir la dureza de los granos y componentes individuales en una aleación de metal. El tamaño de la indentación se encuentra generalmente en el rango de 0.01 mm a 0.10 mm (0.0004 pulg a 0.004 pulg); en consecuencia, la preparación de la superficie es muy importante. Debido a que el número de dureza depende de la carga aplicada, los resultados del ensayo Knoop siempre deben citar cual fue la carga utilizada.

### 1.3.5 *Escleroscopio*

El *escleroscopio* (del griego skleros, que significa duro) es un instrumento en el cual un indentador de punta de diamante (martillo) encerrado en un tubo de vidrio, es dejado caer desde cierta altura sobre el espécimen. La dureza está relacionada con el *rebote* del indentador: mientras más alto sea el rebote, más duro será el material. La impresión que hace que un escleroscopio es muy pequeña; en consecuencia, a menudo es utilizado para superficies recubiertas, como rodillos para laminado de metales y arietes hidráulicos. El instrumento es portátil, y simplemente se coloca sobre la superficie de la pieza; por tanto, resulta útil para medir la dureza de objetos grandes, que de lo contrario no cabrían en el espacio limitado de los ensayadores de dureza.

### 1.3.6 Dureza Mohs

Desarrollado en 1822 por F. Mohs, este ensayo se basa en la capacidad de un material de *rayar* a otro.

La dureza Mohs se basa en una escala del 1 al 10, siendo 1 la medida del talco y 10 la del diamante (la sustancia más dura conocida). Un material con un número de dureza Mohs más elevado siempre rayará a otro con un número más bajo. Los metales blandos tienen una dureza Mohs de 2 a 3, los aceros endurecidos de aproximadamente 6, el óxido de aluminio (utilizado para herramientas de corte y como abrasivo en las ruedas de esmeril) de 9. Aunque la escala de Mohs es cualitativa, y es utilizada principalmente por los mineralogistas, se relaciona bien con la dureza Knoop.

### 1.3.7 Durómetro

La dureza de los hules, plásticos y materiales no metálicos similares, blandos y elásticos, por lo general se mide con un instrumento conocido como *durómetro* (del latín *durus*, que significa duro). Este es un ensayo empírico, en el cual un indentador es oprimido contra la superficie y luego se le aplica una carga constante. La *profundidad* de la penetración se mide después de 1 segundo; la dureza está inversamente relacionada con la penetración.

Existen dos escalas diferentes para este ensayo. El tipo A tiene un indentador obtuso y una carga de 1 kg; se utiliza para los materiales más blandos, el tipo B tiene un indentador más agudo y una carga de 5 kg; se utiliza para materiales más duros. Los números de dureza en estos ensayos van del 0 al 100.

### 1.3.8 Dureza y Resistencia

Dado que la dureza es la resistencia contra una indentación *permanente*, podemos asimilarlo con llevar a cabo un ensayo a compresión en un pequeño volumen de un bloque de material (fig. 1.3.2c). Los estudios han demostrado que, en las mismas unidades, la dureza de un metal trabajado en frío, es aproximadamente 3 veces su esfuerzo a la cedencia,  $Y$ ; para metales recocidos, es de aproximadamente 5 veces  $Y$ .

Se ha establecido una relación entre la resistencia tensil máxima (UTS) y la dureza Brinell (HB) para los aceros. En unidades SI, la relación es

$$UTS = 3.5 (HB)$$

donde resistencia tensil máxima está en MPa. En unidades tradicionales,

$$UTS = 500 (HB)$$

donde resistencia tensil máxima aparece en HB en  $Kg/mm^2$ , tal y como se mide para una carga de 3000 kg.

### 1.3.9 Procedimientos de Ensayo de Dureza

Para que un ensayo de dureza sea significativo y confiable, debe permitirse que la **zona de deformación** bajo el indentador (véase la fig. 1.3.2c) se desarrolle con libertad. En consecuencia, la *localización* del indentador (respecto a los *bordes* del espécimen a probar) y el *espesor* del espécimen, son consideraciones de importancia. Comúnmente, la localización debe quedar alejado por lo menos 10 veces la profundidad de penetración del indentador. Indentaciones sucesivas sobre la misma superficie de la pieza de trabajo, deben estar separadas lo suficiente para que no interfieran entre sí.

Los valores obtenidos de diferentes ensayos de dureza, sobre escalas diferentes, se pueden interrelacionar, y se pueden convertir utilizando la fig. 1.3.3.

Se debe tener cuidado en el uso de estos diagramas, debido a las muchas variables en las características del material y en la forma de la indentación.

## 1.4 Esfuerzo y Deformación

### 1.4.1 Esfuerzo

El *esfuerzo* es una función de las fuerzas internas en un cuerpo que se producen por la aplicación de las cargas exteriores.

Una regla básica de estática es que si una estructura está en equilibrio, cualquier posición de la estructura debe estar en equilibrio.

El esfuerzo unitario se define como la fuerza por unidad de área. En términos algebraicos,

$$\sigma = \frac{P}{A},$$

donde

$\sigma$  = esfuerzo unitario en N/m<sup>2</sup> o en lb/plg<sup>2</sup>

$P$  = carga aplicada en N o lb

$A$  = área sobre la cual la carga, en m<sup>2</sup> o en plg<sup>2</sup>

La definición  $\sigma = P/A$  es una fórmula muy importante y útil. Deben notarse dos cosas. La primera es que esta fórmula se aplica a partes que están cargadas ya sea tensión o a compresión. La segunda, y más importante, es que las cargas deben aplicarse a través del centroide de la sección transversal y deben coincidir con el eje.

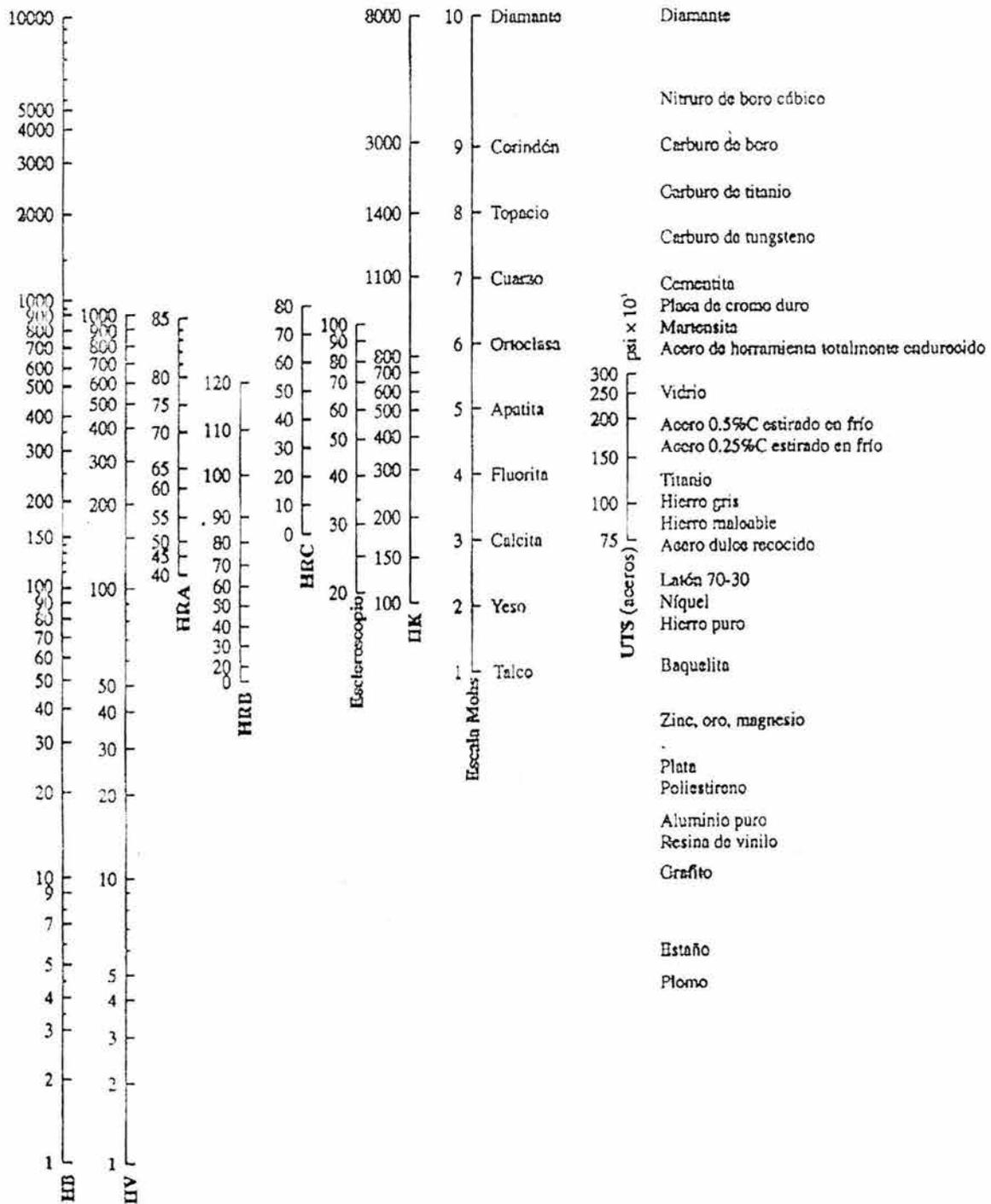


FIGURA 1.3.3 Diagrama para la conversión de varias escalas de dureza. Observe el rango limitado de la mayor parte de las escalas. Debido a los muchos factores involucrados, estas conversiones son aproximadas.

### 1.4.2 Deformación

Una *deformación* es el cambio de longitud de una parte. La *deformación total* es el cambio total de longitud del miembro.

La *deformación unitaria* se define como el cambio en longitud por unidad de longitud. Expresada algebraicamente, la deformación unitaria es

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

donde

$\varepsilon$  = deformación unitaria en m/m o en plg/plg

$\delta$  = deformación total (cambio total de longitud) en m o en plg

$L$  = longitud original en m o en plg

### 1.4.3 Elasticidad

Es la propiedad que hace que un cuerpo que ha sido deformado regrese a su forma original después de que se han removido las fuerzas deformadoras. Según esta definición, casi todos los materiales de ingeniería tales como el acero, aluminio, vidrio, concreto, madera, etc., pueden considerarse como elásticos.

A los esfuerzos normales a los que se usan los materiales, generalmente se consideran como perfectamente elásticos. Sin embargo, si los esfuerzos en un cuerpo llegan a ser demasiado grandes, el cuerpo nunca regresará a sus dimensiones originales.

### 1.4.4 Diagrama Esfuerzo – Deformación

Cuando se elige un material para un edificio o una máquina, se deben conocer sus propiedades, así como su capacidad para soportar esfuerzos. Las diversas propiedades mecánicas de un material se determinan mediante una serie de pruebas de laboratorio.

Un ensayo a tensión para un material, puede describirse sencillamente, como sigue. Se coloca una varilla redonda de diámetro conocido en una máquina de ensayo.

La máquina de ensayo ejerce una fuerza sobre esta probeta que puede medirse en cualquier tiempo durante el ensayo. Se adhiere a la probeta un extensómetro, que es un instrumento para medir cambios de longitud con exactitud. Después se aplica a la probeta una carga de tensión que se va incrementando lentamente hasta que se presenta la fractura.

A ciertos intervalos durante el ensayo, se hacen medidas simultáneas de la carga y la deformación, y a partir de estos datos se traza una gráfica de esfuerzos contra deformaciones.

Al construir esta gráfica, trazamos los valores del esfuerzo unitario ( $P/A$ ) como las ordenadas y los valores correspondientes de las deformaciones unitarias ( $\delta/L$ ) como las abscisas. El resultado es una gráfica similar a la de la fig. 1.4.1.

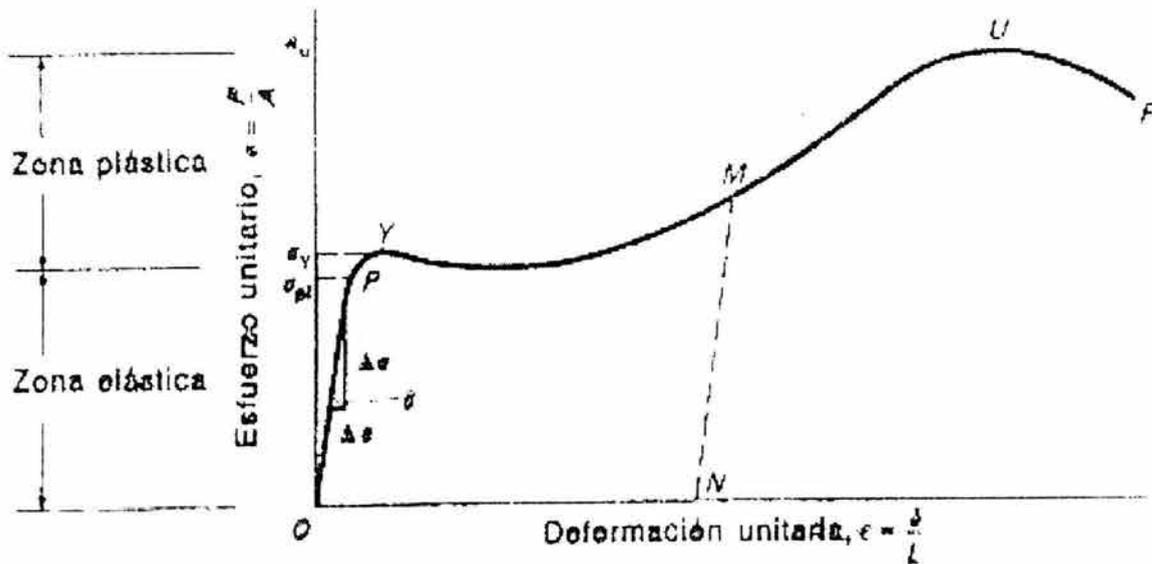


FIGURA 1.4.1

Cada uno de los puntos, o segmentos de la curva, recibe su nombre. El punto P es el límite de proporcionalidad del material. Para un esfuerzo mayor que el esfuerzo en el límite de proporcionalidad ( $\sigma_{pl}$ ), ya no se cumple la Ley de Hooke (donde el  $\sigma \propto \epsilon$ ). En diseño, el esfuerzo en el material se limita a valores menores que el límite de proporcionalidad. Si los esfuerzos exceden este valor, el esfuerzo ya no es proporcional a la deformación unitaria.

Justamente después del límite de proporcionalidad, (en Y), la curva disminuye su pendiente y el material se deforma con muy poco o ningún aumento en la carga. El material fluye o se deforma plásticamente en este punto.

El esfuerzo para el cual comienza esta fluencia, se llama el esfuerzo en el punto de fluencia ( $\sigma_f$ ). Puede notarse que el límite de proporcionalidad y el punto de fluencia están muy próximos.

Posteriormente, la curva incrementa su pendiente y alcanza un valor máximo en U. El esfuerzo correspondiente a este punto ( $\sigma_u$ ) se llama el esfuerzo último del material, que es el máximo esfuerzo que el material es capaz de soportar. Después la curva desciende hasta el punto F, donde ocurre la fractura.

Cada día se hace más común el analizar los esfuerzos en el *intervalo elástico* o en el *intervalo plástico* con respecto a las diferentes teorías de diseño. El *intervalo elástico* de un material es el intervalo de esfuerzos, dentro del cual el material permanece elástico; es decir, regresa a su forma original después de descargarlo.

En el intervalo elástico, los esfuerzos son menores que el punto de fluencia. Cuando los esfuerzos exceden el punto de fluencia, tiene lugar un flujo plástico, y el material nunca vuelve a recuperar su forma original. Este intervalo de esfuerzos se llama *intervalo plástico*.

### **1.5 Fatiga**

Cuando una pieza mecánica se somete a ciclos de esfuerzos o deformaciones repetidos, alternantes o fluctuantes, ellos ocasionan que su estructura se colapse, es decir que las propiedades mecánicas del material como la resistencia se vean disminuidas, conforme más se exponga al elemento mecánico a las cargas, la probabilidad de que se presente la falla aumenta, aunque el esfuerzo sea menor a la resistencia última del material o que el esfuerzo de fluencia.

Los elementos mecánicos que comúnmente fallan por fatiga suelen ser bielas, cigüeñales, aspas de turbina ya sean de gas o vapor, conexiones o soportes de puertas, ruedas y ejes de ferrocarril. La naturaleza de esta falla comienza con una pequeña grieta, y esta es tan diminuta que no se puede percibir a simple vista, la grieta se desarrolla en un punto de discontinuidad como una ranura, grieta u otra área de alta concentración de esfuerzos. Cuando la grieta se forma, el efecto de concentración de esfuerzos se hace mayor y se extiende más rápidamente. Después de un tiempo el área de sección transversal del miembro disminuye hasta que la carga ya no puede ser soportada, ocurriendo una fractura repentina como si el material fuera frágil, esta fractura se caracteriza por dos áreas de diferentes características, una la de la grieta y otra donde se da la ruptura frágil.

La fatiga es la respuesta de un material a las condiciones de carga dinámica. Un material sujeto a esfuerzos cíclicos puede fracturarse después de un cierto número de ciclos, aún cuando el esfuerzo máximo en cualquiera de los ciclos sea considerablemente menor que el de fractura del material, determinado por pruebas estáticas de corta duración. Las pruebas de fatiga generalmente implican someter una probeta a ciclos de esfuerzos alternos, con un esfuerzo medio de cero.

Los resultados se grafican en forma de una curva S-N. La figura 1.5.1 muestra curvas S-N para dos materiales.

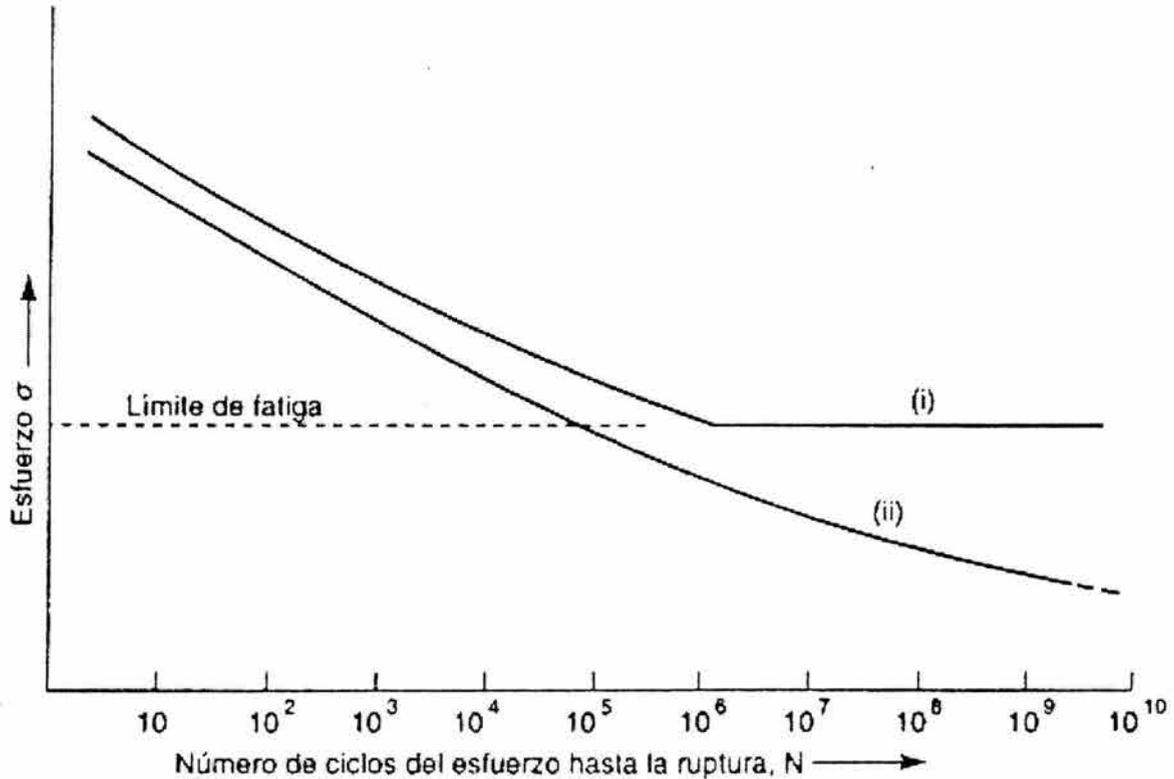


FIGURA 1.5.1 Curvas S-N: (i) metal con límite de fatiga; (ii) metal sin límite de fatiga

La mayoría de los aceros exhiben una curva del tipo (i) con límite de fatiga definido, que generalmente se encuentra cerca de la mitad del valor de la resistencia a la tensión. Muchos metales no ferrosos muestran curvas del tipo (ii), sin un límite de fatiga definido.

### 1.5.1 Tipos de ciclos de esfuerzo

Los ciclos de esfuerzo se clasifican en *alternados*, cuando el esfuerzo medio,  $\sigma_m$ , es de cero; *de repetición*, cuando el esfuerzo mínimo,  $\sigma_{min}$ , es de cero, y *fluctuante*, cuando el esfuerzo medio,  $\sigma_m$ , tiene un valor diferente de cero. Estos tipos de ciclos de esfuerzo se muestran en la figura 1.5.2. El intervalo de esfuerzo de un ciclo,  $\Delta\sigma$ , es  $(\sigma_{max} - \sigma_{min})$ ; la amplitud del esfuerzo cíclico,  $\sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_{max} - \sigma_{min})$ , y el esfuerzo cíclico medio,  $\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{max} + \sigma_{min})$ .

### 1.5.2 Relaciones empíricas

Existen varias leyes de naturaleza empírica, propuestas para expresar las relaciones entre el rango del esfuerzo, esfuerzos medios y vida bajo fatiga. Estas leyes son:

1. La ecuación modificada de Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{FL}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} = 1$$

2. La ecuación parabólica de Gerber:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{FL}} + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} \right)^2 = 1$$

3. La ecuación modificada de Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{FL}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_Y} = 1$$

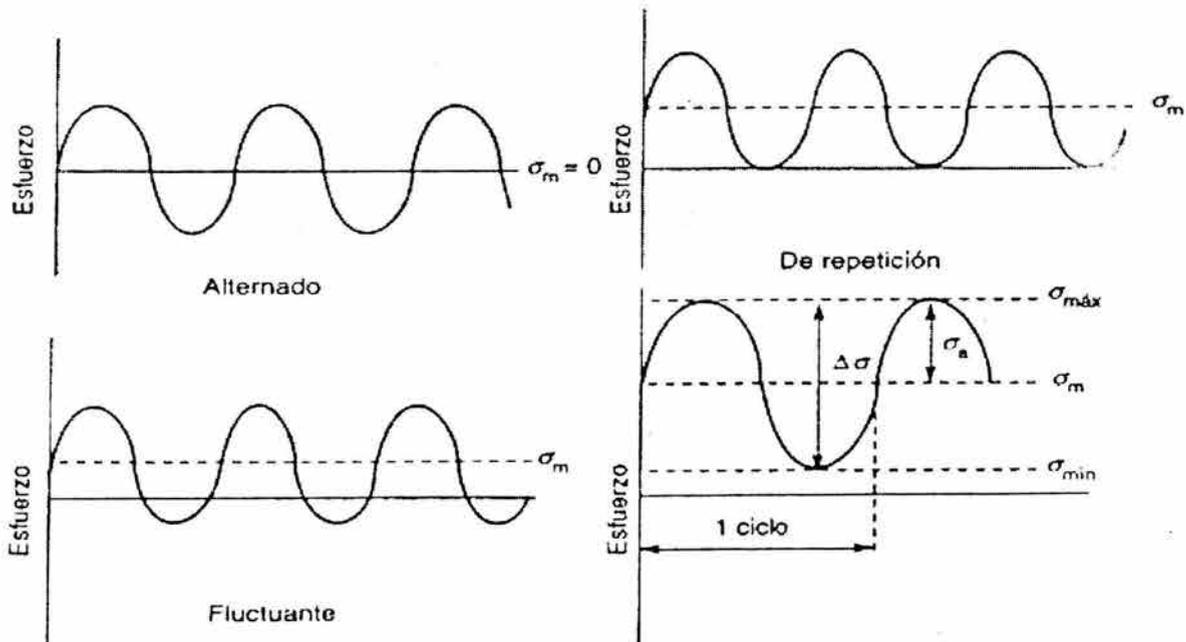


FIGURA 1.5.2 Tipos de ciclos de esfuerzo

En las ecuaciones anteriores,  $\sigma_{FL}$  es la resistencia a la fatiga, determinada en pruebas con un esfuerzo medio de cero;  $\sigma_{TS}$  es la resistencia a la tensión y  $\sigma_Y$  es la resistencia del material a la fluencia.

4. Ley de Miner de fatiga acumulativa. Ésta es una regla empírica que se utiliza para calcular la vida bajo fatiga de un componente mecánico sometido a una serie de ciclos variables de carga. Por ejemplo, si se le aplica un esfuerzo por  $n_1$  ciclos en un régimen que ocasionará la ruptura en un total de  $N_1$  ciclos, y por  $n_2$  ciclos en un régimen donde la ruptura ocurrirá después de  $N_2$  ciclos, entonces se habrá utilizado la fracción  $n_1 / N_1$  de la vida bajo fatiga del componente en el primer caso, y la fracción  $n_2 / N_2$  de la vida bajo fatiga en el segundo caso. La regla de Miner puede expresarse enunciando que la falla ocurrirá cuando  $\sum(n / N) = 1$ .

## 1.6 Elastómeros

Los elastómeros son un grupo de materiales termoplásticos que poseen un módulo de elasticidad bajo, experimentan grandes deformaciones con cargas relativamente bajas y regresan a sus dimensiones originales una vez que la carga ha dejado de actuar.

Poseen estructuras de polímeros lineales con un pequeño número de entrecruzamientos entre moléculas y, en un gran número de casos, las moléculas se forman en espirales y se comportan como diminutos resortes helicoidales. La presencia de entrecruzamientos ocasiona que los materiales regresen a sus dimensiones originales, después de la eliminación de la carga. Ver figs. 1.6.1 y 1.6.2.

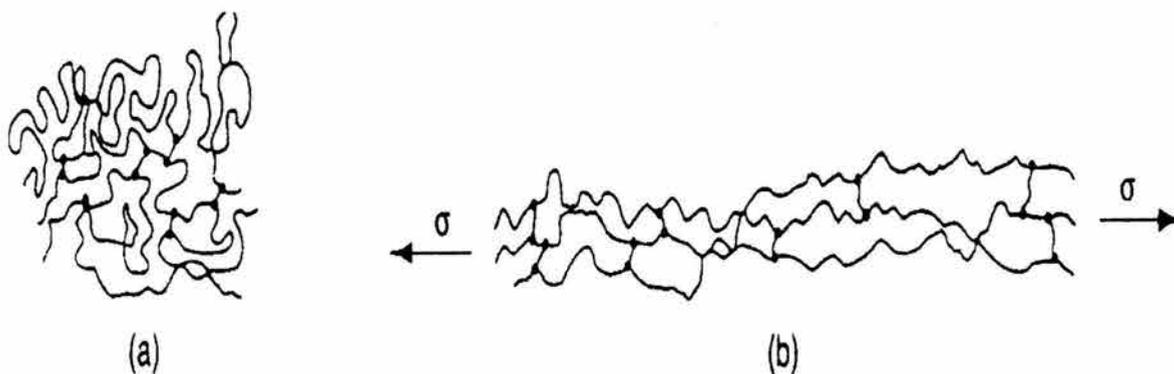


FIGURA 1.6.1 Modelo de moléculas elastómeras largas con bajo grado de encadenamiento transversal: (a) sin estirar y (b) bajo esfuerzo a la tensión.

La naturaleza física y química de los materiales poliméricos, las cuales permiten su clasificación en tres amplias categorías: elastómeros o cauchos, fibras y plásticos.

Los elastómeros son altos polímeros que poseen enlaces cruzados de naturaleza química o física. Para su aplicación industrial, su temperatura de utilización debe situarse por encima de la Temperatura de Transición Vítrea,  $T_g$ , (para permitir movilidad de "cadena"), y su estado normal (no estirado) será amorfo. La fuerza de recuperación después de un alargamiento se debe en su mayor parte a la entropía.

Cuando el material es estirado, las cadenas aleatorias se ven obligadas a ocupar posiciones más ordenadas. Al cesar la aplicación de la fuerza, las cadenas tienden a volver a un estado de mayor desorden. La movilidad total real de las cadenas deberá ser baja para permitir un estirado rápido y fácil.

En su estado estirado, las cadenas deberán mostrar una resistencia a tracción elevada, mientras que para un estiramiento reducido, la resistencia a tracción será baja. El material vuelve a su forma original después de deformarse debido a sus enlaces cruzados. Esta propiedad se denomina a menudo "memoria elástica".

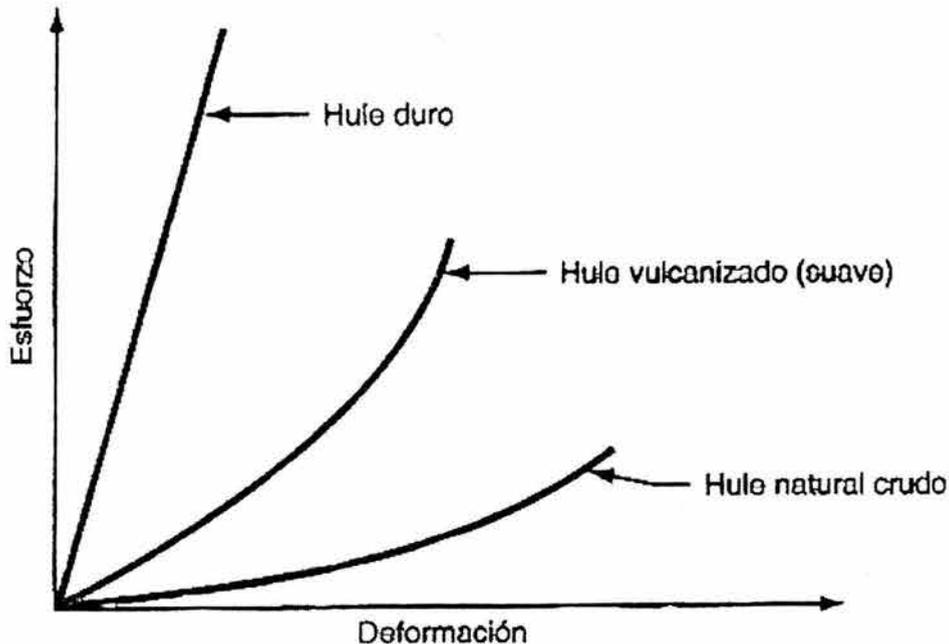


FIGURA 1.6.2 Incremento de la rigidez en función de la deformación para tres grados de hule: hule natural, hule vulcanizado y hule duro.

Los elastómeros se caracterizan habitualmente por la carencia de grupos rigidizantes en la cadena principal del polímero, de grupos pendientes voluminosos y de fuerzas fuertes intermoleculares.

Antes de la Segunda Guerra Mundial, el caucho de la hevea constituía el 99% de los elastómeros utilizados, pero hoy en día, los elastómeros sintéticos constituyen el 70% del caucho fabricado. El caucho natural y muchos elastómeros sintéticos se hallan disponibles en forma de látex.

El látex puede ser utilizado como tal, para que se peguen las fibras de las alfombras o para fabricar artículos impregnados con caucho (guantes), pero la mayoría del látex se utiliza coagulado para la fabricación de neumáticos y otros artículos.

El elastómero más importante es el copolímero de butadieno (75%) y estireno (25%) (SBR), que se produce por polimerización en emulsión de butadieno y estireno. El copolímero de butadieno y acrilonitrilo (Buna-H, NBR, Hycar) se fabrica también mediante un proceso de emulsión. El neopreno se fabrica por polimerización en emulsión de cloropreno. El caucho de butilo se fabrica por copolimerización catiónica a baja temperatura del isobutileno (90%) y del isopreno (10%).

Los cauchos de polibutadieno, poliisopreno y del copolímero de etileno-propileno (EPDM) se producen por polimerización aniónica. Uno de los elastómeros originales (Thiokol), al igual que los elastómeros de polifluorocarbonados (Viton), de silicona (Silastic), de poliuretano (Adipreno) y fosfacenos, son todos ellos elastómeros de usos especiales.

En la tabla 1.6.3 pueden hallarse las propiedades físicas de los elastómeros típicos.

**Tabla 1.6.3 Propiedades físicas de los elastómeros típicos**

Elastómero	Vulcanizados de goma pura		Vulcanizados reforzados con negro de carbón	
	Resistencia a la tracción (kg/cm <sup>2</sup> )	Alargamiento (%)	Resistencia a la tracción (kg/cm <sup>2</sup> )	Alargamiento (%)
Caucho natural (NR)	210	700	315	600
Caucho de estireno-butadieno (SBR)	28	800	265	550
Caucho de acrilonitrilo-butadieno (NBR)	42	600	210	550
Poliacrilatos (ABR)			175	400
Thiokol (ET)	21	300	85	400
Neopreno (CR)	245	800	245	700
Caucho de Butilo (HR)	210	1000	210	400

Fuente: Estos datos han sido obtenidos de Machine Design Material Reference Issue, publicados por Penton/IPC Cleveland, Ohio.

**Tabla 1.6.3 Propiedades físicas de los elastómeros típicos**

Elastómero	Vulcanizados de goma pura		Vulcanizados reforzados con negro de carbón	
	Resistencia a la tracción (kg/cm <sup>2</sup> )	Alargamiento (%)	Resistencia a la tracción (kg/cm <sup>2</sup> )	Alargamiento (%)
Poliisopreno (IR)	210	700	315	600
Caucho de propileno-etileno (EPM)		300		
Poliepiclorohidrina (CO)				
Hidrocarburos polifluorados (FPM)	50	600		
Elastómeros de silicona (SI)	70	600		
Elastómeros de poliuretano (AU)	350	600	420	500

Fuente: Estos datos han sido obtenidos de Machine Design Material Reference Issue, publicados por Penton/IPC Cleveland, Ohio.

### 1.6.1 Vulcanización

La vulcanización es el tratamiento que realiza el encadenamiento transversal de las moléculas del elastómero mediante el cual el hule se vuelve más rígido y resistente, reteniendo su extensibilidad.

Es un paso crítico en la secuencia del procesamiento del hule. A escala submicroscópica, el proceso se puede visualizar en la fig. 1.6.4, donde las moléculas de cadena larga del hule se unen en ciertos puntos de cruce, cuyo efecto es reducir la disposición a fluir del elastómero. Un hule suave típico tiene uno o dos encadenamientos transversales por cada mil unidades (meros). Al aumentar el número de encadenamientos transversales, el polímero se vuelve más rígido y se comporta más como un plástico termofijo (hule duro).

La vulcanización, tal como fue inventada por Goodyear, utilizaba azufre (cerca de ocho partes en peso de azufre mezcladas con cien partes de hule natural) a una temperatura de 280 °F (140 °C) durante cerca de cinco horas. No se incluían otros productos químicos en el proceso. En la actualidad ya no se usa la vulcanización sólo con azufre como un tratamiento comercial debido a los largos tiempos de curado. Se usan algunos otros productos químicos como el óxido de zinc (ZnO) y el ácido esteárico (C<sub>18</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>) combinándolos con dosis más pequeñas de azufre para acelerar y fortalecer el tratamiento.

El tiempo de curado resultante es de 15 a 20 minutos. Además, se han desarrollado tratamientos de vulcanización sin azufre.

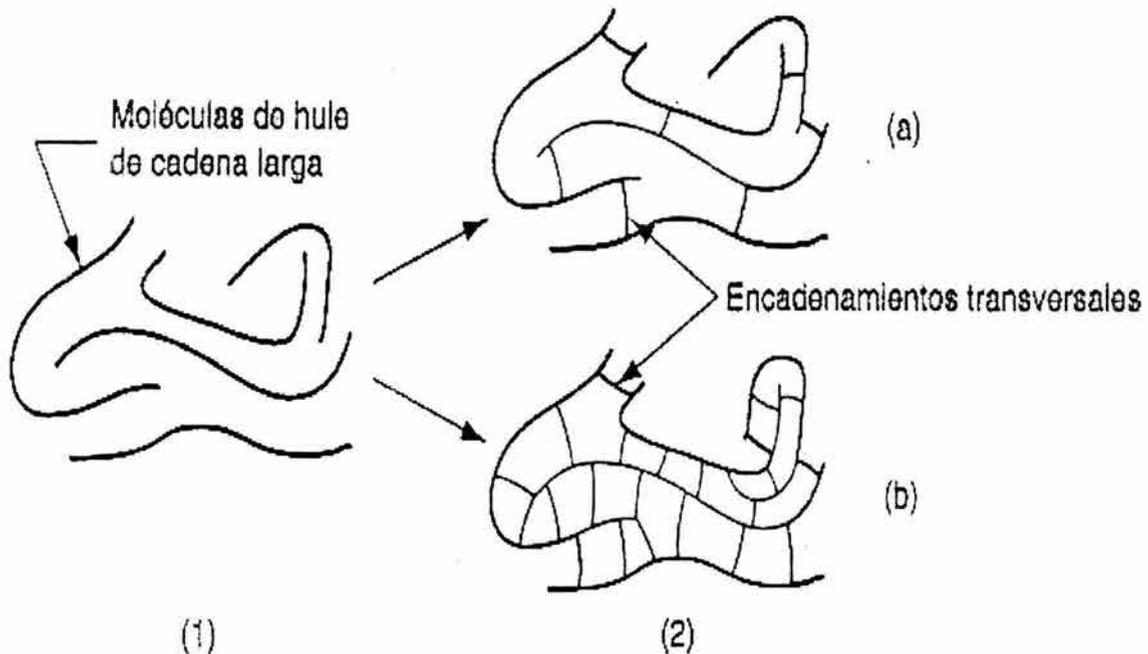


FIGURA 1.6.4 Efecto de la vulcanización en las moléculas de hule: (1) hule crudo, (2) hule vulcanizado (encadenado transversalmente); las variaciones de (2) incluyen (a) hule suave con bajo grado de encadenamiento y (b) hule duro con alto grado de encadenamiento.

El efecto de la vulcanización en el hule natural y sintético puede verse en la fig. 1.6.5. Para el hule natural hay un tiempo de curado óptimo y éste depende del criterio a seguir con respecto a la rigidez o resistencia a la tensión.

El incremento en el tiempo de curado más allá del óptimo ocasiona que el efecto en el elastómero empiece a revestirse; es decir, que disminuya el encadenamiento transversal con una reducción correspondiente de las propiedades mecánicas.

Ciertos hules sintéticos que se curan con azufre (SBR el más notable), no presentan esta propiedad de degradación.

En los procesos de moldeo de hule, se realiza la vulcanización en el molde; la temperatura del molde se mantiene a un nivel apropiado para el curado. En otros procesos, la vulcanización se realiza después de que la parte se ha formado. Los tratamientos se dividen generalmente en 1) procesos por lote y 2) procesos continuos.

En los métodos por lote se usa una *autoclave*, que es un recipiente a presión calentado por vapor; y en el proceso continuo de *curado con gas*, un gas inerte, como el nitrógeno, es calentado para curar el hule.

Muchos de los procesos básicos generan productos continuos, y si a la salida no se cortan en piezas discretas, entonces queda indicada la vulcanización continua. Los métodos continuos incluyen el *vapor a alta presión*, apropiado para el curado de alambres y cables recubiertos con hule; el *túnel de aire caliente*, para extrusiones celulares; y el *curado en tambor continuo* en el cual se pasan las hojas de hule continuo (por ejemplo, bandas y materiales para pisos) a través de uno o más rodillos calentados para efectuar la vulcanización.

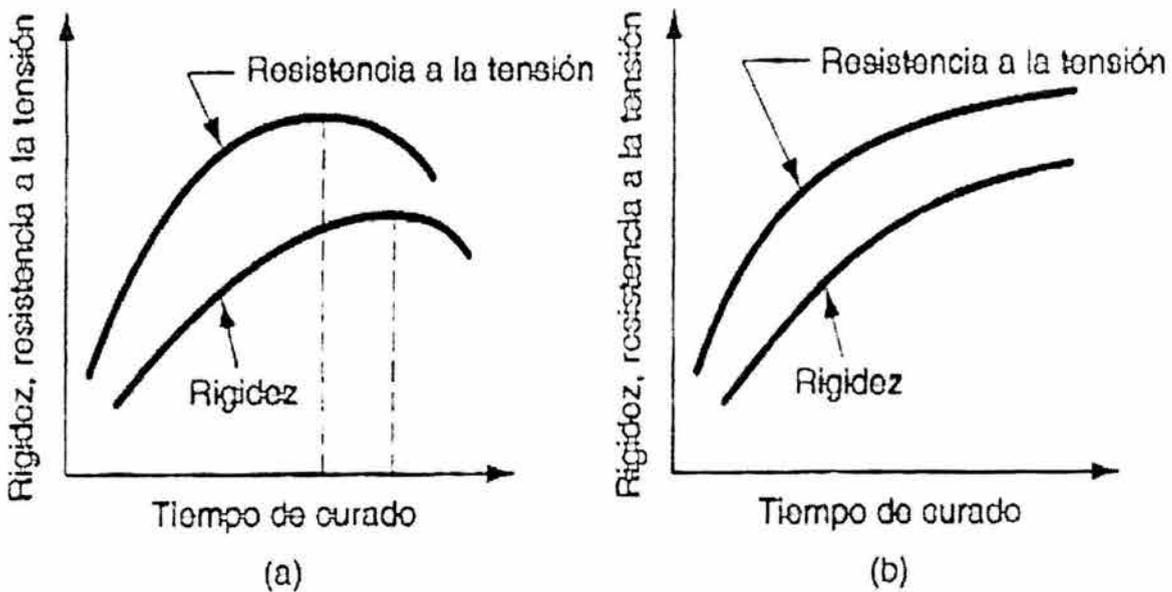


FIGURA 1.6.5 Propiedades mecánicas de los hules en función del tiempo de curado (vulcanización), (a) hule natural y (b) hule sintético (SBR).

*CAPITULO II.*

*RESORTES Y SUSPENSIONES*

*ELÁSTICAS*

## **2.1 Resortes**

Los resortes mecánicos se utilizan en las máquinas con objeto de ejercer fuerzas, proporcionar flexibilidad y almacenar o absorber energía. En general pueden clasificarse como de alambre, planos, o con formas especiales, teniéndose variaciones en estas divisiones. Los de alambre incluyen a los helicoidales, sean de alambre de sección circular o cuadrada, y se fabrican con el fin de resistir cargas de tensión, comprensión o torsión. Dentro de los planos se incluyen los tipos en cantilever y elípticos, las muelles arrolladas del tipo de reloj, y las muelles planas con forma de arandela comúnmente conocidas como muelle Belleville.

Se emplean resortes para ejercer fuerzas o pares en un mecanismo o para absorber la energía de las cargas aplicadas repentinamente. Los resortes actúan, frecuentemente, con tensiones de trabajo muy elevadas y con cargas que varían con continuidad.

### **2.1.1 Resortes Helicoidales**

Los resortes helicoidales se construyen para resistir fuerzas que tienden a acortarlos, alargarlos o a torcerlos, de aquí que se distinguen resortes helicoidales de comprensión, de tracción o de torsión. Asimismo, atendiendo a su forma externa, pueden ser cilíndricos, cónicos o de formas especiales.

### **2.1.2 Resortes helicoidales de comprensión**

La gran mayoría de los resortes helicoidales trabajan a comprensión, debido a que son los económicos de fabricar y a que aún cuando se rompan, pueden seguir trabajando, cuando menos parcialmente.

En la forma más común de resorte helicoidal de comprensión, el alambre redondo se enrolla en forma cilíndrica con espaciado constante entre bobinas adyacentes.

Para resortes de tamaño mediano a grande que se utilizan en maquinaria, el tratamiento redondo cuadrado en los extremos ofrece una superficie plana en la cual asienta el resorte. La bobina del extremo colapsa contra la bobina adyacente, cuadrada, y la superficie se aterriza hasta que por lo menos 270° de la última bobina entra en contacto con la superficie del cojinete. Los resortes que fabrican con alambre más pequeño, menos de 0.020" ó 0.50" aproximadamente, casi siempre son cuadrados y no se lijan. En casos poco comunes, los extremos pueden estar lijados pero no en escuadra o bien se dejan en bruto, sólo se cortan a la medida después de bobinarse.

El bolígrafo retráctil depende del resorte helicoidal de comprensión, que casi siempre se instala alrededor del cartucho de tinta.

Los sistemas de suspensión para automóviles, camiones y motocicletas a menudo incorporan resortes de este tipo. Otras aplicaciones automotrices incluyen resortes de válvulas en motores, herrajes para cofres y resortes de presión para placas de embrague.

En actividades de fabricación, se utilizan resortes en troqueles para activar placas separadoras, válvulas de control hidráulico, resortes de retroceso en cilindros neumáticos, montaje de equipo pesado para amortiguamiento de choques.

Muchos dispositivos pequeños como interruptores eléctricos y válvulas de bola o llave incorporan resortes helicoidales de compresión. Las sillas para escritorio tienen resortes gruesos para regresar el asiento a su posición en la parte superior.

Los cuatro tipos de extremos que se utilizan comúnmente en los resortes de compresión se ilustran en la figura 2.1.2. Un resorte con extremos simples es de forma helicoidal ininterrumpida; sus extremos son los que resultarían al cortarlo en dos puntos. Uno con extremos en escuadra o cerrados se obtiene doblando la parte libre hasta un ángulo de hélice de cero grados. Una mejor transferencia de carga al resorte se obtiene aplanando los extremos por esmerilado, como puede observarse en la figura 2.1.2.

El tipo de extremo utilizado ocasiona espiras muertas o inactivas en cada extremidad del resorte, las que deben restarse del número total a fin de obtener el de espiras activas. La fórmula es

$$N = N_T - N_D$$

Donde  $N$  = número de espiras activas  
 $N_T$  = número total de espiras  
 $N_D$  = número de espiras inactivas

La explicación de la figura 2.1.2 contiene una estimación del número de espiras muertas que puede esperarse.

En el diseño de resortes se acostumbra despreciar los efectos de excentricidad de la carga debidos a las espiras de los extremos. También suele despreciarse el efecto de esfuerzos residuales, originados en el tratamiento térmico o en sobreesfuerzos. En vez de esto, ambos efectos se toman en cuenta generalmente con un aumento en el factor de seguridad. En la fabricación de resortes de compresión es práctica usual cerrarlo hasta tener su longitud maciza o cerrada; esto induce un esfuerzo remanente, de sentido contrario al esfuerzo de trabajo, y da por resultado un incremento en la resistencia del resorte.

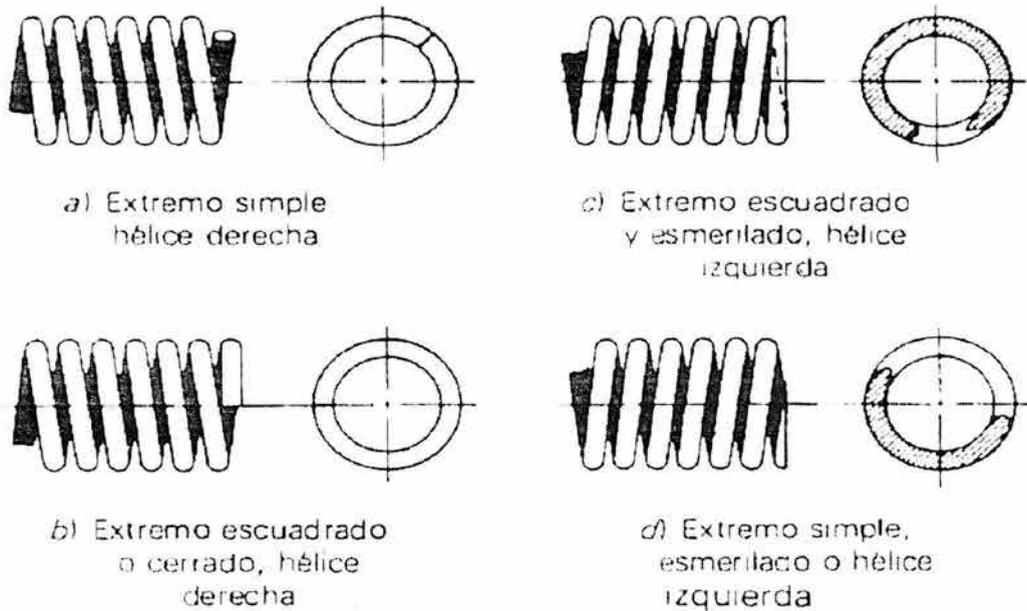


FIGURA 2.1.2 Tipos de extremos de resortes de compresión; a) ambos extremos simples,  $N_D = 1/2$ ; b) ambos extremos cerrados,  $N_D = 1$ ; c) ambos extremos cerrados y aplanados,  $N_D = 2$ ; d) ambos extremos simples y aplanados,  $N_D = 1$ .

### 2.1.3 Resortes helicoidales de tensión o extensión

Los resortes de tensión (a veces llamados también de extensión) necesariamente deben tener medios para transmitir la carga desde el soporte hasta el cuerpo del resorte. Aunque esto se puede hacer mediante un tapón roscado o un gancho giratorio, ambos dispositivos aumentan el costo del producto terminado y, por lo tanto, suele usarse uno de los métodos indicados en la figura 2.1.3.

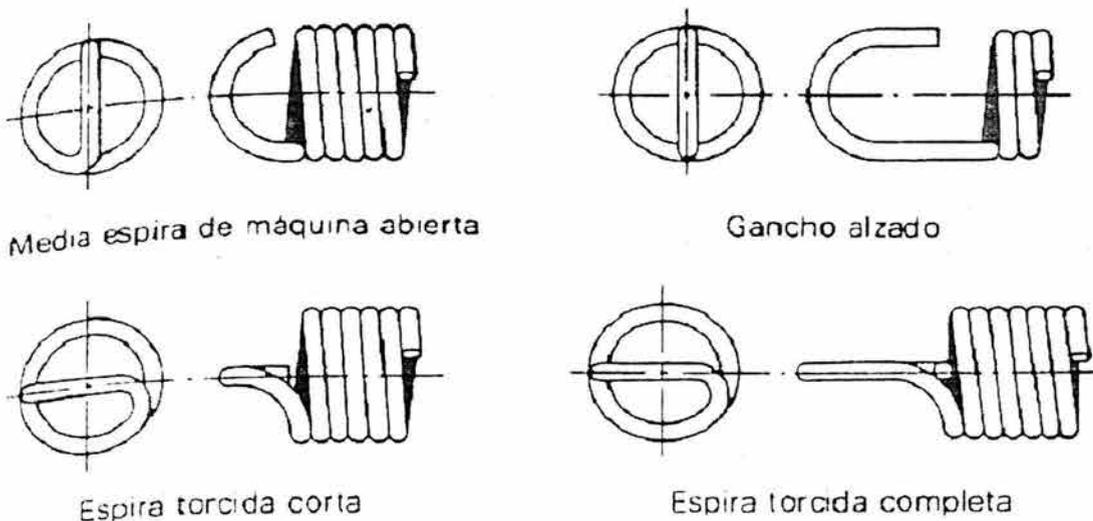


FIGURA 2.1.3 Tipos de extremos usados en resortes de tensión. (Cortesía de la Associated Spring Corporation).

Al diseñar un resorte con extremo de gancho debe considerarse el efecto de concentración del esfuerzo. La figura 2.1.3.1a muestra un método muy utilizado para diseñar el extremo. La concentración del esfuerzo, debida a un dobléz muy agudo, hace imposible diseñar el gancho con la misma resistencia que el cuerpo.

Los experimentos muestran que el factor de concentración del esfuerzo es, aproximadamente:

$$K = \frac{\gamma_m}{r_i}$$

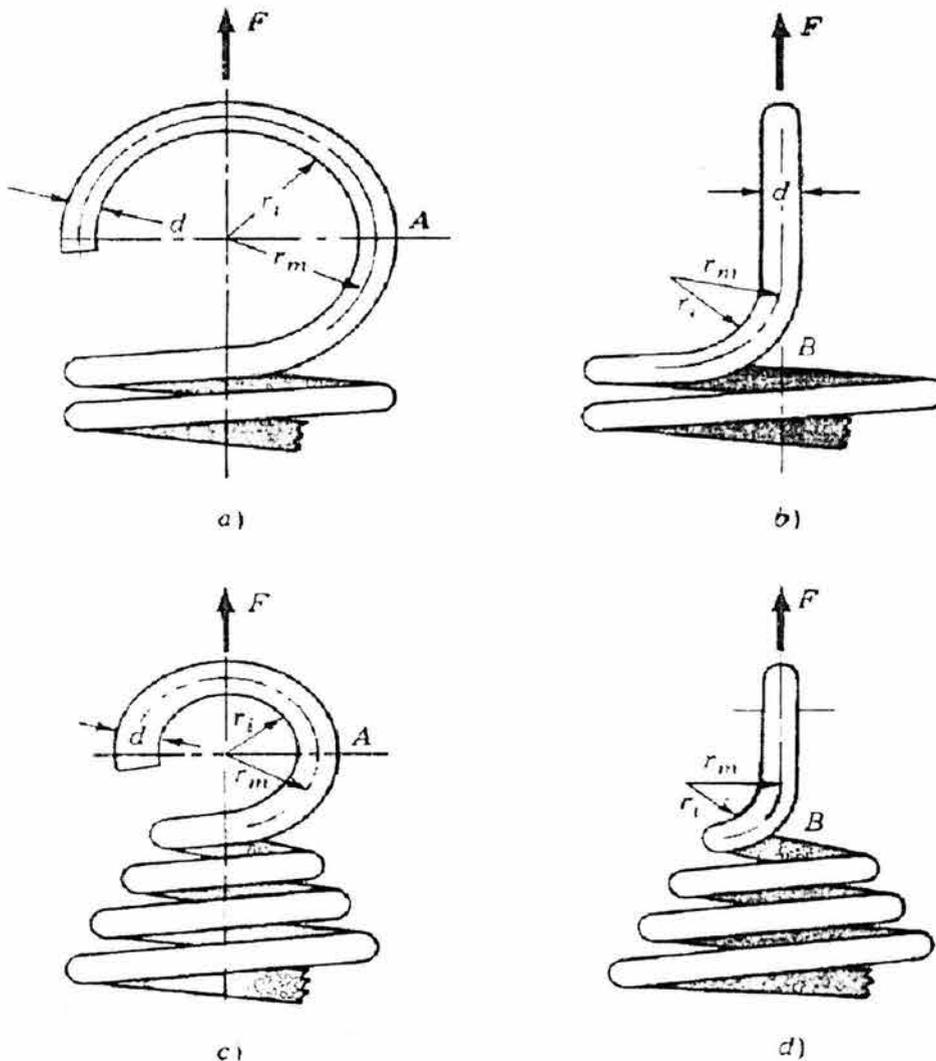


FIGURA 2.13.1 Extremos de resortes de tensión. a) Forma usual; el esfuerzo en A se debe a una combinación de fuerzas axiales y de flexión. b) Vista lateral de a); el esfuerzo en B en su mayor parte es por torsión. c) Diseño mejorado; el esfuerzo en A se debe a fuerzas axiales y de flexión combinadas. d) Vista lateral de c); el esfuerzo en B en su mayor parte es debido a torsión.

Expresión que se verifica para esfuerzos por flexión y ocurre cuando el gancho está desplazado, así como cuando se trata de esfuerzos torsionales. La figura 2.1.3.1c y d presenta un diseño mejorado mediante un diámetro reducido de las espiras y no por la eliminación de la concentración del esfuerzo.

El diámetro menor de espiras da por resultado un esfuerzo inferior debido al brazo de palanca más corto. No es necesario un factor de concentración de esfuerzos para la componente axial de la carga.

◆ *Tensión inicial*

Cuando los resortes de tensión se fabrican con sus espiras en contacto, se dice que son del tipo cerrado. Los fabricantes imparten cierta tensión inicial a estos resortes con objeto de mantener la longitud libre de manera más precisa. La tensión inicial se origina en el proceso de enrollado o bobinado, torciendo al alambre a medida que se enrolla en el mandril formador. Cuando el resorte se termina y se retira del formador, la tensión inicial queda incorporada debido a que éste no puede hacerse más corto.

La dirección de los esfuerzos puede visualizarse observando la figura 2.1.3.2. En (a) el bloque A simula el efecto de las espiras apiladas y la longitud libre del resorte el  $l_F$  cuando no se le aplica ninguna fuerza externa.

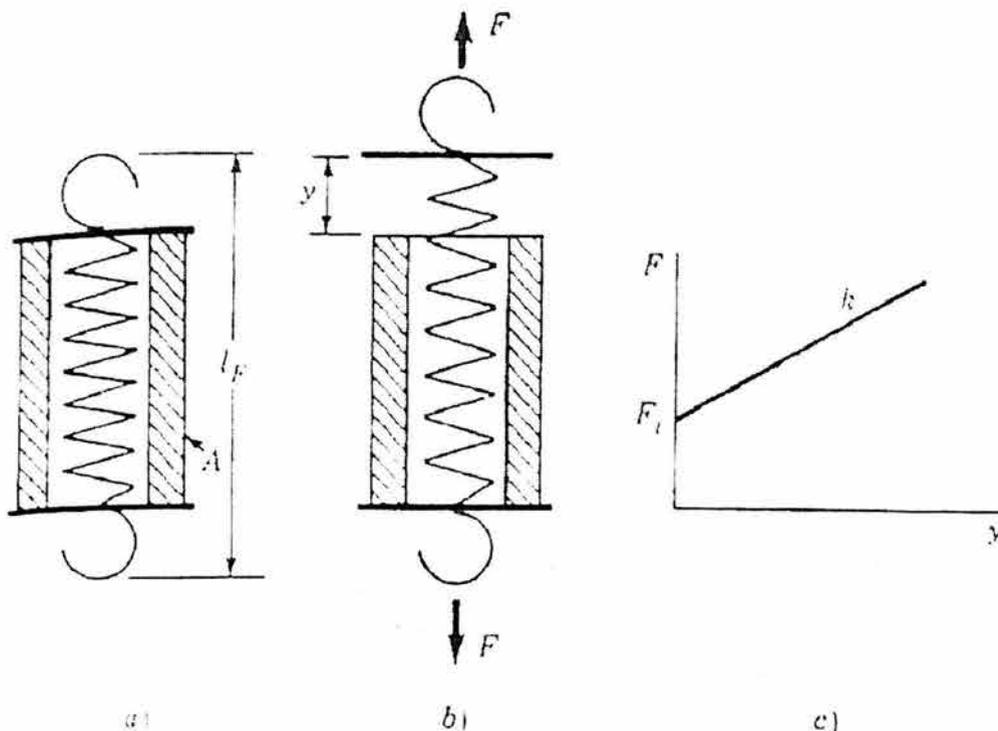


FIGURA 2.1.3.2 Simulación de un resorte de extensión con carga de tensión inicial. a) No hay fuerza externa; el resorte comprime el bloque A con una fuerza inicial  $F_i$ . La longitud libre es  $l_f$ . b) El resorte se alarga la distancia  $y$  por acción de la fuerza  $F$ . c) Relación fuerza-alargamiento.

En la figura 2.1.3.2b se considera aplicada una fuerza externa  $F$  que origina que el resorte se alargue o extienda a través de la distancia  $y$ . Obsérvese muy particularmente que los esfuerzos en el resorte tienen la misma dirección en la figura 2.1.3.2 a) y b).

La figura 2.1.3.2c muestra la relación entre la fuerza externa y el alargamiento del resorte. Aquí se observa que  $F$  debe exceder la tensión inicial  $F_i$  antes de que se experimente una deformación total  $y$ .

#### 2.1.4 Resortes helicoidales de torsión

Los resortes de torsión ilustrados en la figura 10-11 se utilizan en bisagras de puerta y arrancadores de automóvil y, de hecho, en cualquier aplicación donde se requiera par de torsión. Se enrollan de la misma manera que los resortes de tensión o de compresión; pero sus extremos están diseñados para transmitir momento torsionante.

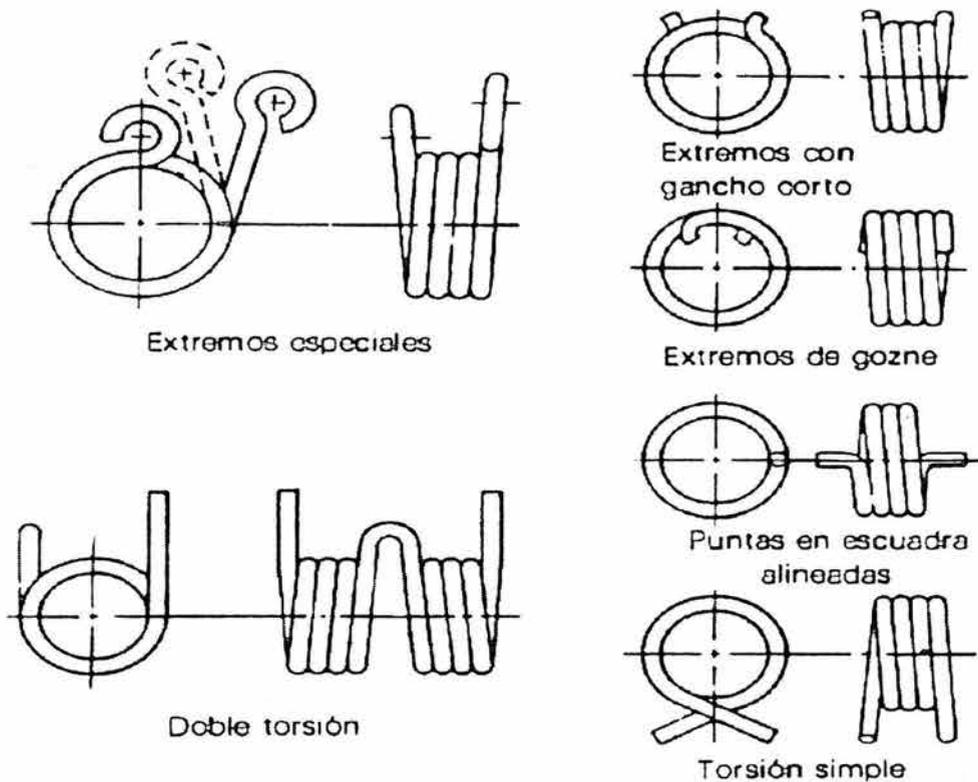


FIGURA 2.1.4 Resortes de torsión. (Cortesía de la Associated Spring Corporation).

Un resorte de este tipo se somete a la acción de un momento flexionante  $M = fr$ , lo cual produce un esfuerzo normal en el alambre. Obsérvese que esto contrasta con el caso de un resorte helicoidal de tensión o de compresión, en el cual la carga origina un esfuerzo torsional en el alambre.

Lo anterior significa que los esfuerzos residuales ocasionados durante el enrollado del alambre están en el mismo sentido que los esfuerzos de trabajo que se producen durante la operación. Estos esfuerzos remanentes se utilizan para hacer más fuerte el resorte por oposición al esfuerzo de trabajo, siempre que la carga se aplique en todos los casos haciendo que el resorte tienda a enrollarse más.

Debido a que el esfuerzo residual se opone al de trabajo, los resortes de torsión pueden diseñarse para que funcionen a niveles de esfuerzo que sean iguales o excedan a la resistencia de fluencia del alambre.

### 2.1.5 Resortes discoidales o Belleville

El croquis de la figura 2.1.5 muestra un resorte en forma de disco cónico que comúnmente recibe el nombre de *rondana* (o *arandela*) *Belleville*.

Además de la obvia ventaja de ocupar un espacio pequeño, una variación de la relación  $h/t$  producirá una amplia variedad de formas de las gráficas carga-deflexión, como lo ilustra la figura 2.1.5. Por ejemplo, al utilizar una relación  $h/t$  de 2.83 o mayor, se obtiene una curva en S que podría ser útil para mecanismos de acción de disparo.

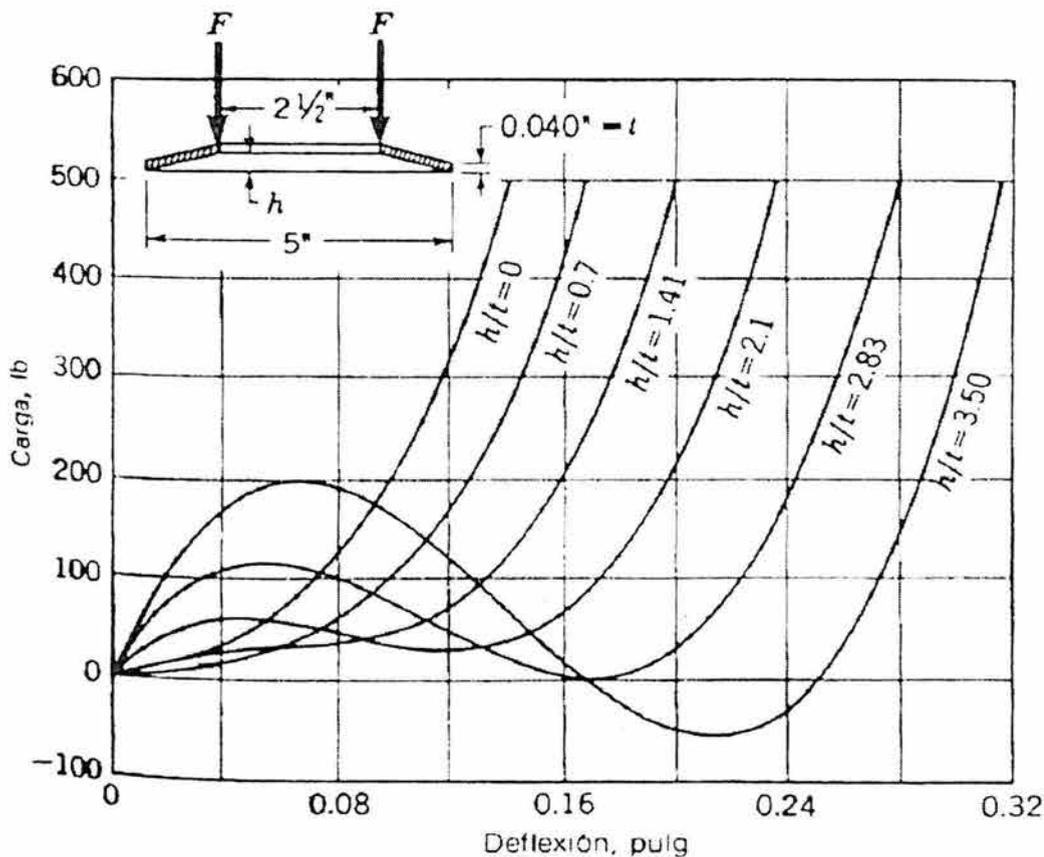


FIGURA 2.1.5 Gráficas carga-deflexión para resortes Belleville. (Cortesía de la Associated Spring Corporation).

Si se reduce la relación a un valor entre 1.41 y 2.1 se logrará que la parte central de la curva se vuelva horizontal, lo que significa que la carga es constante sobre un intervalo considerable de deflexiones. Para obtener una carga mayor para una deflexión dada puede recurrir al anidamiento, es decir, colocar los resortes en paralelo. Por otra parte, si se colocan en serie se obtiene mayor deflexión para la misma carga; pero en este caso hay peligro de inestabilidad.

### 2.1.6 Resortes varios

El resorte de tensión que se indica en la figura 2.1.6 se fabrica con una tira de acero ligeramente curvada, no plana, de modo que la fuerza requerida para desenrollarlo permanece constante. Por lo tanto, se denomina resorte de *fuerza constante*. Este es equivalente a uno con constante de resorte igual a cero, y pueden manufacturarse de modo que tengan una constante positiva y negativa.

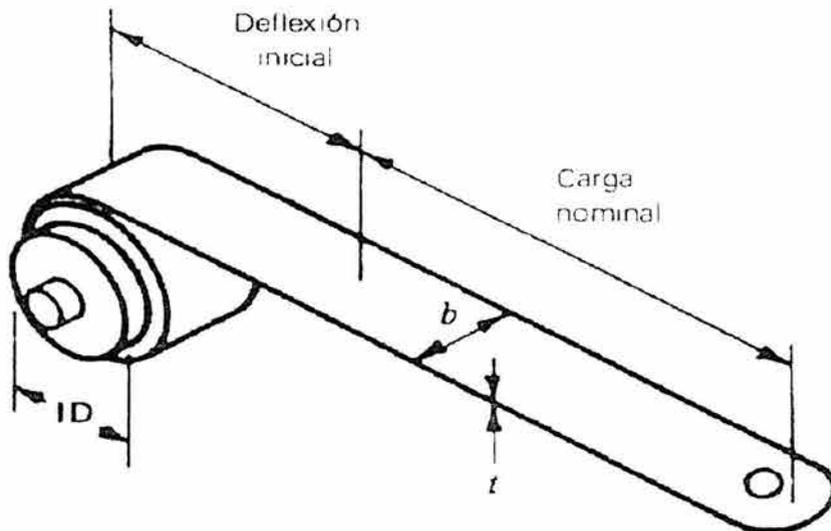


FIGURA 2.1.6 Resorte de fuerza constante. (Cortesía de Vulcan Spring & Mfg. Co., Huntingdon Valley, Pa.)

Un resorte espiral (o de voluta) es una tira de acero delgada y ancha enrollada sobre sus lados planos, de manera que las espiras o vueltas quedan una dentro de otra. Puesto que las espiras no se superponen, la altura cerrada del resorte es igual al ancho de la tira. Cuando se deja que hagan contacto con el soporte se obtiene un módulo variable en un resorte de compresión en espiral. Así, a medida que aumenta la deflexión, disminuye el número de espiras activas. El resorte espiral que indica en la figura 2.1.6.1 tiene otra ventaja importante, la cual no puede obtenerse con los resortes helicoidales de alambre redondo; si las espiras se enrollan de manera que hagan contacto entre sí deslizándose una sobre otra durante la operación, la fricción en deslizamiento servirá para amortiguar vibraciones u otras perturbaciones transitorias indeseables.

Generalmente se llaman *resortes cónicos* a aquellos de alambre enrollados en forma de cono. La mayor parte son para trabajo a compresión y se hacen de alambre redondo; pero un resorte en espiral también es de forma cónica.

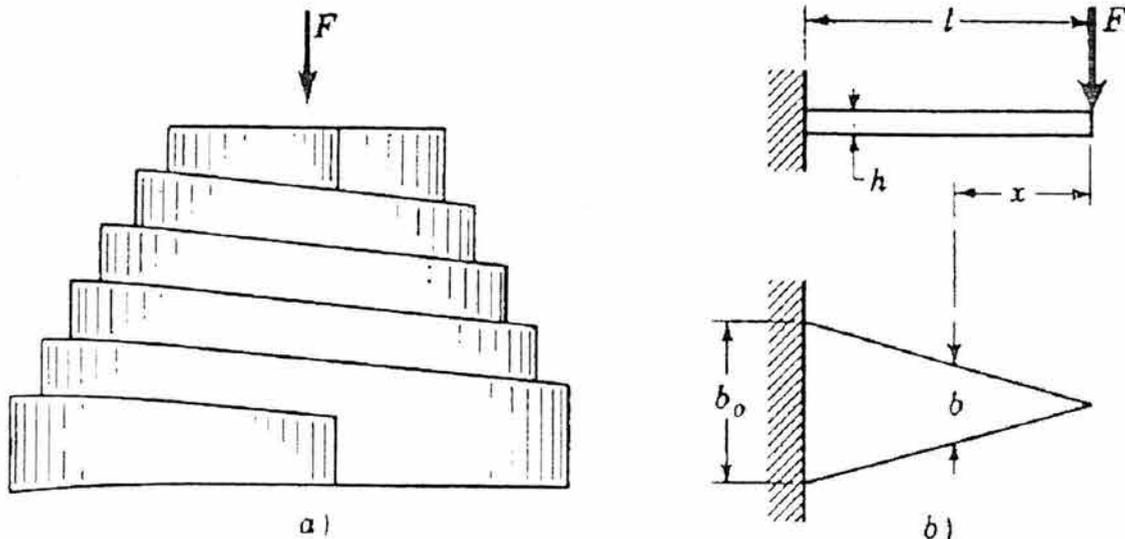


FIGURA 2.1.6.1 a) Resorte en espiral o de voluta; b) resorte plano triangular.

Probablemente la principal ventaja de este tipo de resortes es que pueden enrollarse de manera que su altura cerrada sea igual al diámetro de una vuelta o espira de alambre.

El material de acero plano se utiliza para muy diversos tipos de muelles o resortes, como los de cuerda de reloj, de fuerza, de torsión, de voladizo y de forma capilar. Con frecuencia se les da una forma especial para obtener ciertas acciones, como en el caso de portafusibles, resortes para relevadores, arandelas elásticas, anillos sujetadores y retenes.

## 2.2 Análisis de Esfuerzos en Resortes Helicoidales

La figura 2.2.1a muestra un resorte helicoidal de compresión hecho de alambre redondo cargado con una fuerza axial  $F$ . Se designará con  $D$  al diámetro medio del resorte y con  $d$  al diámetro del alambre. Ahora imagínese que el resorte se secciona en algún punto (figura 2.2.1b), se le separa una parte y se sustituye por el efecto de las fuerzas internas. Por lo tanto, como se indica en la figura, la parte seccionada ejercería una fuerza cortante directa  $F$  y un momento de torsión  $T$  en el resto del resorte.

Para visualizar la torsión, hay que pensar en una manguera de jardín enrollada en espiral e imaginar que se tira del extremo libre de ella en dirección perpendicular al plano del rollo. A medida que cada vuelta de la manguera se saca de la espiral, se tuerce o gira sobre su propio eje. En forma similar, la deformación producida por la carga en un resorte de este tipo crea una torsión en el alambre del mismo.

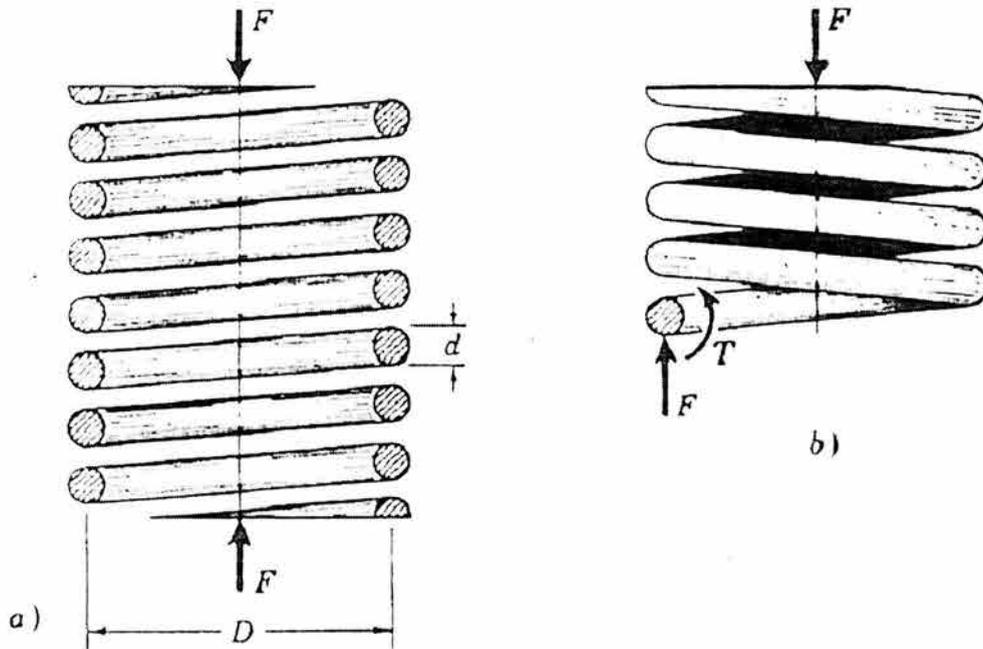


FIGURA 2.2.1 a) Resorte helicoidal con carga axial, b) diagrama de cuerpo libre que indica que el alambre queda sometido a cortante directo y a cortante torsional.

Si se hace una superposición el esfuerzo máximo en el alambre puede calcularse mediante la ecuación

$$\tau_{max} = \pm \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} \quad (a)$$

donde el término  $\frac{Tr}{J}$  es la fórmula del esfuerzo máximo por torsión. Sustituyendo:

$$T = FD/2, \quad r = d/2, \quad J = \pi d^4/32, \quad A = \pi d^2/4$$

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (b)$$

En esta ecuación se ha omitido, por innecesario, el subíndice que indica el valor máximo de esfuerzo cortante. Se conservan los signos positivos de la ecuación (a) y, por lo tanto, la ecuación (b) da el esfuerzo de corte en la fibra del lado interior del resorte.

Ahora se definirá el *índice de resorte*.

$$C = \frac{D}{d}$$

como una medida de la curvatura de las vueltas. Con esta relación la ecuación (b) queda

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} \left( 1 + \frac{0.5}{C} \right) \quad (c)$$

y si

$$K_s = 1 + \frac{0.5}{C} \quad (2-1)$$

entonces

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2-2)$$

Donde  $K_s$  se denomina *factor de multiplicación del esfuerzo cortante*. En la mayor parte de los resortes C varía desde aproximadamente 6 hasta 12. La ecuación (2-2) es general y se aplica a cargas dinámicas y estáticas. Da el esfuerzo cortante máximo en el alambre, que se produce en la fibra del lado interior del resorte.

Muchos autores expresan la ecuación del esfuerzo como:

$$\tau = K \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2-3)$$

donde K recibe el nombre de factor de corrección de Wahl. Este factor incluye el cortante directo y cualquier otro efecto debido a la curvatura. Como se indica en la figura 2-1, la curvatura del alambre aumenta el esfuerzo por la parte interior del resorte pero lo disminuye ligeramente en la exterior. El valor de K se obtiene de la ecuación,

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} \quad (2-4)$$

Definiendo  $K = K_c K_s$ , donde  $K_c$  es solamente el efecto por curvatura, se tiene

$$K_c = \frac{K}{K_s} \quad (2-5)$$

Las investigaciones revelan que el esfuerzo cortante por curvatura está sumamente concentrado en la parte interior del resorte. Estos elementos, sometidos sólo a cargas estáticas, sufrirán fluencia en la fibra interior y aliviarán ese esfuerzo. Por lo tanto, tratándose de cargas estáticas es posible desprestigiar el esfuerzo de curvatura y utilizar la ecuación (2-2).

Para cargas de fatiga  $K_c$  se utiliza como factor de reducción de la resistencia a la fatiga. Por consiguiente, la ecuación (2-2) da el esfuerzo correcto cuando la fatiga también es un factor a considerar. En consecuencia, por lo general no se usará la ecuación (2-3).

El uso de alambre o tira de sección rectangular o cuadrada no es recomendable para resortes, a menos que las limitaciones de espacio lo hagan necesario. Las formas de alambre especiales no se fabrican en cantidades tan grandes como las de redondo y carecen de la conveniencia de un desarrollo de refinamientos; por lo tanto, no pueden tener la misma fuerza y resistencia que los resortes de alambre de sección circular.

Cuando el espacio está excesivamente limitado siempre debe considerarse el empleo de los resortes de alambre redondo, en paralelo o concéntricamente, que pudieran aportar una ventaja económica sobre los de sección especial, así como mayor resistencia.

## **2.3 Deformación de Resortes Helicoidales**

### **2.3.1 Módulos y constantes de Resortes**

La *elasticidad* es la propiedad de un material que le permite recobrar su configuración original después de haber sufrido una deformación. Un *resorte* es un elemento mecánico que puede ejercer una fuerza después de ser deformado. La figura 2.3.1a muestra una viga recta de longitud  $l$ , simplemente apoyada por sus extremos y cargada con una fuerza transversal  $F$ . La deflexión  $y$  está relacionada linealmente con la fuerza, en tanto no exceda el límite de elasticidad del material, como lo indica la gráfica. Esta viga se puede considerar como un *resorte lineal*.

En la figura 2.3.1b se ilustra una viga recta apoyada sobre dos cilindros, de modo que la longitud entre apoyos disminuye a medida que la viga se va a flexionando por la fuerza  $F$ . Se requiere una fuerza mayor para flexionar una viga corta que una larga y, en consecuencia, cuanto más se flexiona más rígida se vuelve.

Asimismo, la fuerza no está relacionada linealmente con la deflexión  $y$ , por tanto, puede decirse que la viga es un *resorte no lineal con rigidez creciente* (rigidizante).

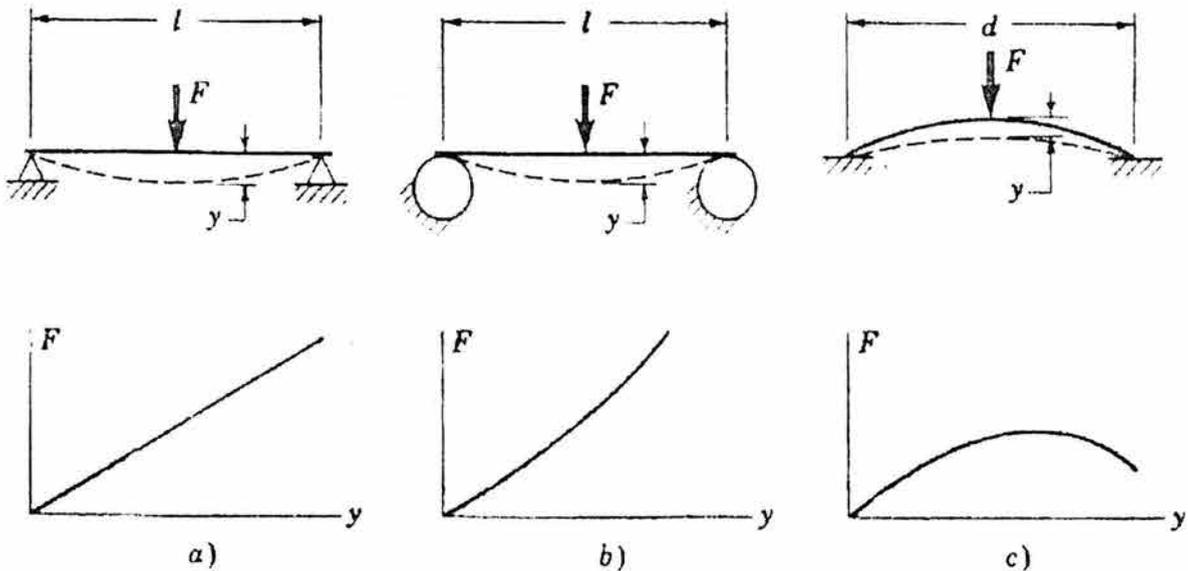


FIGURA 2.3.1 a) Resorte lineal; b) resorte rigidizante; c) resorte no rigidizante.

La figura 2.3.1c es un disco circular en forma de platillo. La fuerza necesaria para aplanar el disco primero aumenta y luego disminuye a medida que la forma se aproxima a la planicie total, como lo indica la gráfica.

Un elemento mecánico con tal característica recibe el nombre de *resorte no lineal de rigidez decreciente* (no rigidizante).

Si se expresa la relación general entre la fuerza y la deflexión por la ecuación.

$$F = F(y) \tag{a}$$

el módulo de resorte se define como:

$$k(y) = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta y} = \frac{dF}{dy} \tag{2-6}$$

Donde  $y$  debe medirse en la dirección de  $F$  y en su punto de aplicación,  $k$  es una constante  $y$  se llama *constante de resorte*. En consecuencia, la ecuación (2-6) se escribe

$$k = \frac{F}{y} \tag{2-7}$$

Se observa que las ecuaciones (2-6) y (2-7) son completamente generales y se aplican del mismo modo en los casos de momentos de flexión o de torsión; pero en vez de  $y$  se emplean los desplazamientos angulares. En el caso de desplazamiento lineal las unidades de  $k$  son, lb/pulg o N/m, y para desplazamiento angular, lb-pulg/rad o N-m/rad.

Para obtener la ecuación de la deflexión en un resorte helicoidal se considerará un elemento de alambre determinado por dos secciones transversales próximas. La figura 2.3.2 muestra tal elemento, de longitud  $dx$ , separado de un alambre con diámetro  $d$ . Debe considerarse el segmento  $a b$  de la superficie del alambre y paralelo al eje del mismo.

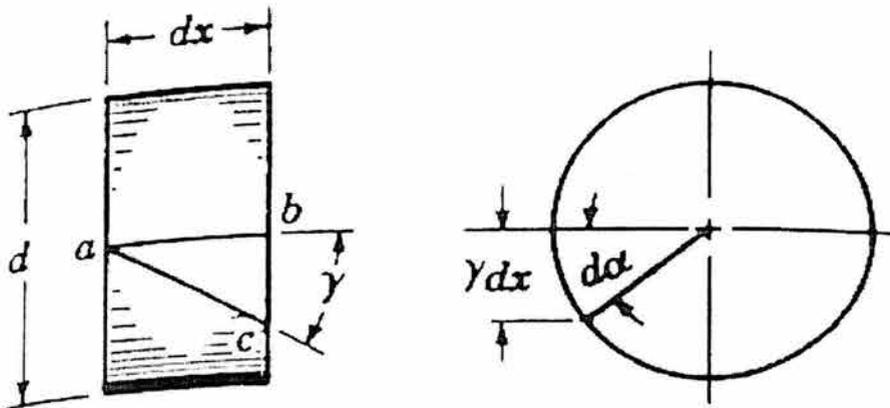


FIGURA 2.3.2 Elemento de alambre de un resorte helicoidal.

Debido a la carga, girará un ángulo  $\gamma$  hasta ocupar la nueva posición  $a c$ . De la ecuación  $\tau = G\gamma$ , que es la expresión de la ley de Hooke en el caso de torsión, se tiene

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{8FD}{\pi d^3 G} \quad (a)$$

donde  $\tau$  se obtiene de la ecuación (2-3), y se considera igual a la unidad el valor del factor de corrección de Wahl. La distancia  $b c$  es  $\gamma dx$  y el ángulo  $d\alpha$ , que gira una sección transversal con respecto a la otra, es

$$d\alpha = \frac{\gamma dx}{d} = \frac{2\gamma dx}{d} \quad (b)$$

Si el número de vueltas o espiras activas se representa por  $N$ , la longitud total del alambre será  $\pi DN$ . Si se sustituye de la ecuación (a) en la ecuación (b) y se integra, la desviación angular de un extremo del alambre con respecto al otro será

$$\alpha = \int_0^{\pi DN} \frac{2\gamma}{d} dx = \int_0^{\pi DN} \frac{16FD}{\pi d^4 G} dx = \frac{16FD^2 N}{d^4 G} \quad (c)$$

la carga F tiene un brazo de palanca de D/2 y, así, la deflexión será

$$y = \alpha \frac{D}{2} = \frac{8FD^3 N}{d^4 G} \quad (2-8)$$

Esta última también puede obtenerse por los métodos de energía y deformación. La energía de deformación en el caso de la torsión es

$$U = \frac{T^2 l}{2GJ} \quad (d)$$

Sustituyendo  $T = FD/2$ ,  $l = \pi DN$  y  $J = \pi d^4/32$

$$U = \frac{4F^2 D^3 N}{d^4 G} \quad (e)$$

y en consecuencia, la deflexión será

$$y = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3 N}{d^4 G} \quad (f)$$

Para hallar la constante del resorte hay que usar la ecuación (2-7) y sustituir el valor de y de la ecuación (2-8). Lo anterior da

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (2-9)$$

Las ecuaciones presentadas en esta sección son válidas para resortes de tensión y compresión. Los helicoidales largos que tengan una longitud libre de más de cuatro veces un diámetro pueden fallar por pandeo. Esta condición puede corregirse si se monta el resorte sobre una barra redonda o un tubo. La figura 2.3.3 sirve para decidir si un resorte de compresión puede fallar por pandeo.

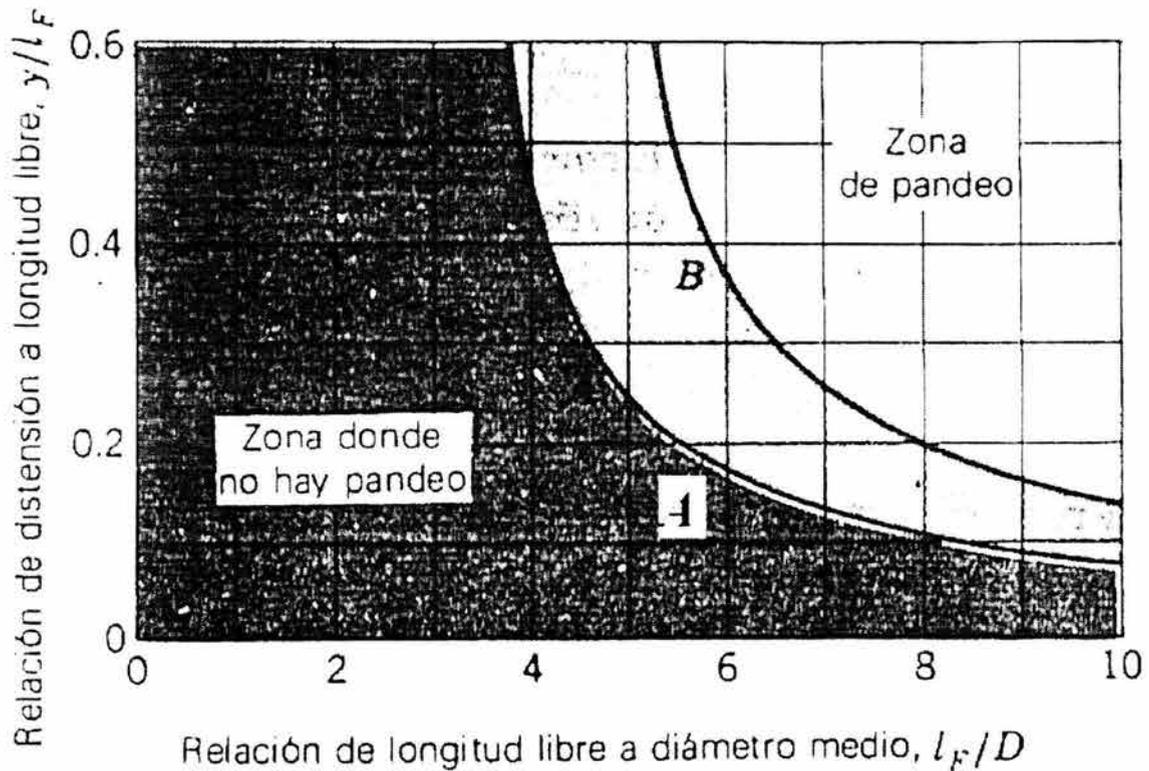


FIGURA 2.3.3 Curvas que indican cuándo puede producirse pandeo en resortes helicoidales de compresión. Ambas curvas son para resortes con extremos cerrados y aplanados. Para la curva A, un extremo del resorte se comprime contra una superficie plana y el otro contra una redondeada. Para la curva B ambos extremos del resorte se comprimen contra superficies planas y paralelas.

## 2.4 Diseño de Resortes Helicoidales

El diseño de un resorte nuevo comprende las siguientes consideraciones:

- El espacio en que debe adaptarse y operar.
- Valor de las fuerzas y las deflexiones que se producirán.
- Precisión y confiabilidad necesarias.
- Tolerancias y variaciones permisibles de las especificaciones.
- Condiciones ambientales, como temperatura y ambiente corrosivo.
- Costo y cantidades que se necesitan.

El diseñador utiliza estos factores a fin de seleccionar y especificar los valores adecuados para el tamaño de alambre, el número de espiras, el diámetro y la longitud libre, el tipo de extremos y el módulo de resorte necesario para satisfacer los requisitos de fuerza y alargamiento de trabajo.

En los párrafos siguientes se definen las numerosas variables que se emplean para describir y analizar el desempeño de los resortes helicoidales de compresión y que repercuten el diseño de estos.

### 2.4.1 Diámetros

La figura 2.4.1 muestra la notación que se utiliza para hacer mención a los diámetros característicos de resortes helicoidales de compresión.

El diámetro exterior (OD, por las siglas en inglés de Outside Diameter), el diámetro interior (ID, por las en inglés de Inside Diameter) y el diámetro del alambre ( $D_w$ ) son obvios y pueden medirse con instrumentos de medición estándar. Al calcular la tensión o esfuerzo y la deflexión de un resorte, se utiliza el diámetro medio,  $D_m$ . Observe que:

$$OD = D_m + D_w$$

$$ID = D_m - D_w$$

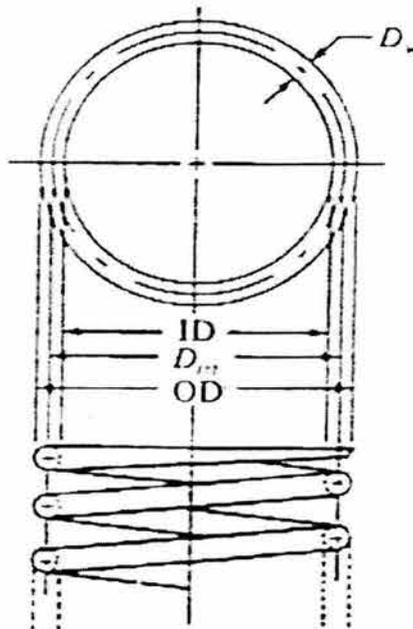


FIGURA 2.4.1 Notación para diámetros.

### 2.4.2 Diámetros estándar de alambre

La especificación del diámetro de alambre que se requiere es uno de los resultados más importantes del diseño de resortes. Existen distintos tipos de materiales que se utilizan, en general, en alambre para resortes, y el alambre se fabrica en piezas de diámetros estándar que abarcan un rango muy amplio. El tamaño del cable disminuye a medida que se incrementa el número de calibre.

### 2.4.3 Longitudes

Es importante comprender la relación entre la longitud del resorte y la fuerza que éste ejerce (véase la figura 2.4.3). La *longitud libre*,  $L_f$ , es la longitud que asume el resorte cuando no ejerce fuerza alguna, como si estuviera sobre una mesa en estado de reposo.

La longitud comprimido,  $L_s$ , se encuentra cuando el resorte está colapsado hasta el punto en el que todas las bobinas se encuentran en contacto entre sí. Como es obvio, esta es la longitud más reducida que puede presentar el resorte. Por lo general, el resorte no está comprimido totalmente cuando está en operación.

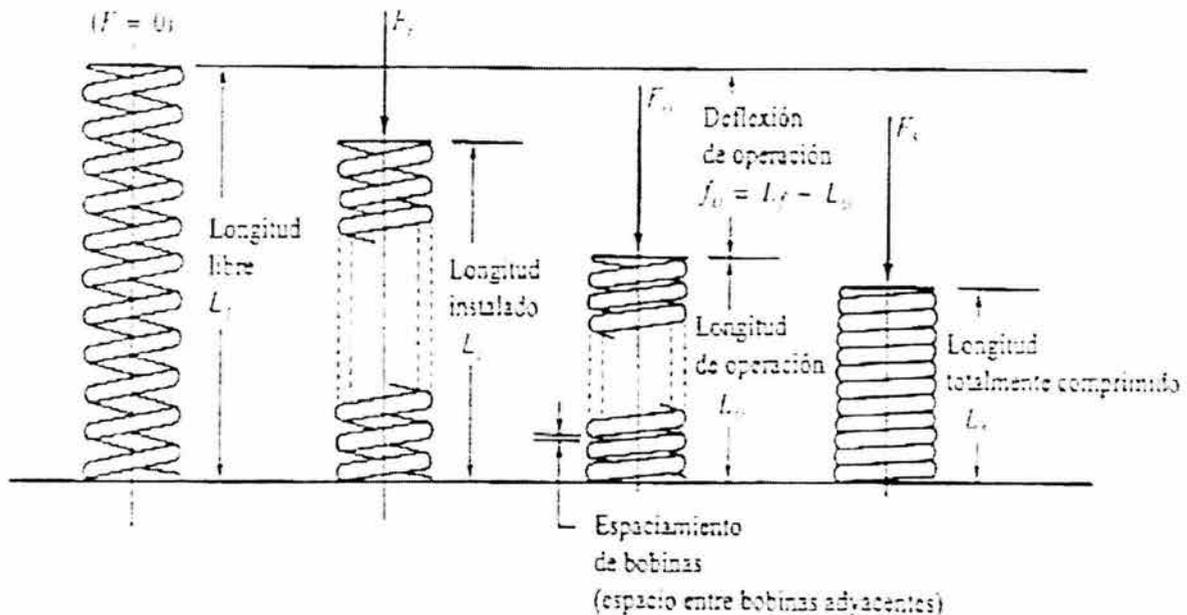


FIGURA 2.4.3 Notación para longitudes y fuerzas.

### 2.4.4 Fuerzas

Se utilizará el símbolo  $F$  para indicar las fuerzas que ejerce un resorte mediante varios subíndices para especificar qué nivel de fuerza se está considerando. Los subíndices corresponden a los que se utilizan para las longitudes.

$F_s$  = Fuerza en longitud comprimido,  $L_s$  : la fuerza máxima que se observa en el resorte.

$F_o$  = Fuerza en longitud de operación,  $L_o$  : la fuerza máxima que observa el resorte en operación normal.

$F_i$  = Fuerza en longitud instalado,  $L_i$  : la fuerza varía entre  $F_o$  y  $F_i$  para un resorte recíproco.

$F_f$  = Fuerza en longitud libre,  $L_f$  : esta fuerza es cero.

#### 2.4.5 Razón de resorte

La relación entre la fuerza ejercida por un resorte y su deflexión se denomina razón de resorte. Cualquier cambio en fuerza dividido entre el cambio correspondiente en deflexión puede utilizarse para calcular la razón de resorte.

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta L}$$

Por ejemplo,

$$k = \frac{F_o - F_i}{L_i - L_o}$$

o

$$k = \frac{F_o}{L_f - L_o}$$

o bien

$$k = \frac{F_i}{L_f - L_i}$$

además, si se conoce la razón de resorte, puede calcularse la fuerza a cualquier deflexión.

#### 2.4.6 Índice de resorte

La relación del diámetro medio del resorte con el diámetro del alambre se denomina *índice de resorte*, C.

$$C = \frac{D_m}{D_w}$$

Se recomienda que C sea mayor que 5.0, con resortes típicos para maquinaria que tiene valores de C que varían entre 5 y 12. Para C menor que 5, la formación del resorte será muy difícil y la deformación severa que se requiere puede generar fracturas en el resorte. Las tensiones o esfuerzos en los resortes dependen de C, y una C mayor contribuirá la tendencia al pandeo en el resorte.

### 2.4.7 Numero de bobinas

Al número total de bobinas en un resorte se le denominará  $N$ . Pero en el cálculo de esfuerzo y deflexiones para un resorte, algunas de las bobinas permanecen inactivas y se omiten. Por ejemplo, en un resorte con extremos lijados y a escuadra o sólo extremos a escuadra, cada extremo de bobina está inactivo y el número de bobinas activas,  $N_a$  es  $N - 2$ . Para bobinas en bruto,  $N_a = N$ . Para bobinas en bruto con extremos lijados,  $N_a = N - 1$ .

### 2.4.8 Espaciamento

El espaciamento,  $p$ , se refiere a la distancia axial de un punto en una bobina al punto correspondiente en la bobina adyacente siguiente. La relación entre el espaciamento, la longitud libre, el diámetro del alambre y el número de bobinas activas se da a continuación:

Extremos a escuadra y lijados:  $L_f = pN_a + 2D_w$

Sólo extremos a escuadra:  $L_f = pN_a + 3D_w$

Extremos en bruto y lijados:  $L_f = p(N_a + 1)$

Extremos en bruto:  $L_f = pN_a + D_w$

### 2.4.9 Ángulo de espaciamento

La figura 2.4.9 muestra el ángulo de espaciamento,  $\lambda$ , puede observarse que cuanto mayor sea el ángulo de espaciamento más empujadas estarán las bobinas. Casi todos los diseños prácticos de resortes producen un ángulo de menos de  $12^\circ$ , aproximadamente. Si el ángulo es mayor que  $12^\circ$ , se desarrollarán tensiones por compresión indeseables en el alambre. El ángulo de espaciamento puede calcularse mediante la fórmula:

$$\lambda = \tan^{-1} \left[ \frac{p}{\pi D_m} \right]$$

La lógica de esta fórmula puede observarse tomando una bobina de un resorte y desenrollándola sobre una superficie plana, como ilustra la figura 7-7. La línea horizontal es la circunferencia media del resorte y la línea vertical es el espaciamento,  $p$ .

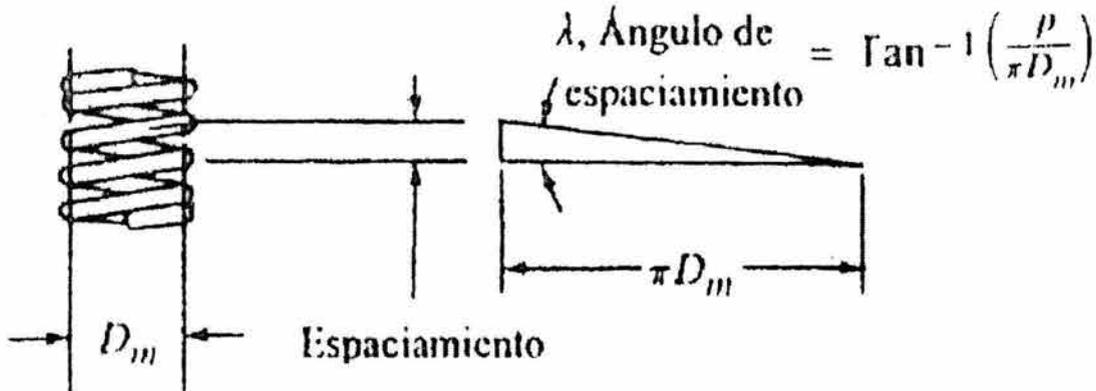


FIGURA 2.4.9 Angulo de espaciamento.

#### 2.4.10 Consideraciones de instalación

Con frecuencia, un resorte se instala en un orificio cilíndrico o alrededor de una varilla. Cuando se hace así, es necesario prever márgenes adecuados. Cuando un resorte de compresión se comprime, se incrementa su diámetro. Por tanto el diámetro interior de un orificio que contiene al resorte debe ser mayor que el diámetro exterior del resorte para evitar la fricción. Se sugiere un margen de diámetro inicial equivalente a 1/10 del diámetro del alambre para resortes que tienen un diámetro de 0.50" (12 mm) o mayor. Si se requiere una estimación más precisa del diámetro exterior real del resorte, puede utilizarse la fórmula siguiente para el OD en la condición de longitud comprimido:

$$OD_s = D_w + D_m^2 + \frac{P^2 - D_w^2}{\pi^2}$$

Si bien el diámetro interior (ID) del resorte se hace más grande, se sugiere también que el margen de ID sea  $0.1D_w$ .

Los resortes con extremos a escuadra o extremos lijados y a escuadra se montan, a menudo, en asientos tipo botón o en una camisa cuya profundidad es igual a la altura de unas cuantas bobinas con el fin de ubicar el resorte.

#### 2.4.11 Margen de bobina

El término margen de bobina se refiere al espacio entre bobinas adyacentes cuando el resorte se comprime hasta su longitud de operación,  $L_o$ . El margen de bobina real puede estimarse a partir de

$$cc = (L_o - L_s) N_a$$

Un parámetro consiste en que el margen de bobina debe ser mayor que  $Dw/10$ , sobre todo en resortes que soportan cargas cíclicas. Otra recomendación se relaciona con la deflexión total del resorte

$$(L_o - L_s) > 0.15(L_f - L_s)$$

#### **2.4.12 Materiales que se utilizan para fabricar resortes**

Los resortes se manufacturan mediante procesos de trabajo en frío o en caliente, dependiendo del tamaño del material, el índice de resorte y las propiedades deseadas. En general, el alambre pretemplado no debe utilizarse si  $D/d < 4$  o si  $d > 6$  mm ó  $\frac{1}{4}$  pulg. El devanado o enrollado de un resorte induce esfuerzos residuales por la flexión, pero éstos son perpendiculares a la dirección de los esfuerzos de trabajo torsionales en un resorte helicoidal. Con frecuencia, en la fabricación de resortes tales esfuerzos al enrollado se eliminan por medio de un tratamiento térmico suave.

Se dispone de muy diversos materiales para diseños de resortes, inclusive los aceros al carbono simples, aleados y resistentes a la corrosión, así como materiales no ferrosos, como bronce fosforado, latón para resortes, cobre-berilio y diversas aleaciones de níquel. En la tabla 2.4.12 se tienen descripciones de los aceros más comúnmente utilizados.

#### **2.4.13 Tipos de carga y esfuerzos permisibles**

La tensión permisible que puede utilizarse en un resorte depende del tipo de carga, del material con que se fabrique y del tamaño del alambre. Por lo regular, la carga se clasifica en tres tipos:

*Servicio ligero:* Cargas estáticas hasta de 10,000 ciclos de carga con una tasa baja de carga (sin impacto).

*Servicio promedio:* Situaciones de diseño típicas para maquinaria; tasa de carga moderada y hasta un millón de ciclos.

*Servicio severo:* Ciclaje rápido para más de un millón de ciclos; posibilidad de carga por impacto o choque; los resortes para válvulas de motores son un buen ejemplo.

#### **2.4.14 Tensiones**

Conforme un resorte se comprime bajo una carga axial, el alambre se tuerce. Por consiguiente el esfuerzo que se desarrolla en el alambre es *tensión por esfuerzo de corte por torsión*, y puede derivarse de la ecuación clásica:

$$\tau = Tc J$$

Tabla 2.4.12 Materiales para resortes

Tipo de material	No. ASTM	Límites de temperatura	Descripción
<b>Aceros al alto carbon</b>			
<i>Extruido en frío</i>	A227	0-250	Acero para uso general con 0.60% a 0.70% de carbón; bajo costo.
<i>Alambre para instrumentos musicales</i>	A228	0-250	Acero de alta calidad con 0.80% a 0.95% de carbón; muy alta resistencia; excelente acabado superficial; extruido duro; buen rendimiento en cuanto a fatiga; se usa sobre todo en tamaños pequeños de hasta 0.125"
<i>Templado en aceite</i>	A229	0-350	Acero de uso general con 0.60% a 0.70% de carbón; se utiliza sobre todo en tamaños grandes por arriba de 0.125"; no es bueno para choque o impacto.
<b>Aceros con aleación</b>			
<i>Cromo y vanadio</i>	A231	0-425	Buena resistencia, resistencia a la fatiga, resistencia al impacto, rendimiento de alta temperatura; calidad de resortes para válvulas
<i>Cromo y silicio</i>	A401	0-475	Muy alta resistencia y buena resistencia a la fatiga y al choque
<b>Aceros inoxidables</b>			
<i>Tipo 302</i>	A313(302)	<0-550	Muy buena resistencia a la corrosión y rendimiento a alta temperatura; casi amagnético; extruido en frío; los tipos 304 y 316 también caen en esta categoría ASTM tienen mayor susceptibilidad para ser trabajados pero su resistencia es más baja
<i>Tipo 17-7 PH</i>	A313(631)	0-600	Buen rendimiento a alta temperatura
<b>Aleaciones de cobre</b>			
<i>Latón para resortes</i>	B134	0-150	Todas tienen una buena resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica
<i>Bronce con fósforo</i>	B159	<0-212	
<i>Cobre con berilio</i>	B197	0-300	
<b>Aleaciones con base de níquel,</b>			
<i>Monel</i>			Todas son resistentes a la corrosión, tienen buenas propiedades de alta y baja temperatura, son amagnéticos o casi amagnéticos.
<i>K-Monel</i>			
<i>Inconel</i>			
<i>Inconel-X</i>			

Fuente: Associated Spring Barnes Group Inc., Engineering Guide to Spring Design, Bristol, Conn., 1987; Carlson, Harold. Spring Designer's Handbook. Nueva York: Marcel Dekker, 1978; Oberg E., et al. Machinery's Handbook, 23a edición. Nueva York: Industrial Press, 1988

Cuando se aplica en particular a un resorte helicoidal de compresión, se requieren algunos factores a los cuales se atribuirá la curvatura del alambre del resorte y la tensión por esfuerzo de corte directo que se genera a medida que las bobinas oponen resistencia a la carga vertical.

Asimismo, conviene expresar la tensión por esfuerzo de corte en términos de las variables de diseño que se encuentran en los resortes. La ecuación resultante para la tensión se atribuye a Wahl. La tensión máxima por esfuerzo de corte, que se presentará en la superficie interna del alambre es

$$\tau = \frac{8KFD_m}{\pi D_w^3} = \frac{8KFC}{\pi D_w^2}$$

Como lo demuestra la definición de  $C = D_m / D_w$  estas son dos formas de la misma ecuación. Puede calcularse la tensión por esfuerzo de corte para cualquier fuerza aplicada,  $F$ . En condiciones normales, resultaría de interés la tensión o esfuerzo cuando el resorte se comprime hasta su longitud comprimido bajo la influencia de  $F_s$  y cuando el resorte está operando a su carga máxima normal,  $F_o$ .

Observe que la tensión es igual al diámetro del alambre *elevado al cubo*. Estos ilustran el impacto significativo que sufre el tamaño del alambre en el rendimiento del resorte.

El factor de Wahl, K, en la ecuación anterior es el término al que se atribuye la curvatura del alambre y la tensión por esfuerzo de corte directo. En términos analíticos, K está relacionada con C:

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C}$$

La figura 2.4.14 muestra una gráfica de K contra C para alambre redondo. Recuerde que C = 5 es el valor mínimo que se sugiere para C. El valor de K se incrementa con rapidez para C < 5.

#### **2.4.15 Deflexión**

Debido a que la manera principal en que se carga el alambre de un resorte helicoidal de compresión es por torsión, la deflexión se calcula a partir de la fórmula de ángulo de combadura,

$$\theta = TL / GJ$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de combadura en radianes,  $T$  es el torque aplicado,  $L$  la longitud del alambre,  $G$  es el módulo de elasticidad del material ante esfuerzo de corte y  $J$  es el momento de inercia polar de alambre.

De nuevo, por conveniencia, utilizaremos una forma diferente de la ecuación para calcular la deflexión lineal,  $f$ , del resorte a partir de las variables típicas de diseño del resorte. La ecuación resultante es

$$f = \frac{8FD_m^3 N_a}{GD_w^4} = \frac{8FC^3 N_a}{GD_w}$$

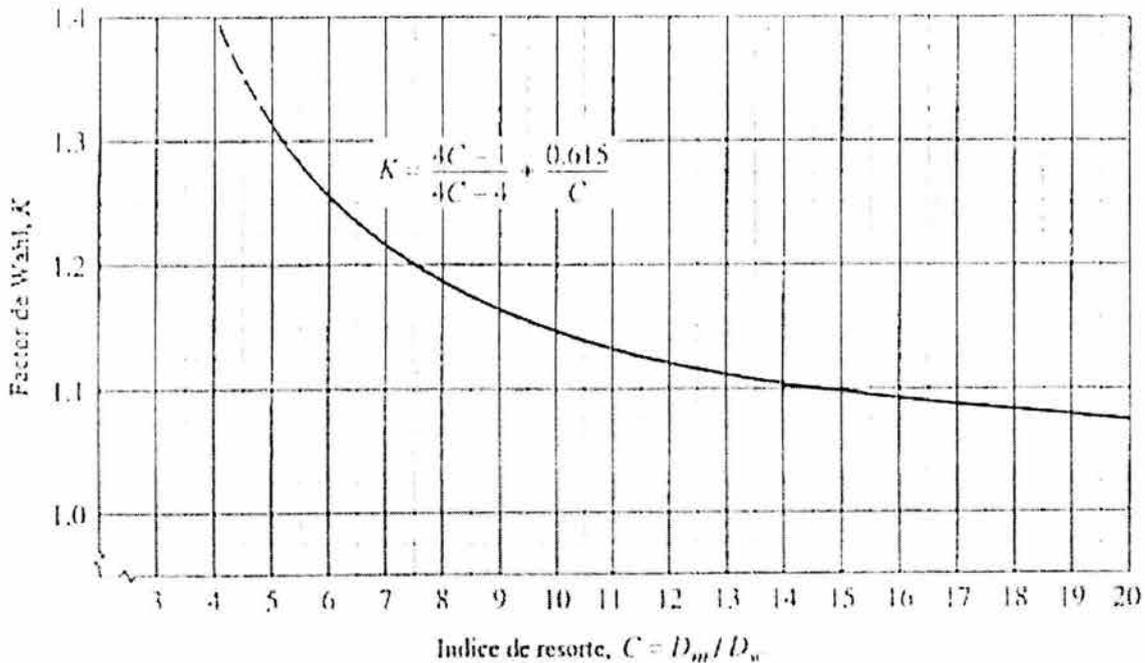


FIGURA 2.4.14 Factor de Wahl contra índice de resorte para alambre redondo.

Recuerde que  $N_a$  es número de bobinas *activas*. Obsérvese en la ecuación anterior que el diámetro del alambre surte un impacto significativo en el rendimiento del resorte.

### 2.4.16 Pandeo

La tendencia a pandearse en un resorte se incrementa conforme éste es más alto y delgado. La figura 2.4.16 muestra gráficas de la razón o relación crítica de deflexión hasta la longitud libre contra la razón de longitud libre respecto al diámetro medio para el resorte. En la figura se describen tres condiciones distintas en los extremos.

El objetivo del diseño de resortes helicoidales de compresión consiste en especificar la geometría del resorte para que opere bajo límites específicos de carga y deflexión, quizá también con limitaciones de espacio. El material y tipo de servicio se especificarán considerando el ambiente y la aplicación.

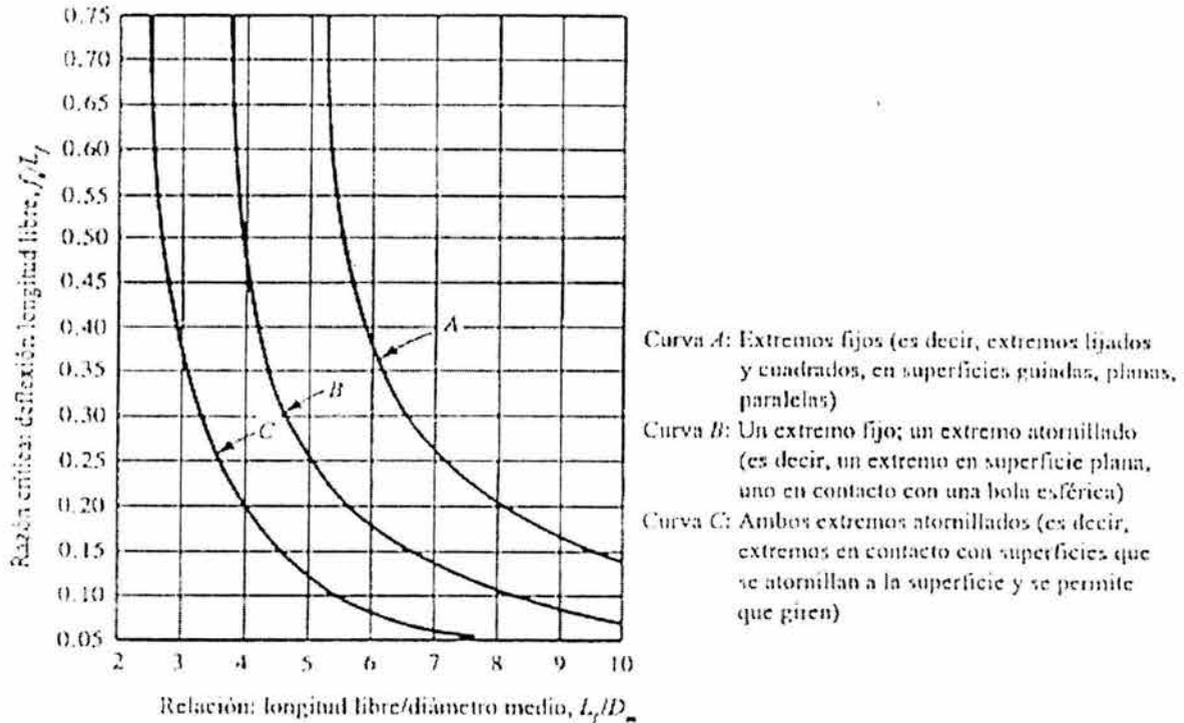


FIGURA 2.4.16 Criterio para pandeo de resortes. Si la relación real de  $f_0/L_f$  es mayor que la relación crítica, el resorte se pandeará al someterse a deflexión de operación.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo se diseña un resorte.

*Un resorte helicoidal de compresión debe ejercer una fuerza de 35.58 N cuando se comprime a una longitud de 44.45 mm. A una longitud de 31.75 mm, la fuerza debe ser 53.38 N. El resorte se instalará en una máquina que cumple ciclos con lentitud, y aproximadamente se esperan 200,000 ciclos en total. La temperatura no excederá los 200° F. Se contempla instalar el resorte en un orificio cuyo diámetro es de 19.05 mm.*

*Especifique un material adecuado para esta aplicación, diámetro del alambre, diámetro medio, OD, ID, longitud libre, longitud comprimido, número de bobinas y tipo de condición en los extremos. Verifique la tensión en la carga máxima de operación y la condición de longitud comprimido.*

El procedimiento se enfoca directamente hacia la geometría del resorte a nivel gerencial especificando el diámetro medio que satisface las limitaciones en cuanto a espacio. El proceso exige que el responsable del diseño disponga de tablas con información relativa a diámetros de alambre, y tensiones de diseño para el material con que se va a fabricar el resorte.

Es necesario hacer una estimación inicial para las tensiones de diseño consultando las gráficas de las mismas contra diámetro de alambre para tomar una decisión razonada.

**Paso 1.** Especifique el material y su módulo de elasticidad ante esfuerzo de corte,  $G$ .

Para este problema pueden utilizarse varios materiales estándar para fabricar resortes. Optemos por alambre de acero ASTM A231 con aleación de cromo y vanadio, cuyo valor de  $G$  es igual a  $77,212.64 \text{ N/mm}^2$ .

**Paso 2.** A partir del enunciado del problema, identifique la fuerza en operación,  $F_o$ ; la longitud en operación a la que debe ejercerse esa fuerza,  $L_o$ ; la fuerza a alguna otra longitud, que se denomina *fuerza instalado*,  $F_i$ ; y la longitud,  $L_i$ .

Recuerde que  $F_o$  es la fuerza máxima que experimenta el resorte bajo condiciones normales de operación. Muchas veces, no se especifica el segundo nivel de fuerza. En tal caso, sea  $F_o = 0$  y especifique un valor de diseño para la longitud libre,  $L_f$ , en lugar de  $L_i$ .

Para este problema  $F_o = 53.38 \text{ N}$ ;  $L_o = 31.75 \text{ mm}$ ;  $F_i = 35.58 \text{ N}$ ; y  $L_i = 44.45 \text{ mm}$

**Paso 3.** Calcule la razón de resorte,  $k$ :

$$k = \frac{F_o - F_i}{L_i - L_o} = \frac{53.38 - 35.58}{44.45 - 31.75} = 1.402 \text{ N/mm}$$

**Paso 4.** Calcule la longitud libre,  $L_f$ :

$$L_f = L_i + F_i / k = 44.45 \text{ mm} + [(35.58 \text{ N} / 1.402 \text{ N/mm})] = 69.85 \text{ mm}$$

El Segundo término en la ecuación anterior es la cantidad de deflexión a partir de la longitud libre hasta la longitud de instalado para poder desarrollar la fuerza  $F_i$  instalado. Desde luego, este paso no es necesario si en la información original se especifica la longitud libre.

**Paso 5.** Especifique un estimado inicial para el diámetro,  $D_m$ .

Teniendo en mente que el diámetro medio será más pequeño que el diámetro externo y más grande que el diámetro interior, es necesario empezar a aplicar el criterio. Para este problema especifiquemos  $D_m = 15.24mm$ . Esto debe permitir que se instale en el orificio con 19.05 mm de diámetro.

**Paso 6.** Especifique una tensión de diseño inicial.

Consulte las gráficas para las tensiones de diseño de los materiales seleccionados, considerando a su vez, el servicio. En este problema debe utilizarse el servicio promedio. Así, para el acero ASTM A231, una tensión de diseño nominal sería 896.22 N/mm<sup>2</sup>. Estrictamente, este es un estimado que se basa en la resistencia del material. El proceso incluye verificar la tensión más adelante.

**Paso 7.** Calcule el diámetro del alambre para la prueba despejando  $D_w$ , de la ecuación de tensión vista anteriormente.

Observe que se conoce todo lo demás en la ecuación excepto el factor de Wahl, K, porque depende del propio diámetro del alambre. Pero K varía poco a lo largo del rango de índices de resorte, C. En la figura 2.4.14 es posible observar que K = 1.2 es el valor nominal.

Con el valor que se supuso para K, es posible simplificar en alguna medida

$$D_w = \left[ \frac{8KF_o D_m}{\pi \tau_d} \right]^{1/3} = \left[ \frac{(8)(1.2)(F_o)(D_m)}{(\pi)(\tau_d)} \right]^{1/3}$$

Al combinar las constantes se obtiene

$$D_w = \left[ \frac{8KF_o D_m}{\pi \tau_d} \right]^{1/3} = \left[ \frac{(3.06)(F_o)(D_m)}{\tau_d} \right]^{1/3}$$

Para este problema

$$D_w = \left[ \frac{(3.06)(F_o)(D_m)}{\tau_d} \right]^{1/3} = \left[ \frac{(3.06)(53.38)(15.24)}{896.22} \right]^{0.333}$$

$$D_w = 1.405 \text{ mm}$$

**Paso 8.** Seleccione un diámetro de alambre estándar de las tablas, luego determine la tensión de diseño y la tensión máxima tolerable para el material con ese diámetro. En condiciones normales, la tensión de diseño será para servicio promedio, a menos que tasas altas de ciclaje o choque indiquen que se garantiza servicio severo. La curva de servicio ligero debe utilizarse con cuidado porque se acerca mucho a la resistencia a punto cedente. En realidad, utilizaremos la curva de servicio ligero como estimación del esfuerzo o tensión máxima permisible.

Para este problema, el tamaño de alambre estándar siguiente es 1.5875 mm, número 16 en la tabla de alambre estándar U.S. Steel. Para este tamaño el alambre de acero ASTM A231 tiene una tensión de diseño es 999.62 N/mm<sup>2</sup> aproximadamente para servicio promedio y que la tensión máxima permisible es 1171.97 N/mm<sup>2</sup> a partir de la curva de servicio ligero.

**Paso 9.** Calcule los valores reales de C y K, el índice de resorte y el factor de Wahl

$$C = \frac{D_m}{D_w} = \frac{15.24}{1.5875} = 9.60$$

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} = \frac{4(9.60) - 1}{4(9.60) - 4} + \frac{0.615}{9.60} = 1.15$$

**Paso 10.** Calcule la tensión real que se espera debido a la fuerza de operación, Fo, a partir de la ecuación de tensión.

$$\tau_o = \frac{8KF_o D_m}{\pi D_w^3} = \frac{(8)(1.15)(53.38)(15.24)}{(\pi)(1.5875)^3} = 595.46 \text{ N/mm}^2$$

Al comparar esto con la tensión de diseño de 992.62 mm<sup>2</sup> vemos que es segura.

**Paso 11.** Calcule el número de bobinas activas que se necesitan para darle las características de deflexión adecuadas al resorte.

$$f = \frac{8FC^3 N_a}{GD_w}$$

despejando  $N_a$ , tenemos

$$N_a = \frac{fGD_w}{8FC^3} = \frac{GD_w}{8kC^3} \quad (\text{Nota: } F/f = k, \text{ la razón del resorte})$$

Por consiguiente, para este problema

$$N_a = \frac{GD_w}{8kC^3} = \frac{(77212.64)(1.5875)}{(8)(1.402)(9.60)^3} = 12.36 \text{ bobinas}$$

Observe que  $k = 1.402 \text{ N/mm}$  es la razón del resorte. No confundirlo con  $K$ , el factor de Wahl.

**Paso 12.** Calcule la longitud comprimido,  $L_s$ ; la fuerza en el resorte en longitud comprimido,  $F_s$ ; y el esfuerzo o tensión en el resorte en longitud comprimido,  $\tau_s$ . Este cálculo dará la tensión máxima que recibirá el resorte.

La longitud de comprimido se presenta cuando todas las bobinas se tocan entre sí, no obstante recuerde que hay dos bobinas inactivas.

$$L_s = D_w (N_a + 2) = 1.5875(14.36) = 22.8 \text{ mm}$$

La fuerza en longitud comprimido es el producto de la razón del resorte por la deflexión de longitud comprimido ( $L_f - L_s$ )

$$F_s = k(L_f - L_s) = (1.402 \text{ N/mm})(69.85 - 22.8) \text{ mm} = 65.9 \text{ N}$$

Como la tensión o esfuerzo en el resorte es directamente proporcional a la fuerza, un método sencillo para calcular el esfuerzo en longitud estando totalmente comprimido es

$$\tau_s = (\tau_o)(F_s / F_o) = (595.46 \text{ N/mm}^2)(65.9 \text{ N} / 53.38 \text{ N}) = 735.12 \text{ N/mm}^2$$

Cuando esto se compara con la tensión máxima permisible, 1171.97 N/mm, es segura y el resorte no presentará cedencia cuando se comprima hasta su longitud estando totalmente comprimido.

**Paso 13.** Termine los cálculos de características geométricas y compárelos con limitaciones de espacio y de operación:

$$OD = D_m + D_w = 15.24 + 1.5875 = 16.83mm$$

$$ID = D_m - D_w = 15.24 - 1.5875 = 13.66mm$$

Estas características son satisfactorias para instalación en un orificio cuyo diámetro es de 19.05mm.

Este procedimiento pone fin al diseño de un resorte aceptable para esta aplicación. Quizá sea recomendable realizar otras pruebas para intentar encontrar un resorte que se acerque más a lo óptimo.

## **2.5 Funcionamiento de una Suspensión Elástica**

### **2.5.1 Funcionamiento Estático.**

Una suspensión elástica permite una mejor distribución de las cargas estáticas.

Si una máquina reposa sobre sus apoyos con contacto "sólido" en más de tres puntos, es imposible prever las cargas que soporta cada punto (el montaje es hiperestático). Con soportes elásticos cuyas características de rigidez son conocidas, se puede determinar (calculando e incluso midiendo directamente) las deformaciones de cada uno de ellos, deducir las cargas y corregir las anomalías de carga.

Una suspensión elástica absorbe sin dificultad las pequeñas diferencias entre ejes de fijación. Cualquiera que sea el número de fijaciones, un montaje rígido por pernos, por ejemplo, exige, para evitar tensiones locales exageradas, una concordancia exacta entre ejes y superficies de apoyo de la máquina y de su asiento.

Para evitar tolerancias de fabricación prohibitivas, se ha llegado a admitir juegos cuyos inconvenientes son bien conocidos (aflojamiento, pulido, desgaste, ruido). Los soportes elásticos, mediante esfuerzos despreciables, permiten tolerancias de fabricación.

Una suspensión elástica absorbe sin tensiones peligrosas, pequeños desplazamientos. Estos pequeños desplazamientos pueden ser provocados, por ejemplo por dilatación térmica o deformaciones de chasis, apoyos, armazones, etc.

### 2.5.2 Funcionamiento Dinámico.

Es el papel fundamental de las suspensiones elásticas, en el caso de las vibraciones o choques.

Los cálculos presentados suponen que las rigideces lineales de las suspensiones se mantienen constantes, lo que es cierto para las suspensiones elásticas a base de elastómero en condiciones normales de utilización (vibraciones mecánicas, temperatura normal).

*Ejemplo de vibraciones con un solo grado de libertad.*

La acción de una suspensión es muy compleja. Para hacernos una idea, vamos a analizar un ejemplo esquemático simple (Fig. 1). Consideremos el caso de una máquina de masa  $M$ , obligada a no poder desplazarse mas que paralelamente al eje vertical  $Gz$ . Está sujeta a su base a través de una suspensión elástica  $S$ , cuya rigidez según  $Gz$  es  $K$ .

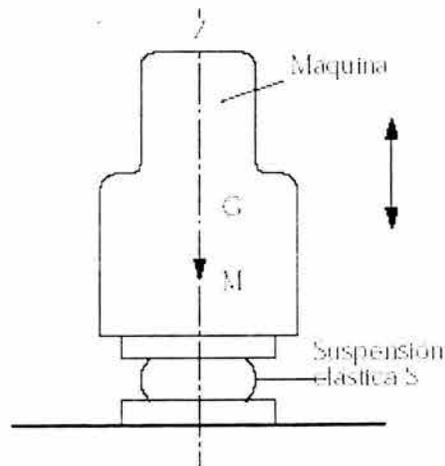


Fig. 1

- OSCILACIÓN LIBRE (PROPIA O NATURAL)

a) Sin amortiguamiento (ejemplo teórico).

La máquina, desplazada de su posición de equilibrio una cantidad  $A$ , oscilará según una ley sinusoidal.

Ecuación de movimiento:  $z = A \sin \omega_o t$

Pulsación propia:  $\omega_o = \frac{K}{M}$

Frecuencia propia:  $Fp = \frac{\omega_o}{2\pi}$

La oscilación sigue indefinidamente con amplitudes máximas iguales a  $A$  (el fenómeno se representa en la curva de la Fig. 2, en la cual  $\omega$  será sustituida por  $\omega_o$ )

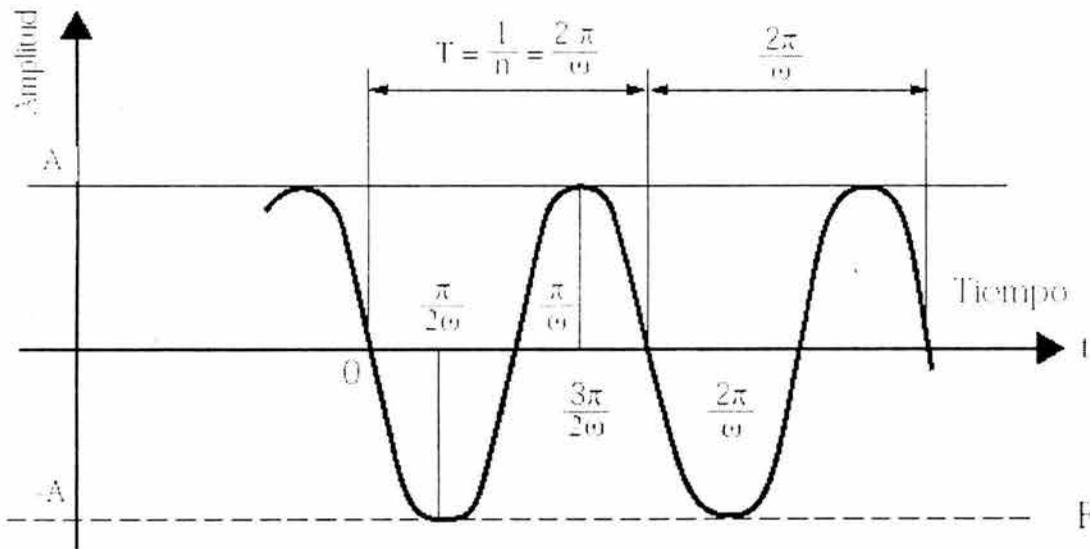


Fig. 2

b) Con amortiguamiento

En este caso, la máquina oscilará alrededor de su posición de equilibrio según una ley sinusoidal amortiguada y representada en la Fig. 3.

Ecuación de movimiento:  $z = Ae^{-\dot{\epsilon}_o \omega_o t} \text{sen} \dot{\omega}_o t$

Pulsación propia:  $\dot{\omega}_o = \frac{K}{M} (1 - \dot{\epsilon}_o^2) = \omega_o \sqrt{1 - \dot{\epsilon}_o^2}$

$\dot{\epsilon}_o$  es la tasa de amortiguamiento a la pulsación  $\dot{\omega}_o$ .

De hecho  $\dot{\epsilon}_o$  está muy próximo a  $\epsilon_o$ , luego la pulsación propia puede entonces expresarse:

$$\dot{\omega}_o \equiv \omega_o \sqrt{1 - \dot{\epsilon}_o^2}$$

En el caso del caucho natural,  $\epsilon_o$  es muy pequeño frente a 1 (de 0.02 a 0.1).

Por lo que  $\dot{\omega}_o$  está muy próximo a  $\omega_o$ .

• VIBRACIÓN FORZADA

Supongamos ahora que la máquina está sometida a una vibración vertical forzada que le impone un esfuerzo alternativo sinusoidal de pulsación  $\omega$ .

Esfuerzo perturbador:  $F = F_M \text{sen} \omega t$

- *Caso de una suspensión rígida:* El esfuerzo perturbador se transmitirá íntegramente a la base de la máquina.
- *Caso de una suspensión elástica:* Caracterizada por su pulsación propia  $\omega_0$  y su tasa de amortiguamiento característica  $\epsilon_0$ .

La aparición de una vibración forzada de pulsación  $\omega$  excita la vibración propia de pulsación  $\omega_0$ .

Esta última se amortigua muy rápidamente, de manera que, en poco tiempo, sólo permanece en régimen permanente la vibración forzada de pulsación  $\omega$  que transmite a sus apoyos un esfuerzo sinusoidal. Esfuerzo transmitido:  $F = F_M \text{sen} \omega t$

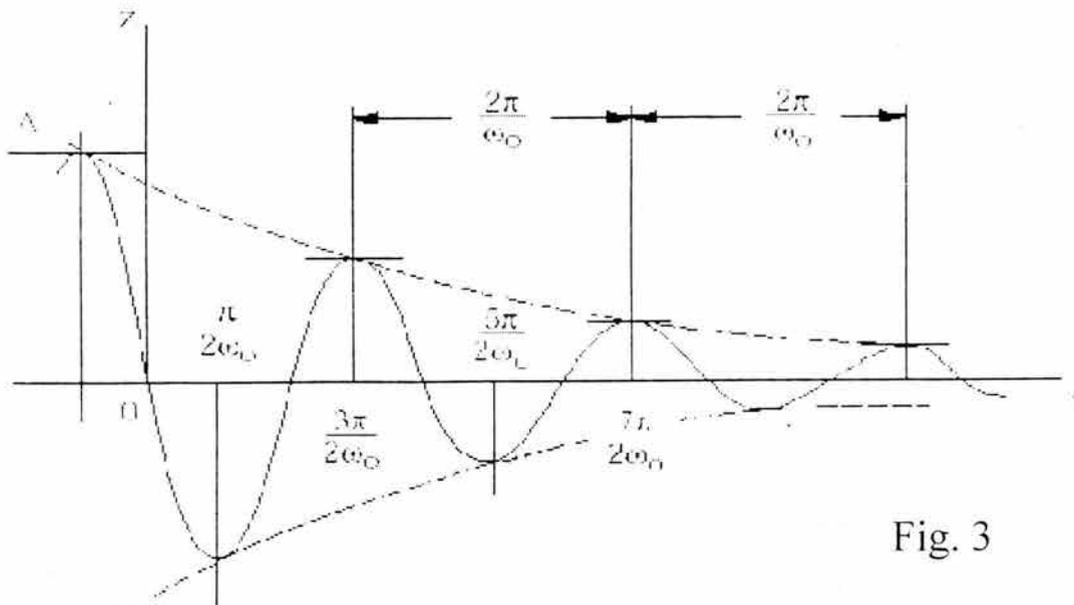


Fig. 3

Se define entonces el coeficiente de transmisión  $\lambda$  que es la relación entre el esfuerzo máximo transmitido  $F_M$  y el esfuerzo máximo perturbador  $F_M$  (o si se quiere sobre el esfuerzo que será transmitido si no hubiera suspensión elástica).

En el caso de una suspensión elástica de elastómero, el valor de este coeficiente es:

$$\lambda = \frac{F'_M}{F_M} = \frac{1 + 4\varepsilon_o^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}\right) + 4\varepsilon_o^2}$$

En resumen:

	Suspensión rígida	Suspensión elástica ( $\omega_o, \varepsilon_o$ )
Esfuerzo Perturbador	$F = F_M \text{ sen } \omega t$	$F = F_M \text{ sen } \omega t$
Esfuerzo Transmitido	$F = F_M \text{ sen } \omega t$	$F' = F'_M \text{ sen } \omega t$
Coefficiente de Transmisión	$\lambda = 1$	$\lambda = \frac{F'_M}{F_M} = \frac{1 + 4\varepsilon_o^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}\right) + 4\varepsilon_o^2}$

Las variaciones del coeficiente de transmisión  $\lambda$ , en función de la relación  $\frac{\omega}{\omega_o}$  y para diversos valores de  $\varepsilon_o$ , se representan en la figura 4.

Para obtener una buena suspensión, se tomará:

$\frac{\omega}{\omega_o}$  elevado  $\longrightarrow$   $\omega_o$  pequeño  $\longrightarrow$   $\lambda$  pequeño

$\varepsilon_o$  moderado  $\longrightarrow$  - amplificación limitada en el momento de paso por la resonancia.  
- poco influyente en la zona de aislamiento vibratorio.

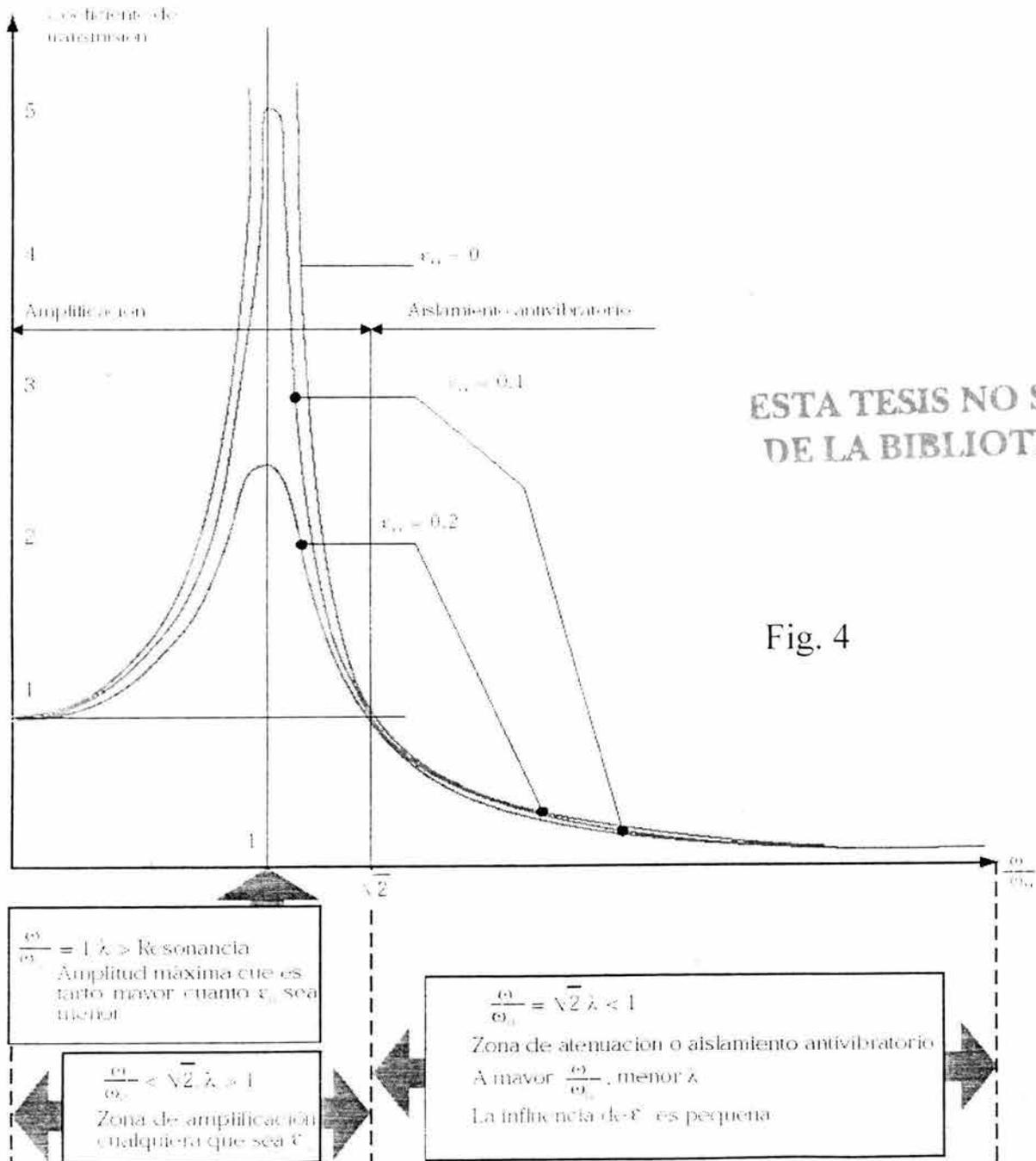
### Atenuación

Para los soportes de elastómero, el término  $4\varepsilon_o^2$  es despreciable frente a 1. La atenuación expresada en % es el complemento a 100 del coeficiente de transmisión  $\lambda$ , es decir:

$$E\% = 100 \left( \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 - 2}{\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 - 1} \right) \quad \text{ó} \quad 100 \left( 1 - \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 - 1} \right)$$

Para una frecuencia de excitación dada  $\omega$ , la atenuación depende de la frecuencia propia  $\omega_o$  de la suspensión.

Para una dirección determinada, las relaciones entre la frecuencia propia, la sub-tangente de la suspensión y la frecuencia de excitación se representan en el ábaco de la Fig. 5. A partir de la frecuencia de excitación (por ejemplo 1500 rpm) se intenta determinar la sub-tangente de la suspensión para tener una atenuación aceptable. En general, se tratará de conseguir una atenuación superior al 50%. El ábaco permite encontrar, para el ejemplo escogido, una atenuación del 80% para una sub-tangente de 2.6mm.



***CAPITULO III.***

***DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL  
RODANTE DEL S.T.C. METRO***

### 3.1 *Concepto de Tren*

Es el conjunto de carros, cuyas características se complementan, unidos por medio de acopladores apropiados con el propósito de transportar usuarios en forma rápida y segura.

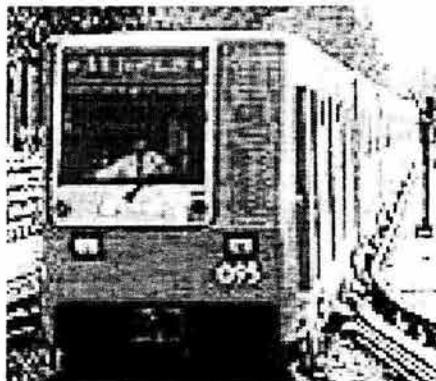
En la formación de los trenes utilizados en el Sistema de Transporte Colectivo (METRO) de la Ciudad de México, se cuenta con tres diferentes tipos de carros, los cuales están unidos entre sí en forma mecánica, eléctrica y neumática.

Los carros que forman un tren son de tres tipos básicos:

M Carros motrices con cabina

N Carros motrices sin cabina

R Carros remolques



### 3.2 *Formación de Elementos*

Los trenes están formados por grupos de tres carros, cada grupo se le denominan elemento. Cada elemento consta de dos carros motrices y un remolque.

Los trenes que se utilizan actualmente, están formados por nueve carros y podemos distinguir dos tipos de elementos:

*M R N* Llamado elemento extremo o de conducción, por la presencia de la motriz M.

*N R N* Llamado elemento intermedio.

### 3.2.1 Características de los carros

#### a) Motrices M y N

Son cajas rectangulares de acero, con ventanas y puertas, y cuentan en la parte media inferior externa, con los equipos que aseguran el funcionamiento de los equipos tradicionales; tales como: interruptores, combinador de arranque, servo motores, etc.

En cada extremo de la parte inferior externa, los motrices cuentan con una CARRETILLA MOTORA, la cual sostiene la caja y cuenta con dos motores de tracción.

Los motores de tracción de las carretillas motoras, toman la corriente necesaria para su funcionamiento mediante dos ESCOBILLAS POSITIVAS replegables, colocadas a ambos lados de la parte media externa de la carretilla.

Además de esas escobillas, hay también en cada carretilla motora DOS ESCOBILLAS fijas. En la carretilla motora delantera, esas escobillas son de tierra o masa, y en la carretilla motora trasera son escobillas NEGATIVAS. Las cuales están colocadas en la parte media inferior de la carretilla.

**Las escobillas positivas**, tienen por función tomar la corriente de la barra guía para alimentar a los motores de tracción y equipo instalado a lo largo del tren.

**Las escobillas negativas** cierran el circuito eléctrico iniciado por las escobillas positivas y aseguran el funcionamiento de las señales de espaciamiento y maniobra al corto-circuitar el riel de seguridad.

**Las escobillas de tierra o masa** tienen por función eliminar la corriente estática y al cortocircuitar el riel de seguridad, aseguran también el funcionamiento de las señales de ESPACIAMIENTO Y MANIOBRA.

#### b) Las Carretillas Motoras

Cuenta con 3 diferentes tipos de llantas o ruedas y están distribuidas de la siguiente forma:

- Ruedas guías (4). Colocadas en los extremos, en los brazos solidarios a la misma, estas ruedas son neumáticas y de menor tamaño que las otras, quedan paralelas a la vía y tienen por función orientar la carretilla sobre el eje de la misma apoyándose en la barra guía.

- Llantas portadoras (4). Las cuales también son neumáticas, están colocadas en los extremos de los ejes de los motores de tracción y quedan perpendiculares a la vía; teniendo por función transportar el tren sobre la pista de rodamiento.

Las cuatro ruedas restantes son las RUEDAS DE SEGURIDAD, las cuales van colocadas junto a las llantas portadoras; estas ruedas son de acero y tienen por función:

- Suplir a las llantas portadoras cuando éstas sufren una pérdida de presión; o el tramo de vía carece de pista de rodamiento, como en los talleres de material rodante.
- Suplir a las ruedas guías; cuando éstas pierden presión o bien cuando en la vía no existe barra guía, como en el caso de los aparatos de vía.
- Al accionar el freno neumático las zapatas son presionadas sobre el área de rodamiento de la rueda de seguridad, disminuyendo la velocidad del tren.

### c) Los Remolques

A diferencia de las motrices, tienen instalados en su parte media inferior externa los equipos auxiliares como son:

El compresor, la batería y el grupo motor generador; sus carretillas se llaman portadoras, carecen de motores de tracción por lo tanto no cuentan con escobillas positivas ni negativas; solo cuentan con escobillas de tierra, en lo restante las carretillas portadoras son iguales a las carretillas motoras.

Los remolques son alimentados con 750 volts CC por la motriz N alimentadora.

De los equipos con que cuenta el remolque, el compresor provee al tren del aire comprimido necesario para el funcionamiento del frenado neumático y el servicio de puertas, etc.

La batería está compuesta de 50 celdas conectadas en serie, proporciona corriente continua a los circuitos que trabajan con baja tensión como son: encendido del tren, alumbrado de emergencia, timbres, etc.

### 3.3 Unión entre carros

Cada carro del tren es unido a otro carro mediante una unión electromecánica-neumática llamada **enganche tipo Sharfenberg** en cuya parte interior encontramos:

- Un gancho, mediante el cual se efectúa la unión mecánica de los carros.
- Un interruptor llamado PAU (Acoplador para Seguridad de Continuidad del tren) a través del cual se mantiene la continuidad eléctrica.
- El ducto, que permite el paso del aire comprimido de un carro a otro.

En el tren existen circuitos eléctricos cuya continuidad es asegurada de un carro a otro por medio de hilos que pasan por acopladores que son conectados en las caras frontales de los carros, estos circuitos son los de Mando y Control que pasan a través de siete acopladores:

- 1) Acoplador de Seguridad y Señalización (S)
- 2) Acoplador de Corriente Alterna y Traspaso de Batería "B"
- 3) Acoplador Mandos del Tren "T"
- 4) Acoplador Anuncio para viajeros y varios "A"
- 5) Acoplador de Pilotaje Automático y varios "P"
- 6) Acoplador Alta Tensión "H"
- 7) Acoplador Conducción "C"

Existen también dos acopladores especiales, los cuales se conectan en la parte frontal, inferior delantera de las motrices "M" y son usados para realizar los socorros de un tren, a otro, en caso de averías. Estos acopladores especiales son el acoplador "SD" Socorro Descompostura y PCS Toma-Continuidad-Timbre.

### **3.4 Alumbrado**

Los carros del tren cuentan con dos tipos de alumbrado, el normal; alimentado con corriente alterna que proviene del grupo motor alternado ó C.E.S. está compuesto por 24 tubos fluorescentes; el alumbrado de emergencia alimentado con corriente continua, proviene de las baterías, la cual pasa a través de onduladores, está compuesto por 16 tubos fluorescentes.

### **3.5 Ventilación**

La ventilación de los carros se efectúa por medio de dos motores, alimentados con baja tensión, cuya puesta en marcha y paro es controlada por termostatos.

El aire es llevado por ductos de ventilación provistos de deflectores y rejillas a través de las cuales se reparte el aire; en los demás modelos se cuenta con 7 ventiladores por carro, alimentados por corriente alterna.

### 3.6 Material Rodante sobre Neumáticos

#### 3.6.1 Características Generales

##### ◆ Tipos de carros

<i>M</i>	<i>Motriz con cabina</i>
<i>N</i>	<i>Motriz sin cabina</i>
<i>R</i>	<i>Remolque</i>

##### ◆ Formación de un tren (9 carros)

*M R N N R N N R M*

##### ◆ Dimensiones de los carros (en metros)

<i>Descripción:</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>R</i>
<i>Longitud entre enganches</i>	<i>17.18</i>	<i>16.18</i>	<i>16.18</i>
<i>Altura riel a techo</i>	<i>3.60</i>	<i>3.60</i>	<i>3.60</i>
<i>Altura piso a techo (exterior)</i>	<i>2.40</i>	<i>2.40</i>	<i>2.40</i>
<i>Ancho exterior</i>	<i>2.50</i>	<i>2.50</i>	<i>2.50</i>

◆ **Pesos de los carros (en kilogramos)**

<b>Pesos:</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>R</b>
Peso Vacío	27,300	26,400	19,830
Peso a 4/4 de carga	39,200	38,300	31,730
Peso a 5/4 de carga	42,175	41,275	34,705

◆ **Capacidad de los carros**

<b>Descripción:</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>R</b>
Pasajeros sentados	38	39	39
Pasajeros de pie	132	131	131
<b>Total</b>	<b>170</b>	<b>170</b>	<b>170</b>

### 3.7 Características Dinámicas

◆ **Velocidades y Aceleraciones**

Velocidad Máxima del Material	80 km/h
Velocidad Máxima en Servicio	75 km/h
Aceleración Máxima	1.2 m/seg <sup>2</sup> (3/4 de carga)
Desaceleración Máxima (Frenado de Urgencia)	2.0 m/seg <sup>2</sup> (4/4 de carga)
Desaceleración Máxima (De servicio)	1.8 m/seg <sup>2</sup> (3/4 de carga)

### 3.8 Carrocería

#### ◆ Elementos Principales

<b>Elementos Principales</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>R</b>
<i>Puertas de Servicio</i>	8	8	8
<i>Puertas de Intercomunicación</i>	2	2	2
<i>Ventanas</i>	6	6	6
<i>Asientos Dobles</i>	12	12	12
<i>Asientos Sencillos</i>	14	15	15
<i>Ventiladores</i>	7	7	7
<i>Palancas de Emergencia</i>	10	8	8
<i>Lámparas de Alumbrado</i>	24	24	24
<i>Lámparas de Emergencia</i>	6	6	6
<i>Escaleras de Emergencia</i>	1	1	1
<i>Pasamanos</i>	6	6	6

### 3.9 Equipos de Control y Auxiliares

#### ◆ Equipo de Pilotaje Automático a Bordo del Tren

	<b>Equipo de Pilotaje Automático a Bordo del Tren</b>
<i>Función</i>	<i>Recibir e interpretar la información proveniente del equipo instalado en las vías y así poder efectuar automáticamente las funciones de salida, parada del tren ante señales y en estación, respetar las velocidades establecidas, etc.</i>
<i>Localización en los Trenes</i>	<i>Carro remolque R</i>
<i>Características</i>	<i>Electrónica de seguridad intrínseca. Señal de emisión de 135 Khz modulado en frecuencia hasta por 8 bajas frecuencias. Contiene los sistemas ATP (Automatic Train Protection) y ATO (Automatic Train Operation)</i>

♦ **Generalidades, Compresores y Baterías.**

	<b>Generadores de Corriente Alterna</b>	<b>Compresores</b>	<b>Baterías</b>
<i>Función</i>	<i>Proporcionar la energía necesaria para el alumbrado, mandos de tracción-frenado y baja tensión del tren para la carga de baterías.</i>	<i>Suministrar el aire comprimido necesario para los equipos neumáticos y electroneumáticos del tren: puertas, frenado neumático y equipos de tracción.</i>	<i>Suministrar la energía en baja tensión para el encendido del tren, alumbrado de emergencia, luces de estacionamiento y en caso de falla del generador, garantizar la baja tensión en los circuitos del tren.</i>
<i>Localización en los Trenes</i>		<i>Carros remolque R</i>	
<i>Tipos y Características</i>	<i>Rotatorio (Statodyne) 250 V, 250 Hz, 3 Fases 75 VCD Estático (CES) 220 V, 60 z, 1 Fase 75 VCD</i>	<i>Reciprocantes 720 V. Presión normal de salida 6.8 a 8.2 Bars Instalado en los trenes: Rotatorios de aspas deslizantes.</i>	<i>Niquel-Cadmio Electrolítico a base de Hidróxido de Potasio. Capacidad: 70 Amperes/hora</i>

### 3.10 Bogies (Carretillas)

Existen dos por carro y tienen la función motora y de soporte de la carrocería. Este componente fundamental del material rodante lo podemos ver en la imagen 3.10.

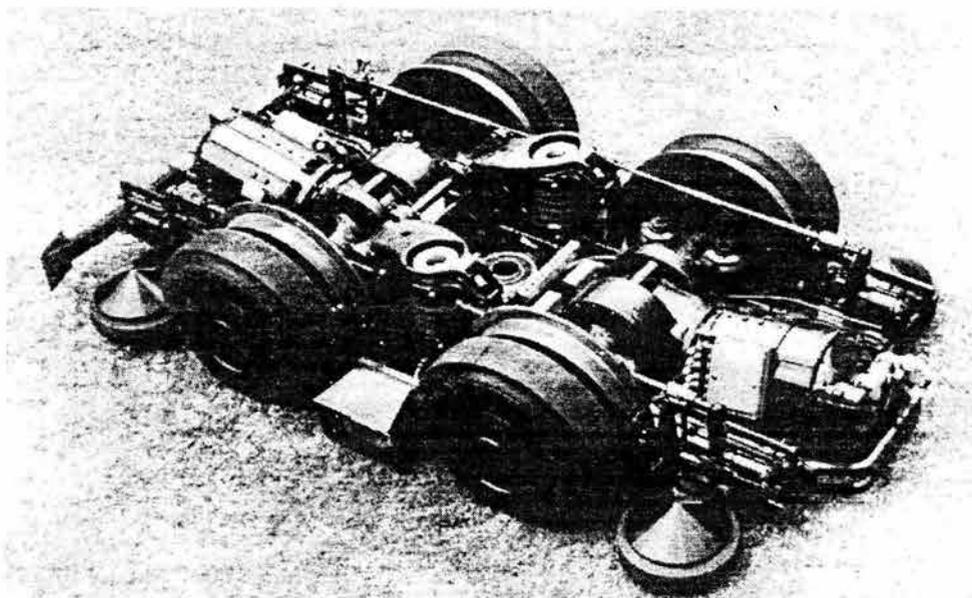


FIGURA 3.10 El Bogie, componente fundamental del Material Rodante.

#### ◆ Elementos Principales

<i>Elemento</i>	<i>Por Bogie</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>R</i>
<i>Bastidor</i>	1	2	2	2
<i>Motores Eléctricos de Tracción</i>	2	4	4	
<i>Puente Diferencial</i>	1	2	2	
<i>Neumáticos Portadores</i>	4	8	8	8
<i>Neumáticos Guía</i>	4	8	8	8
<i>Ruedas de Seguridad (Acero)</i>	4	8	8	8
<i>Sistemas de Frenado</i>	4	8	8	8
<i>Zapatas de Frenado</i>	8	16	16	16
<i>Escobillas Positivas</i>	2	4	4	
<i>Esobillas Negativas</i>		2	2	
<i>Escobillas de Tierra</i>		2	2	4

♦ **Características de los Elementos Principales**

**Bastidor:** Pieza de acero mecanosoldado en forma de H, al que se ensamblan los demás elementos.

**Motores Eléctricos:** Transforman la energía eléctrica en movimiento. Son de corriente directa.

*Motores de Tracción (Características)*

<b>CAPACIDAD</b>			
<b>Regimen Continuo</b>		<b>Regimen Horario</b>	
<b>KW</b>	<b>HP</b>	<b>KW</b>	<b>HP</b>
108	145	118,158	8

**Puente Diferencial:** Transmite el par de los motores hacia los neumáticos portadores y ruedas de seguridad por medio de un reductor y de un diferencial.

**Tipo:** Doble Reducción

Relación de Transmisión: 1:9.2285

Eficiencia de Transmisión: 92%

**Neumáticos Portadores:** Cuentan con un armazón y cuerdas de acero.

Presión de inflado (motrices): 11.5 Bars.

Presión de inflado (remolque): 9.0 Bars.

<b>Dimensiones en milímetros</b>	<b>Sin carga</b>	<b>Con carga</b>
<i>Diámetro</i>	1006	959
<i>Ancho</i>	330	343.5

**Neumáticos Guía:** Constituido por un armazón y cuerdas de acero.

Presión de inflado: 10.0 Bars.

<i>Dimensiones en milímetros</i>	<i>Sin contacto con la Barra Guía</i>	<i>Con contacto con la Barra Guía</i>
<i>Diámetro</i>	540	485
<i>Ancho</i>	157	162

**Rueda de Seguridad:** De acero según norma R7UIC812-3.

	<i>Dimensiones en milímetros</i>
<i>Diámetro de Ceja</i>	1,024
<i>Diámetro de Tabla de Rodamiento</i>	880
<i>Ancho</i>	130

**Sistema de Frenado:** Se efectúa por medio de dos zapatas accionadas sobre cada rueda de seguridad por un cilindro de freno a una presión máxima de 4.5 bars que corresponde al frenado de urgencia.

**Zapatas de Freno:** Material: madera de fresno, abedul o haya blanca; impregnada con aceite de cacahuete y sal de oxileno.

**Escobillas Positivas, Negativas y de Tierra:**

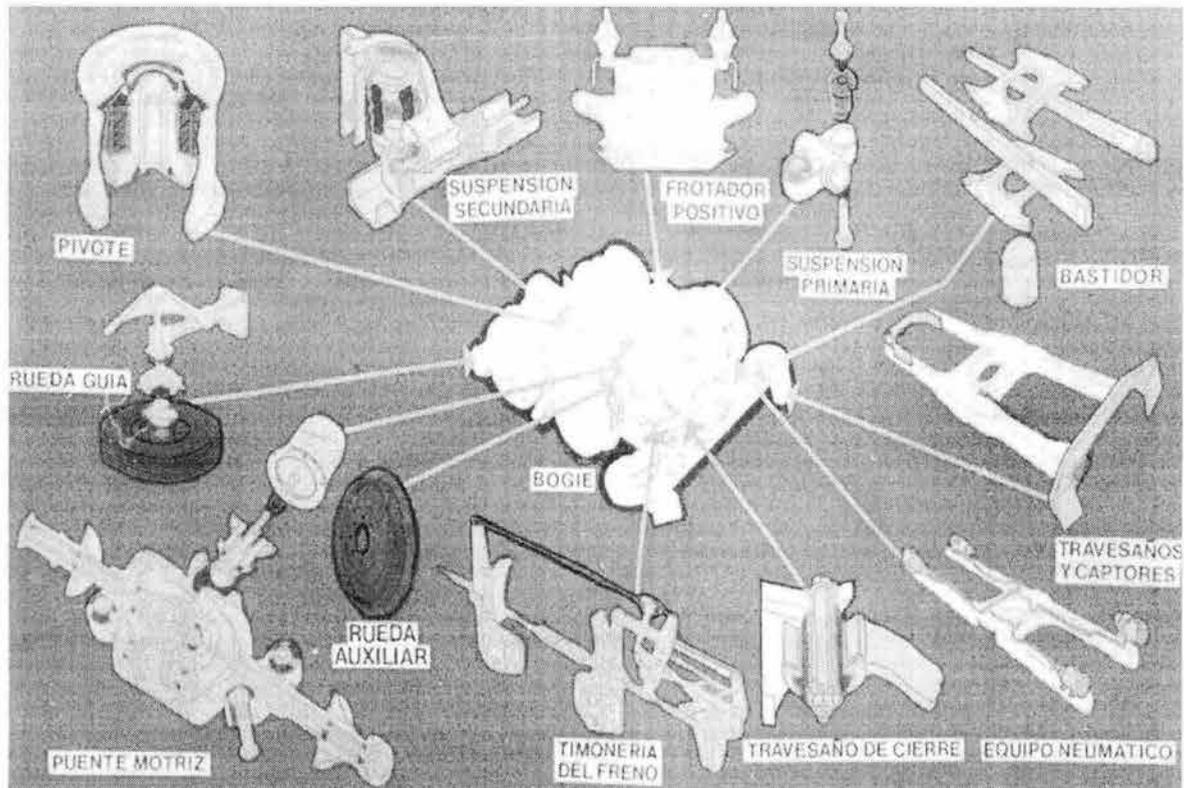
Material: carbón-cobrizado.

**Sistema de Tracción de Frenado:** JH (Jeumont Heydman): dispositivo electromecánico del control reostático de los motores en tracción y frenado dinámico (reostático). Este sistema complementa su sistema de frenado con el uso del frenado automático.

Los componentes que integran al bogie se muestran en la imagen 3.10.1

### **3.11 Mantenimiento del Material Rodante**

Las acciones del mantenimiento preventivo, atención a trenes en servicio y mantenimiento correctivo se llevan a cabo coordinadamente con la aplicación de técnicas de ingeniería industrial.



**FIGURA 3.10.1 Componentes que integran al Bogie.**

El mantenimiento preventivo que fundamentalmente se brinda al material rodante es de carácter sistemático y se efectúa en dos niveles: el mantenimiento menor aplicable por tren, con una periodicidad de 6 000 a 8 000 km, el cual consiste básicamente en lubricación general, ajuste, limpieza y cambio de piezas de corta duración; y el mantenimiento mayor, que se efectúa por carro cada 330 000 km para las unidades motrices, y cada 400 000 km para los remolques. En este trabajo, llamado también revisión general, se hace una detallada inspección de los componentes programados para ello, incluyendo equipos completos, estableciéndose un parámetro viable, el realizar dicha revisión hasta los 500 000 km, que sin afectar las condiciones de seguridad, permita disminuir los costos de mantenimiento.

Además, este mantenimiento preventivo se complementa con un mantenimiento cíclico que agrupa aquellos trabajos que deben efectuarse con periodicidad distinta a las de los mantenimientos sistemáticos.

El mantenimiento al material rodante se realizó en seis talleres, los de mantenimiento mayor en Zaragoza y Ticomán y los de mantenimiento menor en Zaragoza, Ticomán, Tasqueña y El Rosario.

### **3.12 Suspensión Primaria**

La Suspensión Primaria tiene la función de absorber la vibración provocada por la unión del puente motriz con las ruedas auxiliares, está formada por una unión en forma de cruz en la que se integran dos topes y dos soportes de neopreno, los cuales se fijan al bastidor a través de dos pernos. Son cuatro uniones por bogie. Ver figura 3.10.1

### **3.13 Suspensión Secundaria**

La Suspensión Secundaria sirve para aislar y amortiguar las vibraciones del chasis del bogie y contribuye así a la comodidad de los pasajeros, asegura la estabilidad lateral de la caja en las curvas por medio del dispositivo anti-balanceo con barra de torsión.

La Suspensión Secundaria se constituye esencialmente de dos resortes helicoidales mixtos de acero y hule, de flexibilidad variable, colocados verticalmente entre el chasis del bogie y los aisladores de la caja.

Nuestro objeto de estudio será el resorte helicoidal mixto constituido por acero y hule llamado Resorte Eligo.

### **3.14 Factores que afectan al Resorte Eligo**

A continuación se mencionan los factores que afectan al resorte, las condiciones de operación, mantenimiento que se le da así como sus especificaciones.

- a) *Medio Ambiente.*- Los trenes y, por lo tanto los resortes trabajan en líneas superficiales y en túnel, teniendo las condiciones más severas de explotación en las líneas subterráneas, en donde existe una importante concentración de ozono, debido a los arcos eléctricos, provocados por los flotadores eléctricos.

La temperatura ambiente en el túnel varía de  $-5^{\circ}$  C a  $45^{\circ}$  C. Los resortes están expuestos al ataque de aceites, grasas y polución.

- b) *Condiciones de operación de los trenes y resortes.*- Los trenes alcanzan una velocidad máxima de 80 km/h, tienen una aceleración de  $1.2 \text{ m/s}^2$  y un frenado máximo, desaceleración de  $2 \text{ m/s}^2$  y pueden circular tanto en superficie como en túnel. Las características más importantes de las vías son: curvas horizontales con un radio mínimo de 105 metros y una pendiente máxima del 7%.

La comodidad de los pasajeros no debe afectarse sensiblemente, siendo esta la función sustantiva de los resortes.

- c) *Requerimiento Operativo y de Mantenimiento de los Resorte y su Vida Útil.*- Los resortes deben diseñarse con una vida útil que sobrepase los 500,000 km que es el periodo de tiempo que transcurre entre una revisión general y otra, lo que en tiempo representa 5 años, tomando en cuenta el trabajo al que están sujetos los carros diariamente en las líneas de la Ciudad de México. Lo anterior para evitar paros de los trenes, ocasionadas por el cambio de los resortes.

El mantenimiento de los resortes Eligo, debe ser mínimo, el cual se limita a una limpieza del mismo, con algún producto que no degrade el material (hule) de que está fabricado.

### **3.15 Especificaciones del Resorte Eligo para Suspensión Secundaria**

El Resorte Eligo está constituido por un alma de acero recubierta por un elastómero. A continuación se enlistan los valores de la especificación que debe cumplir el Resorte Eligo para la suspensión secundaria:

No.	CARACTERISTICAS	CLASE DE DEFECTO	ELEMENTOS DE INSPECCION	NORMA O ESPECIFICACION
1	PRODUCTO TERMINADO DIAMETRO EXTERIOR = $283 \pm 2.5$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
2	RADIO = $40 \pm 1.5$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
3	RADIO = $3 \pm 0.5$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
4	PASO = $74 \pm 1.0$ mm	M	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
5	RADIO = $3 \pm 0.5$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
6	REFERENCIA DE RADIO = 7.0 mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
7	REFERENCIA DE RADIO = 7.0 mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
8	RADIO = $45 \pm 1.0$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
9	RADIO = $25 \pm 1.0$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
10	RADIO = $45 \pm 1.0$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
11	ALTURA TOTAL $450 \pm 5.0$ mm	C	CALIBRADOR DE ALTURAS	I.S.O.
12	DIAMETRO INTERIOR $148 \pm 2.0$ mm	m	DIAMETRO INTERIOR $148 \pm 2.0$ mm	I.S.O.
13	CURVA DE COMPRESION A RESORTE ELIGO	C	EQUIPO PARA ENSAYOS ESTATICOS Y DINAMICOS, DISPOSITIVO DE PRUEBA, CAZOLETAS Y CALIBRADOR DE ALTURAS	

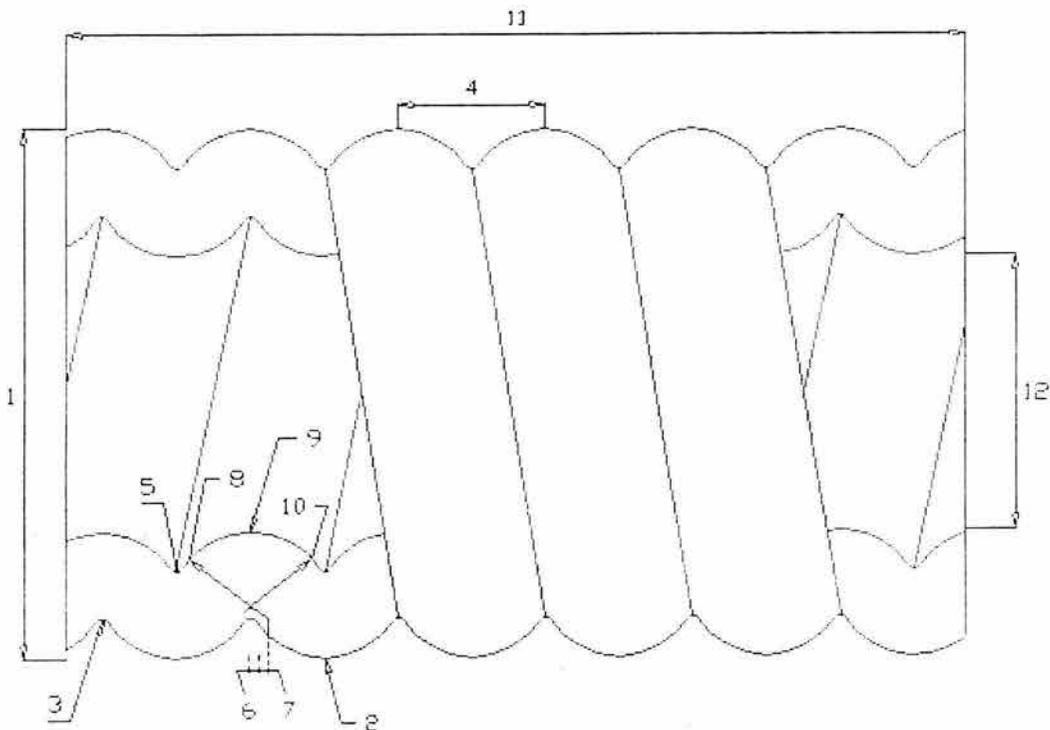
**DESCRIPCION DEL MATERIAL RODANTE DEL S.T.C. METRO**

No.	CARACTERISTICAS	CLASE DE DEFECTO	ELEMENTOS DE INSPECCION	NORMA O ESPECIFICACION
14	No. DE ESPIRAS UTILES 6.1	C	VISUAL	
15	EXTREMO A ESCUADRA (PARALELOS, COMPENSANDO EL DESNIVEL DEL RESORTE DE ACERO CON MATERIAL ELASTOMERICO)	M	ESCUADRA UNIVERSAL	I.S.O.
16	MATERIAL ELASTOMERICO BUNA "N"	C	ESPECTROFOTOMETRO INFRARROJO	ASTM D - 297
17	DUREZA 65 ± 5 SHORE A - 2	C	DUROMETRO SHORE A - 2	ASTM D - 2240
	<b>RESORTE DE ACERO (ALMA)</b>			
18	DIAMETRO MEDIO 174 ± 2.0 mm	M	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
19	DIAMETRO DEL ALAMBRE 20 ± 1 m	M	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
20	PASO = 74 ± 1.0 mm	M	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
21	ALTURA TOTAL 450 ± 5.0 mm	C	CALIBRADOR DE ALTURAS	I.S.O.
22	ARILLOS DE INMOVILIZACION DEL ELASTOMERO COLOCADOS SOBRE LAS ESPIRAS DEL RESORTE A CADA 120 °	M	VISUAL	
23	EXTREMOS ESMERILADOS PARCIALMENTE PARA LOGRAR LA PLANEIDAD DEL RESORTE CONSERVANDO SU PASO	C	VISUAL	
24	No. DE ESPIRAS UTILES 6.1	C	VISUAL	
25	CURVA DE COMPRESION A RESORTE ELIGO SEGUN PROCEDIMIENTO INDICADO EN EL ANEXO	C	EQUIPO PARA ENSAYOS ESTATICOS Y DINAMICOS, SEGMENTOS ESPIRALES COLOCADOS EN LOS EXTREMOS PARA LOGRAR PARALELISMO	
26	MATERIAL DEL RESORTE DE ACERO AISI 5160 DIN 60 Si Cr 7	C	ESPECTROFOTOMETRO DE ABSORCION ATOMICA	
27	DUREZA 48 ± 4 HRC ROCKWELL C (150 Kg; 120 °)	C	DUROMETRO UNIVERSAL	NOM B - 119
28	TRATAMIENTO TERMICO TEMPLADO EN ACEITE Y REVENIDO	C	METALOGRAFIA	NOM B - 79
29	MICRO ESTRUCTURA MARTENSITA REVENIDA	C	METALOGRAFIA	NOM B - 79
30	ACABADO DEL RESORTE DE ACERO: SUPERFICIE LISA LIBRE DE DEFECTOS ARILLO DE INMOVILIZACION	C	VISUAL	

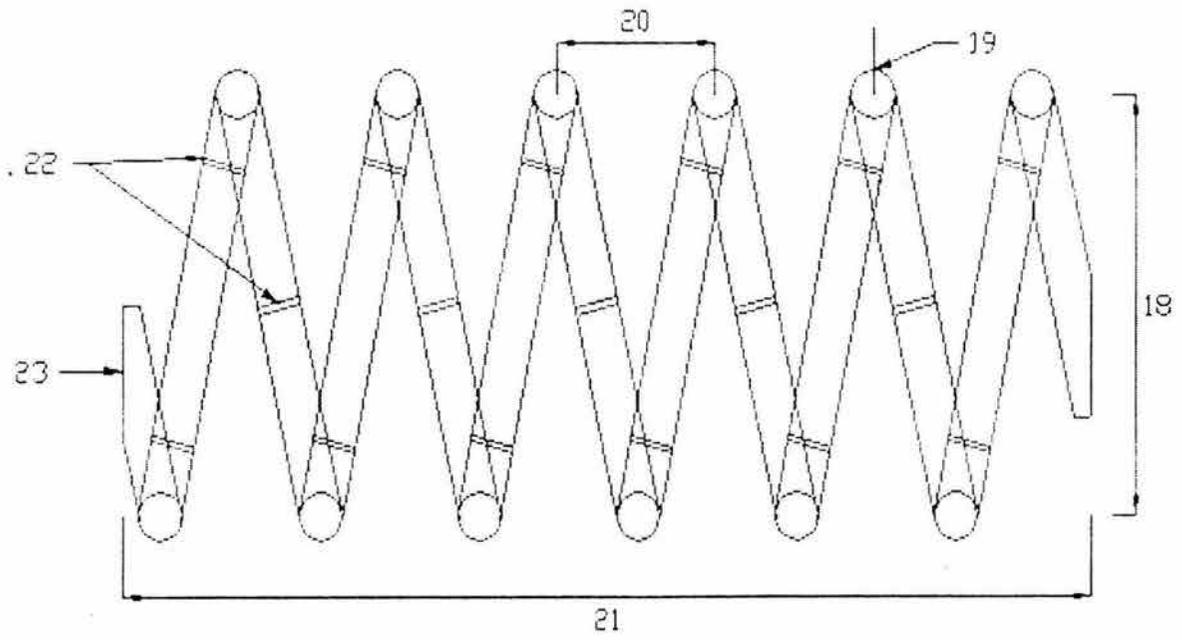
No.	CARACTERISTICAS	CLASE DE DEFECTO	ELEMENTOS DE INSPECCION	NORMA O ESPECIFICACION
31	DIAMETRO DEL ALAMBRE DEL ARILLO DE INMOVILIZACION $2.5 \pm 0.5$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
32	DIAMETRO INTERIOR DEL ARILLO $20 \pm 1.0$ mm	M	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
33	ABERTURA DE LOS EXTREMOS DEL ARILLO $2 \pm 0.5$ mm	m	CALIBRADOR VERNIER	I.S.O.
34	MATERIAL DEL ARILLO DE INMOVILIZACION LATON (Cu 70% Zn 30%)	M	ESPECTROFOTOMETRO DE ABSORCION ATOMICA	
35	DUREZA DEL LATON 90 HRB	m	MICRODUROMETRO	

Podemos ver estas indicaciones en los siguientes dibujos en donde se observa al resorte eligo primeramente con el recubrimiento elastomérico y posteriormente únicamente el acero.

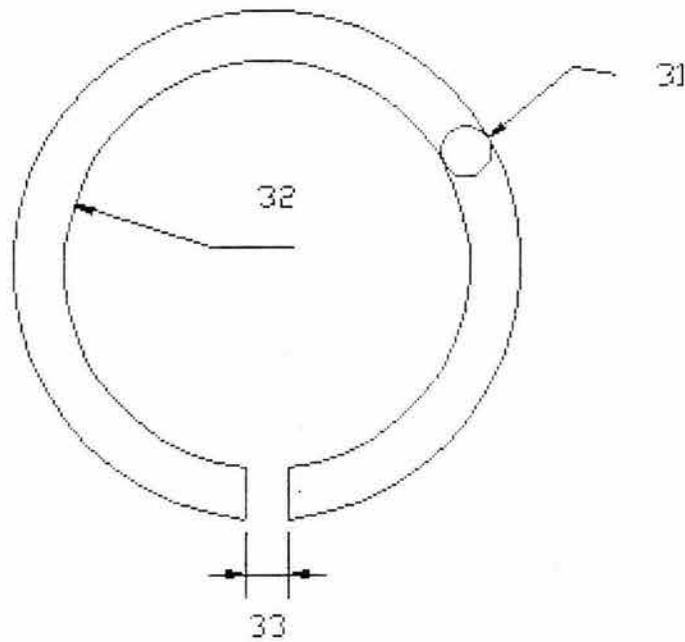
**Resorte Eligo con el recubrimiento de Elastómero**



**Resorte Eligo (Alma de Acero)**



**Arillo de Inmovilización**



*CAPITULO IV.*

*REVISIÓN DEL DISEÑO DEL  
RESORTE ELIGO DE SUSPENSIÓN  
SECUNDARIA DEL S.T.C. METRO*

#### **4.1 Antecedentes**

Como punto de inicio se cuenta con la información de que los resortes utilizados fueron hechos en el país basándose en dos tipos de diseños, los cuales son de procedencia francesa y japonesa respectivamente. La finalidad de integrar un modelo nacional es el de ir sustituyendo gradualmente estos dos modelos extranjeros.

Desafortunadamente el prototipo montado para observación mostró irregularidades durante su desempeño además de que al término de esta prueba como se mencionó con anterioridad el alma de acero quedó fracturada, por lo que tuvo que retirarse y enviarse al laboratorio para analizarlo. Para esto se elaboró una ficha de inspección la cual fue aplicada a los tres modelos de resorte eligo y posteriormente se llevaron a cabo pruebas comparativas entre los mismos.

#### **4.2 Planteamiento del Problema**

Tomando como base la norma NMX-Z-12-1987 coincidente con la ISO2859-1974 que nos indica un nivel de inspección especial designado como S-1 correspondiente a un tamaño de lote de 60 piezas o unidades y un tipo de muestra "C" equivalente a 6 muestras, las cuales por el tipo de inspección tendrán que destruirse.

Bajo estos términos se procedió aplicar las pruebas correspondientes y analizar el comportamiento del resorte nacional además de comparar los resultados obtenidos con los resultados de las pruebas aplicadas también a los resortes francés y japonés respectivamente.

#### **4.3 Revisión del Diseño a través de Pruebas y Análisis aplicados a los Resortes Eligo**

La revisión del diseño se llevó a cabo a través de pruebas y análisis que se aplicaron a los resortes eligo en el orden siguiente: Primeramente el de origen francés, posteriormente el japonés y finalmente el resorte eligo nacional.

Las pruebas realizadas fueron del tipo estático y dinámico, cabe aclarar que para estas condiciones el resorte se estudió primero de manera íntegra, es decir, el alma de acero recubierta por el elastómero; posteriormente ambos elementos fueron separados y analizados de manera independiente.

En lo que respecta al alma de acero se le repitieron las mismas pruebas estáticas con condiciones de carga menores a las establecidas anteriormente, se analizó su composición química así como un estudio metalográfico para conocer tanto las características y comportamiento del acero utilizado además de las propiedades que este posee.

El elastómero fue analizado por el método de líquidos penetrantes el cual se explicará de manera clara en su momento.

Al término de cada estudio se compararon los resultados obtenidos entre los tres resortes con la finalidad de determinar las posibles causas que incidieron en el comportamiento anormal del resorte eligo nacional en comparación a los modelos francés y japonés.

#### 4.3.1 Análisis de Prueba Estática

Esta prueba se realizó en los Talleres de Revisión General utilizando una máquina para ensayos estáticos, obteniéndose una tabulación de valores en los que la carga se fue incrementando provocando la deformación en los resortes eligo, para posteriormente trazar sus gráficas y analizar el comportamiento de los resortes durante dichas pruebas.

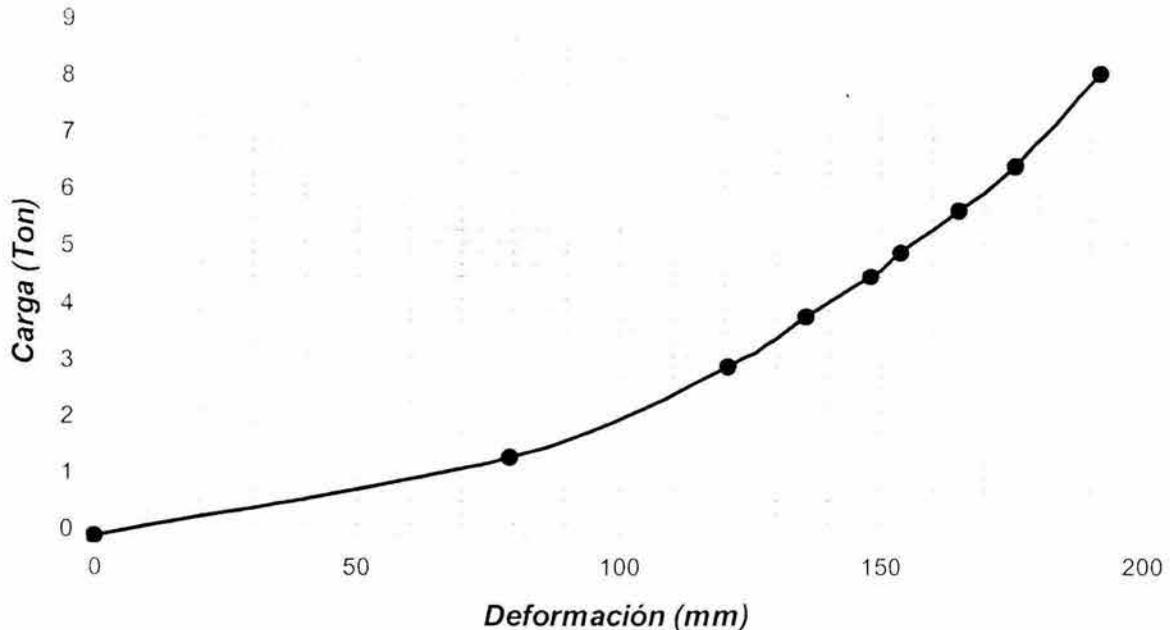
##### a) Resorte Eligo Francés

El procedimiento realizado está simplificado en la siguiente tabla en la cual se indica la carga aplicada al resorte y la correspondiente deformación que presentó este. Esta tabulación de valores será interpretado en una gráfica para observar el comportamiento que presenta este espécimen en la prueba.

**Tabla de valores para Resorte Eligo Francés**

<i>Carga (Ton)</i>	<i>Deformación (mm)</i>
0	0
1.375	79
3	121
3.875	136
4.6	148
5	154
5.75	165
6.55	176
8.17	192

### Gráfica Carga-Deformación del Resorte Eligo Francés



**Observaciones:** La gráfica nos proyectó una parábola, la cual es consecuencia del recubrimiento de elastómero cuya rigidez es progresiva y aumenta las propiedades del alma de acero; podemos notar que la deformación del resorte es óptima para distintos tipos de carga aplicada por lo que el amortiguamiento que ofrece a la suspensión secundaria es aceptable para condiciones de carga y sobrecarga. Esta gráfica nos indica que el resorte es muy flexible y a la vez muy tenaz puesto que no pierde sus propiedades, el comportamiento observado no es irregular y nos genera cierta confiabilidad en el uso de este resorte. Falta señalar que las labores de mantenimiento no serán muy complicadas ya que por la flexibilidad que presenta será fácil el desmontaje y obviamente el montaje del mismo.

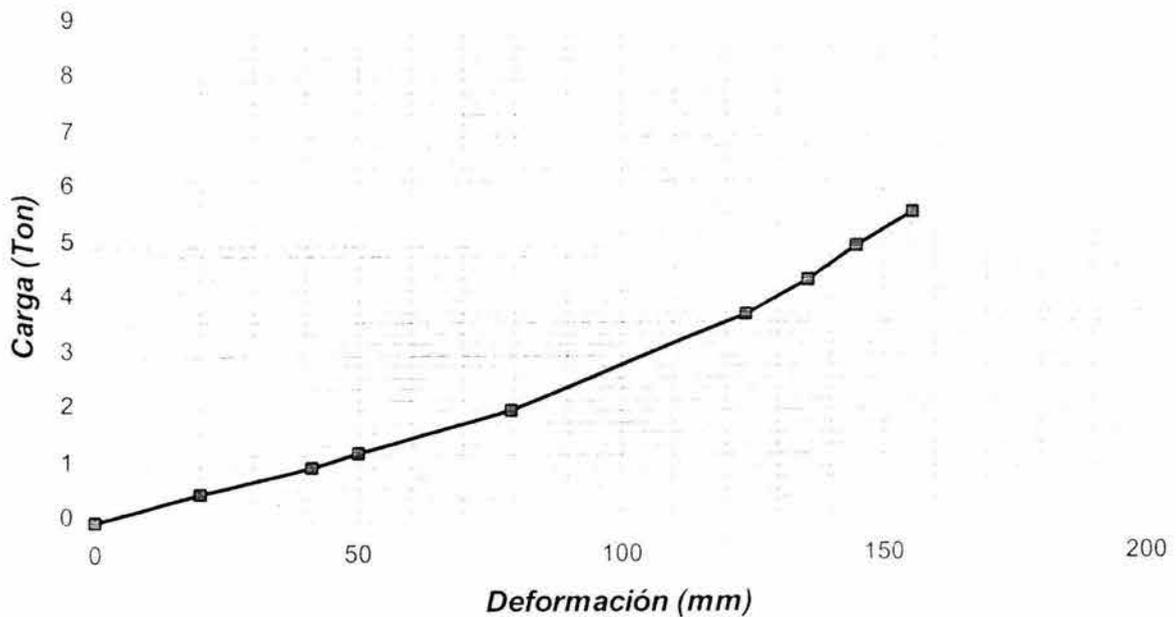
#### b) Resorte Eligo Japonés

El procedimiento realizado está simplificado en la siguiente tabla en la cual se indica la carga aplicada al resorte y la correspondiente deformación que presentó este. Esta tabulación de valores será interpretado en una gráfica para observar el comportamiento que presenta este espécimen en la prueba.

**Tabla de valores para Resorte Eligo Japonés**

Carga (Ton)	Deformación (mm)
0	0
0.5	20
1.25	50
2	79
3.75	124
4.375	136
5	145
5.625	156

**Gráfica Carga-Deformación del Resorte Eligo Japonés**



**Observaciones:** Esta gráfica también nos proyectó una parábola similar a la del resorte francés, solo que para este caso la carga aplicada fue algo menor debido a que este resorte presentó menor deformación, es decir, su flexibilidad fue menor en comparación a su homólogo francés aunque cabe señalar que cumple con las condiciones de carga y sobrecarga. Debido a la rigidez que presenta su vida útil será menor porque la función de suspensión que tiene que desempeñar se verá afectada en menor tiempo que el resorte anterior. En cuanto al mantenimiento vemos que será más frecuente y puede decirse que hasta complicado para las labores de montaje y desmontaje.

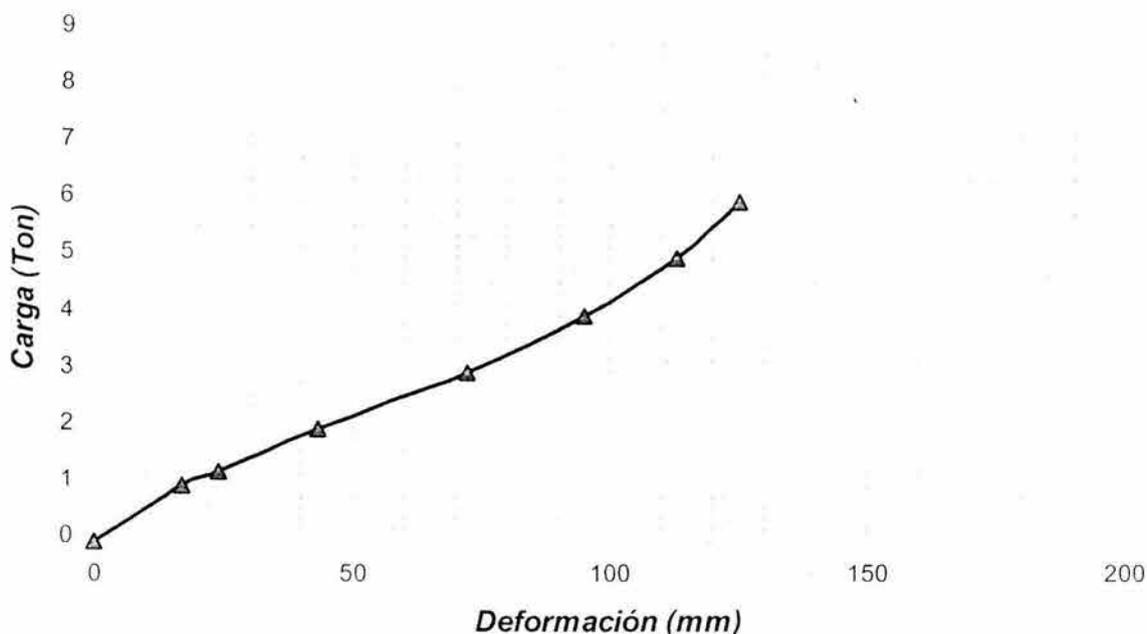
### c) Resorte Eligo Nacional

El procedimiento realizado está simplificado en la siguiente tabla en la cual se indica la carga aplicada al resorte y la correspondiente deformación que presentó este. Esta tabulación de valores será interpretado en una gráfica para observar el comportamiento que presenta este espécimen en la prueba.

**Tabla de valores para Resorte Eligo Nacional**

Carga (Ton)	Deformación (mm)
0	0
1	17
1.25	24
2	43
3	72
4	95
5	113
6	125

## Gráfica Carga-Deformación del Resorte Eligo Nacional



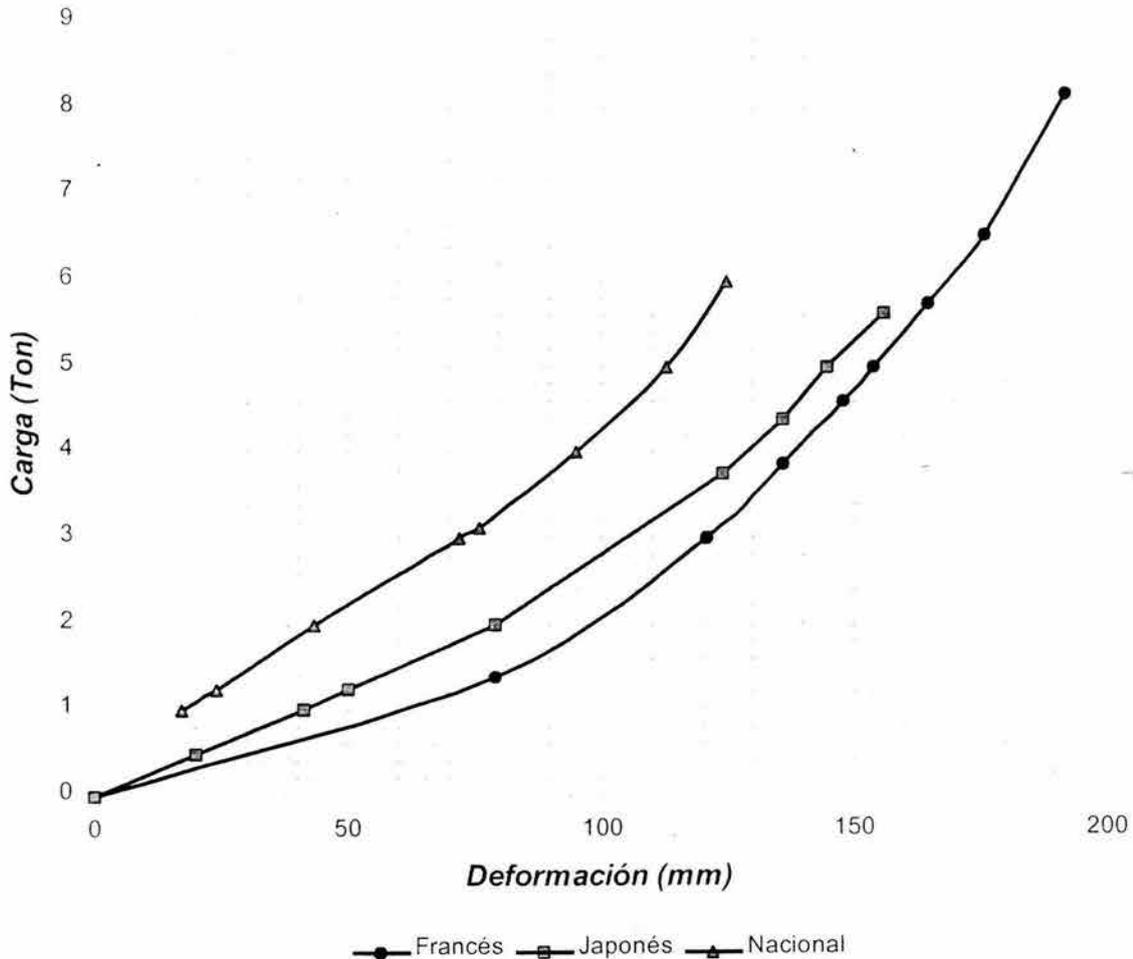
**Observaciones:** La gráfica que se proyecta tiende a ser una parábola, si observamos detenidamente podemos ver menor rango de deformación a mayor carga, lo que nos indica poca flexibilidad y una mayor rigidez que el modelo de resorte japonés.

Basándonos en estas características que se presentaron no es recomendable ponerlo en servicio ya que su desempeño sería deficiente, dándonos además una vida útil pobre; el mantenimiento de este resorte nacional sería muy complicado en cuanto a labores de montaje y desmontaje, los cuales se harían con mucha frecuencia lo que reeditaría en el costo que esto implica así como el tiempo en llevar a cabo esta actividad.

En la siguiente gráfica comparativa podemos observar de manera más clara el comportamiento de cada modelo de resorte eligo.

Al comparar las tres gráficas podemos ver que el resorte eligo francés presentó el mejor rendimiento durante estas pruebas estáticas seguido del modelo japonés, en cuanto al resorte nacional vimos un desempeño muy bajo en comparación con sus homólogos de procedencia extranjera.

### Gráfica Comparativa Carga-Deformación del Resorte Eligo



A continuación se procederá a separar el hule del alma de acero y se aplicaran las mismas pruebas estáticas aunque con diferentes rangos de carga. Posteriormente compararemos los resultados obtenidos.

#### a) Resorte Eligo Francés (Alma de acero)

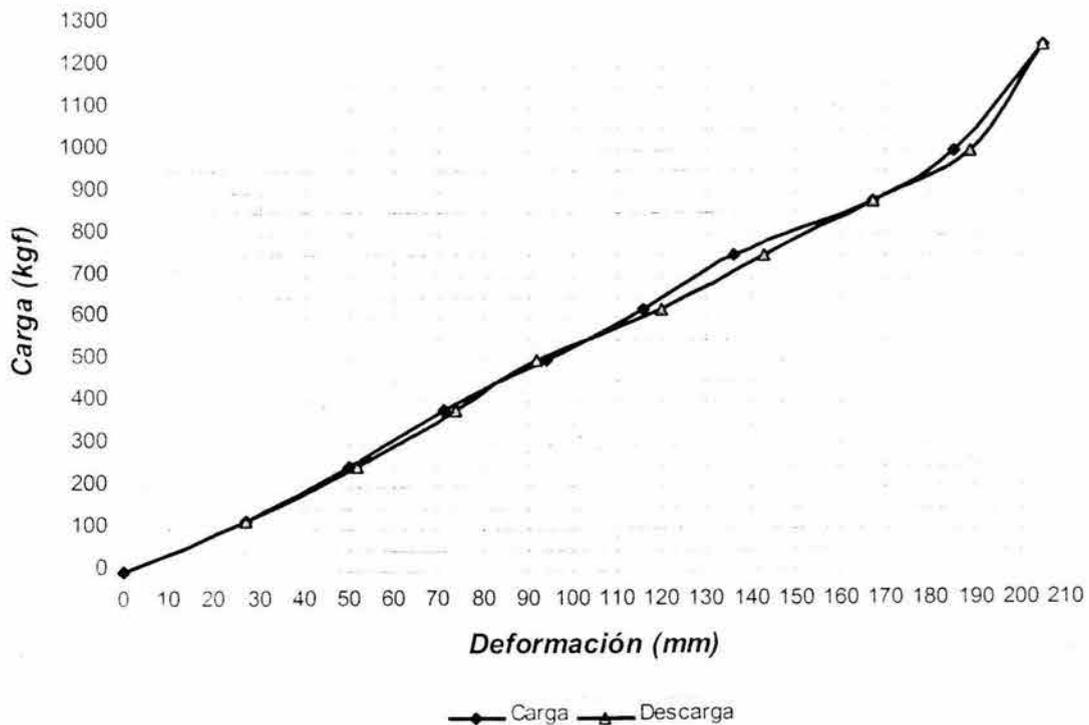
El procedimiento realizado es similar al anterior solo que también se tabuló el comportamiento del resorte a la descarga, obviamente las condiciones de carga para el resorte de acero son menores debido a los límites que presenta este sin el recubrimiento del elastómero, para este caso se utilizó el kgf (kilogramo fuerza) como unidad de carga. Posteriormente observamos el comportamiento del resorte a la carga y la descarga.

**Tabla de valores para Resorte Eligo Francés  
(Alma de acero)**

Carga (kgf)	Deformación (mm)
0	0
120	27
250	50
380	71
500	94
620	116
750	136
880	167
1000	185
1250	205

Descarga (kgf)	Deformación (mm)
1250	205
1000	189
880	167
750	143
620	120
500	92
380	74
250	52
120	27

**Gráfica Carga-Deformación del Resorte Eligo Francés  
(Alma de Acero)**



**Observaciones:** Esta gráfica proyectó un comportamiento casi lineal, la deformación que presentó el acero fue óptima para distintos tipos de carga aplicada e incluso a la descarga. El acero es muy flexible y tenaz, con estas pruebas podemos notar que no perdió sus propiedades elásticas.

**b) Resorte Eligo Japonés (Alma de acero)**

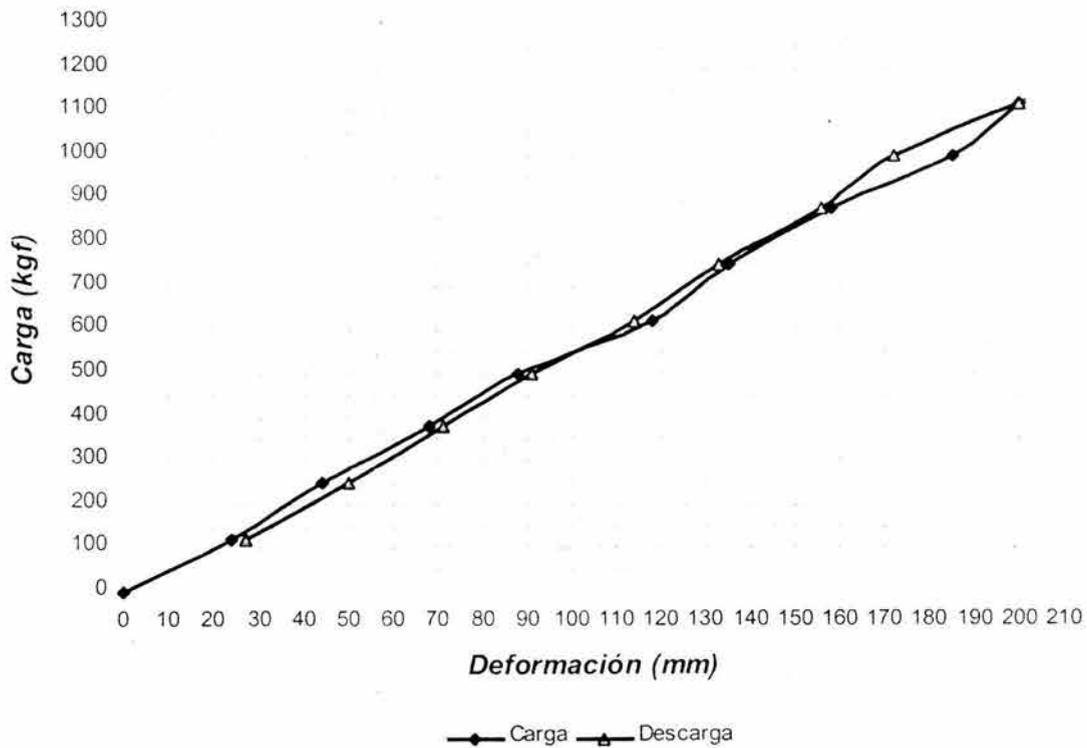
Seguimos el mismo procedimiento del punto anterior.

**Tabla de valores para Resorte Eligo Japonés  
(Alma de acero)**

Carga (kgf)	Deformación (mm)
0	0
120	24
250	44
380	68
500	88
620	118
750	135
880	158
1000	185
1120	200

Descarga (kgf)	Deformación (mm)
1120	200
1000	172
880	172
750	133
620	114
500	91
380	71
250	50
120	27

**Gráfica Carga-Deformación del Resorte Eligo Japonés  
(Alma de Acero)**



**Observaciones:** Esta gráfica también proyectó un comportamiento casi lineal, a diferencia del resorte de acero francés, este resorte de acero japonés se mostró un poco más rígido aunque no menos eficiente que nuestro caso anterior. Se puede ver la regularidad de los resultados tanto a la carga como a la descarga.

**c) Resorte Eligo Nacional (Alma de acero)**

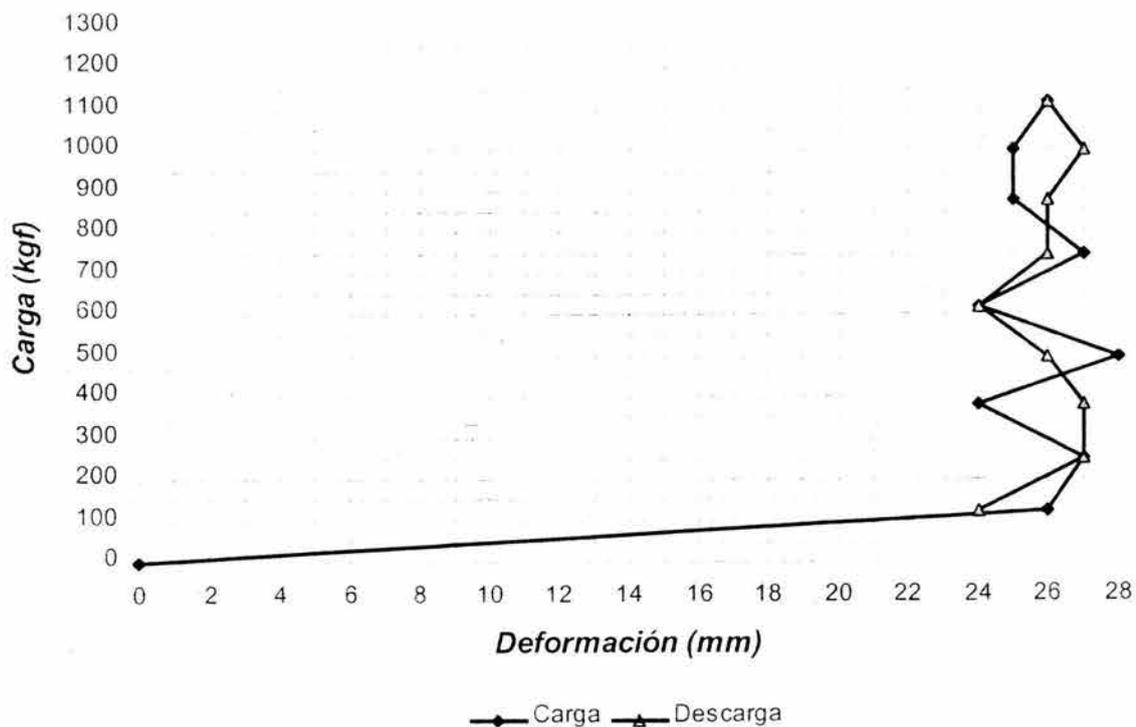
Se analizará de modo similar a los modelos de procedencia extranjera. Las tabulaciones del resorte fueron las siguientes:

**Tabla de valores para Resorte Eligo Nacional  
(Alma de acero)**

Carga (kgf)	Deformación (mm)
0	0
120	26
250	27
380	24
500	28
620	24
750	27
880	25
1000	25
1120	26

Descarga (kgf)	Deformación (mm)
1120	26
1000	27
880	26
750	26
620	24
500	26
380	27
250	27
120	24

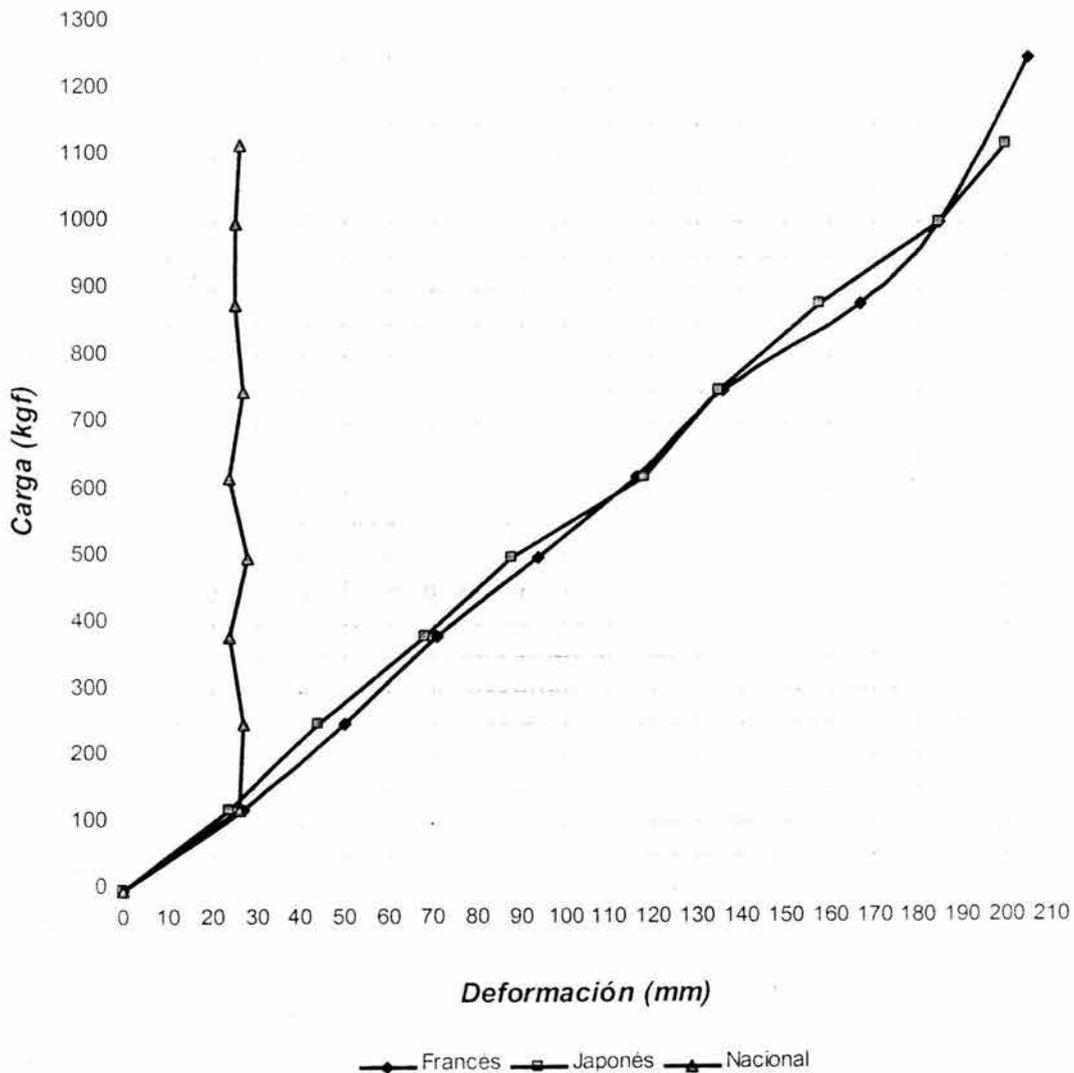
**Gráfica Carga-Deformación del Resorte Eligo Nacional (Alma de Acero)**



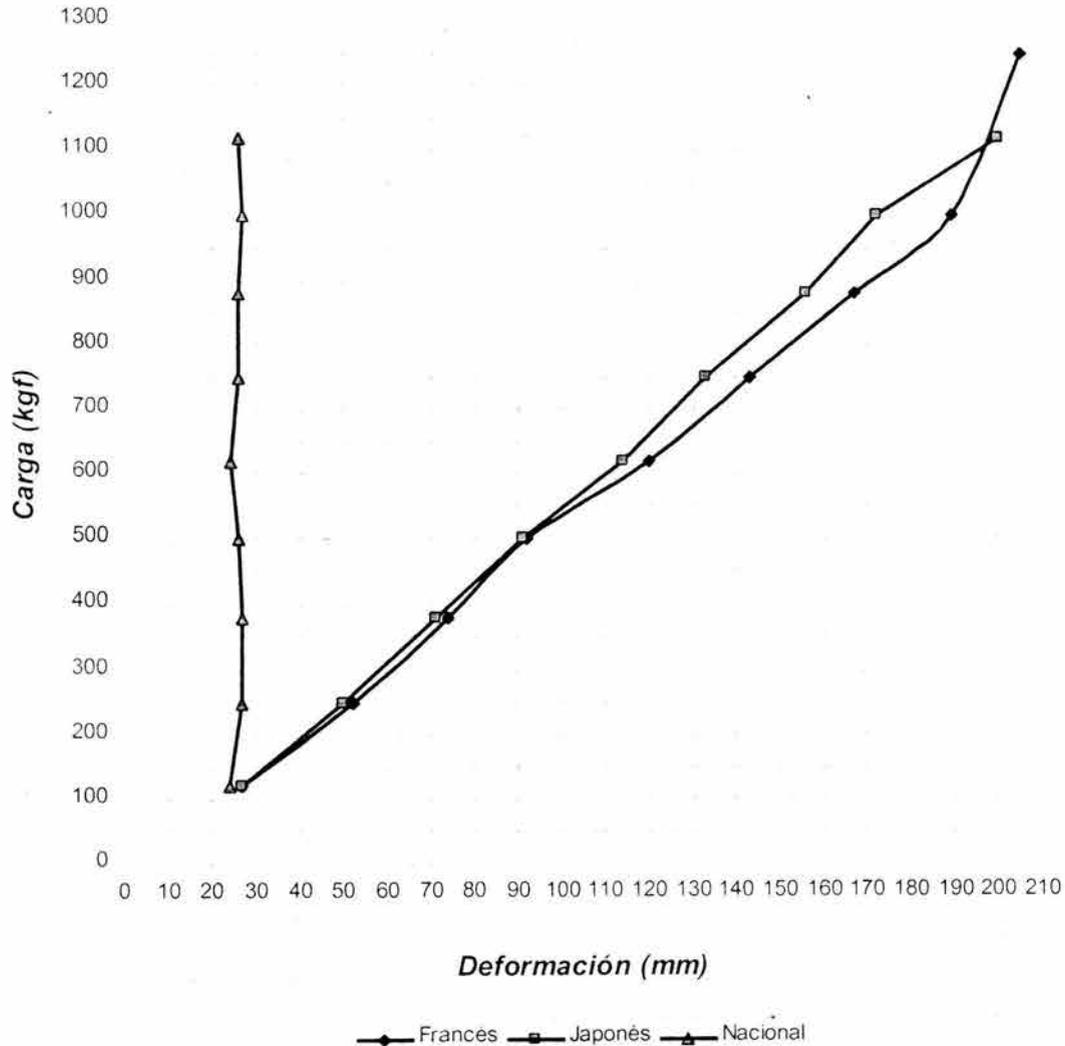
**Observaciones:** La gráfica nos mostró un comportamiento anormal del resorte de acero nacional, si observamos bien, la deformación de este es muy pobre en los diferentes puntos de carga y además hay que señalar que en la descarga el comportamiento fue demasiado irregular. Estos resultados poco confiables señalan una gran deficiencia del acero.

A continuación veremos dos gráficas comparativas una a la carga y otra a la descarga de los tres modelos de resorte eligo para observar el comportamiento de cada uno de ellos.

**Gráfica Comparativa Carga-Deformación del Resorte Eligo (Alma de Acero)**



**Gráfica Comparativa Descarga-Deformación del Resorte Eligo (Alma de Acero)**



**Conclusiones de la Prueba Estática:** Si comparamos los tres resortes de acero, el modelo nacional quedó muy por debajo de los modelos extranjeros; cabe señalar que su comportamiento es un tanto regular debido a que el elastómero eleva sus propiedades elásticas más sin embargo, el alma de acero por sí solo nos muestra un comportamiento de extrema rigidez, es decir, la dureza del acero no parece ser la adecuada. Ante esta situación se procede a realizar otros análisis enfocados directamente en el resorte eligo nacional con el objetivo de encontrar los factores que influyeron en el deficiente comportamiento del mismo.

**4.3.2 Análisis de Prueba Dinámica**

En esta prueba el resorte eligo se analizó íntegramente, es decir, alma de acero y recubrimiento elastomérico de manera conjunta. La realización de este análisis fue bajo los siguientes parámetros:

- Valor mínimo de carga: 6212 kg
- Valor máximo de carga: 6600 kg
- Se aplicaron 1 millón de ciclos con una frecuencia de 6 Hz
- Al término de la prueba el resorte se dejó reposar 18 días

El equipo utilizado fue una máquina para ensayos dinámicos y un mármol de referencias.

El objetivo de esta prueba es determinar la deformación que sufre el resorte con respecto a su altura inicial (450 mm) al aplicarle cierta cantidad de carga y número de ciclos. También tenemos el conocimiento de que el mantenimiento promedio debe realizarse al sobrepasar los 500,000 km que equivale aproximadamente a un lapso de tiempo de 5 años.

El resorte quedó deformado al concluir la prueba y como se mencionó anteriormente se dejó reposar un periodo de 18 días para observar si recuperaba su altura inicial, y en caso de experimentar una deformación permanente, registrar y analizar este dato el cual es un punto importante para visualizar las expectativas de rendimiento que el resorte eligo tendría en operación así como las labores de mantenimiento.

Cada modelo de resorte fue sometido a estas condiciones para su análisis y los resultados fueron expresados en la siguiente tabla comparativa:

<b>Tabla comparativa del Análisis Dinámico</b>		
<b>Modelo de Resorte Eligo</b>	<b>Deformación Permanente</b>	<b>Observaciones</b>
<i>Francés</i>	<i>1.5 mm</i>	<i>El hule no mostró algún tipo de anomalía o desgaste severo que afectase su rendimiento. Estos resultados nos ofrecen un alto grado de confiabilidad.</i>

<b>Tabla comparativa del Análisis Dinámico</b>		
<b>Modelo de Resorte Eligo</b>	<b>Deformación Permanente</b>	<b>Observaciones</b>
Japonés	2.25 mm	<i>El hule no presentó anomalía o defecto alguno. Este resorte es un poco menos elástico que el modelo anterior, aún así es confiable si se habla de rendimiento. El mantenimiento de este resorte será más frecuente y por ser un poco más rígido que el modelo francés será una tarea difícil las labores de montaje y desmontaje.</i>
Nacional	5.9 mm	<i>A los 108 000 ciclos de iniciada la prueba se detectó una grieta en la espira central del resorte de 22 m de longitud, al final de la prueba (1 000 000 de ciclos) esta fisura no sufrió cambios pero se localizó otra grieta de 25 mm de longitud en lado opuesto a la anterior. Estas grietas se presentaron paralelas al eje de carga y en el elastómero con penetración inclinada y no en forma radial. La altura total recuperó 0.6 mm de los 6.5 mm que había disminuido. Los resultados de este modelo no son confiables debido a la gran deformación que presentó mostrando que sus propiedades elásticas son deficientes y están muy por debajo de los modelos de resorte extranjeros; cabe señalar además las anomalías acontecidas durante la prueba en el recubrimiento elastomérico.</i>

**Conclusiones de la Prueba Dinámica:** Comparando los resultados obtenidos de los tres modelos de resorte eligo queda claro que el modelo francés obtuvo los mejores resultados de esta prueba dinámica, puede notarse que las propiedades elásticas de este resorte no se afectan de manera notoria y se encuentran en un nivel óptimo el cual se refleja en el rendimiento del resorte además de la poca dificultad que ofrecerá en las labores de mantenimiento. Obviamente que el recubrimiento elastomérico tuvo mucho que ver con estos resultados tan positivos al no presentar anomalía alguna que afectara el desempeño del resorte durante la prueba. Al retirarse el hule, el alma de acero solo presentó la deformación ya mencionada en la tabla comparativa, pero ninguna otra condición que denotara alguna anomalía.

*El resorte japonés por ser menos elástico que el modelo francés presentó una mayor deformación permanente durante esta prueba dinámica; sin embargo, esto no afectó el rendimiento del resorte para cumplir con el objetivo de este estudio. Los inconvenientes de este resorte es que el mantenimiento se dará con mayor frecuencia en comparación con su homólogo francés. El alma de acero al ser separada del recubrimiento elastomérico presentó la deformación indicada en la tabla comparativa, y tampoco mostró anomalía alguna.*

*En cuanto al modelo de resorte eligo nacional observamos que su elasticidad no cumple con los requerimientos puesto que la deformación que presenta queda muy por debajo de los modelos de resorte extranjeros y el comportamiento que nos muestra es irregular e ineficiente, cabe mencionar que desde la prueba estática este resorte presentó deficiencias por la rigidez del acero. El hule presentó defectos durante y al término de la prueba. Al retirar el elastómero pudimos ver que el alma de acero empezaba a mostrar condiciones para una futura falla por fatiga, observamos que su deformación permanente fue mayor, la elasticidad del resorte casi fue nula y su rigidez se va aumentada, estas condiciones, de seguir así provocarían una fractura en el acero.*

*Todo esto nos sugiere analizar más profundamente este modelo de resorte eligo y seguir comparando sus resultados con sus homólogos de procedencia extranjera.*

Para las dos pruebas siguientes se tomó una muestra de rebaba del acero de cada resorte eligo para realizar un análisis más profundo y cuyos resultados nos explicaran el por qué del comportamiento de cada modelo de resorte.

#### **4.3.3 Análisis Químico**

Este análisis químico fue del tipo cuantitativo, es decir, se determinó la concentración de ciertos elementos que integran la aleación de acero de los resortes eligo. De la misma forma que en las pruebas anteriores se procedió a este estudio en el orden ya establecido bajo las siguientes condiciones de prueba:

Temperatura: 20 °C

Presión: 585 mmHg

Humedad: 40%

Para la realización de esta prueba se utilizó un Espectrofotómetro de absorción atómica, determinador de carbono y azufre.

Los resultados se presentan a continuación:

a) *Resorte Eligo Francés*

<i>Análisis Químico</i>	<i>Obtenido</i>	<i>Especificado AISI 5160</i>
% Carbono	0.4850	0.45 - 0.75
% Manganeso	0.8025	0.60 - 1.30
% Azufre	0.0308	0.050 Máx.
% Silicio	0.2342	0.10 - 0.30
% Cromo	0.8213	0.70 - 0.90
% Molibdeno	0.0300	0.060 Máx.

b) *Resorte Eligo Japonés*

<i>Análisis Químico</i>	<i>Obtenido</i>	<i>Especificado AISI 5160</i>
% Carbono	0.4915	0.45 - 0.75
% Manganeso	0.8130	0.60 - 1.30
% Azufre	0.0298	0.050 Máx.
% Silicio	0.2146	0.10 - 0.30
% Cromo	0.7540	0.70 - 0.90
% Molibdeno	0.0200	0.060 Máx.

c) *Resorte Eligo Nacional*

<i>Análisis Químico</i>	<i>Obtenido</i>	<i>Especificado AISI 5160</i>
% Carbono	0.5630	0.45 - 0.75
% Manganeso	0.7581	0.60 - 1.30
% Azufre	0.0204	0.050 Máx.
% Silicio	0.1869	0.10 - 0.30
% Cromo	0.7100	0.70 - 0.90
% Molibdeno	0.0100	0.060 Máx.

**Observaciones:** El modelo nacional presentó el más alto porcentaje de carbono a diferencia de sus homólogos extranjeros. Los otros elementos de aleación como el cromo, manganeso, silicio, azufre y molibdeno, la proporción de cada uno de ellos fue menor en el modelo japonés y aún más en el nacional con respecto al resorte eligo francés.

Cabe señalar que cada elemento aumenta las propiedades del acero, el cromo nos ayuda a tener una profundidad de temple más homogénea, el manganeso se añade como antioxidante además de que provee al acero de una mayor resistencia al desgaste, el silicio también lo protege contra la oxidación. El azufre le da propiedades de adherencia, esto nos facilitará la vulcanización del acero.

**Conclusiones del Análisis Químico:** El resorte eligo nacional posee un mayor contenido de carbono, por lo que la dureza del acero tiende a ser mayor y la elasticidad se verá mermada, pero estas propiedades serán definidas por el tratamiento térmico que se aplique.

Sabemos que los tres resortes se encontraban dentro de las especificaciones que indica la norma. Esto nos lleva realizar el siguiente análisis para observar el tipo de estructura que tiene el acero, revisar si el tratamiento térmico fue aplicado correctamente.

#### **4.3.4 Análisis Metalográfico**

Este estudio nos permitió analizar la estructura cristalina del acero que integra a cada uno de los modelos de resorte eligo. Se utilizó un microscopio para la realización de esta prueba, los resultados se presentan en la siguiente tabla comparativa:

<b>Tabla comparativa del Análisis Metalográfico</b>			
<b>Modelo de Resorte Eligo</b>	<b>Tratamiento Térmico</b>	<b>Estructura cristalina</b>	<b>Características de la estructura</b>
Francés	Templado y Revenido	Martensita Revenida	Las propiedades de ductilidad y tenacidad se incrementan, la dureza disminuye y la estructura interna se alivia de esfuerzos internos.
Japonés	Templado y Revenido	Martensita Revenida	
Nacional	Templado	Martensita	Es extremadamente dura y frágil carece de tenacidad, y por tanto, tiene un uso limitado.

A continuación veremos la microestructura del acero del resorte eligo modelo nacional, en la figura 4.3.4 cuyas características se describen en la tabla comparativa del análisis metalográfico.



FIGURA 4.3.4 Microestructura del acero del resorte eligo modelo nacional.

**Conclusiones del Análisis Metalográfico:** El resorte eligo nacional muestra una estructura martensítica con revenido parcial lo que indica que no hubo un proceso de revenido o no se realizó adecuadamente el mismo, como se señala en la tabla comparativa este tipo de estructura posee una dureza elevada pero esta característica le da una alta fragilidad al acero, si a esto añadimos que la proporción de carbono era mayor para este modelo con respecto a sus homólogos extranjeros entonces nuestro resorte sí se ve afectado en su estructura por estas condiciones.

Este análisis nos aclara el por qué del comportamiento irregular del resorte eligo nacional que se denota en una elasticidad muy limitada y por consecuencia alta rigidez. Estos resultados nos muestran un desempeño deficiente de este resorte y lo colocan muy por debajo de los modelos francés y japonés.

#### **4.3.5 Análisis del Elastómero por el Método de Líquidos Penetrantes**

##### **♦ Método de Líquidos Penetrantes**

El método de examen con líquidos penetrantes es un medio efectivo, para detectar discontinuidades, las cuales están abiertas a la superficie en metales no porosos y otros materiales, las discontinuidades típicas detectadas por este método son grietas, costuras, traslapes, juntas frías, laminaciones y porosidad.

El método o prueba de líquidos penetrantes (LP), se basa en el principio físico conocido como "Capilaridad" y consiste en la aplicación de un líquido, con buenas características de penetración en pequeñas aberturas, sobre la superficie limpia del material a inspeccionar.

Una vez que ha transcurrido un tiempo suficiente, como para que el líquido penetrante recién aplicado, penetre considerablemente en cualquier abertura superficial, se realiza una remoción o limpieza del exceso de líquido penetrante, mediante el uso de algún material absorbente (papel, trapo, etc.) y, a continuación se aplica un líquido absorbente, comúnmente llamado revelador, de color diferente al líquido penetrante, el cual absorberá el líquido que haya penetrado en las aberturas superficiales.

Por consiguiente, las áreas en las que se observe la presencia de líquido penetrante después de la aplicación del líquido absorbente, son áreas que contienen discontinuidades superficiales (grietas, perforaciones, etc.) En la figura 4.3.5 se puede visualizar el procedimiento general de ejecución del método de LP.

En general, existen dos principales técnicas del proceso de aplicación de los LP: Estas dos principales técnicas son comúnmente conocidas como: Líquidos Penetrantes Visibles y Líquidos Penetrantes Fluorescentes.

La diferencia entre ambas es que, en una se emplean líquidos penetrantes que son visibles a simple vista ó con ayuda de luz artificial blanca y, en la segunda, se emplean líquidos penetrantes que solo son visibles al ojo humano cuando se les observa en la oscuridad y utilizando luz negra o ultravioleta, lo cual les da un aspecto fluorescente.

##### **♦ Análisis del Elastómero**

Esta prueba se llevó a cabo posteriormente del análisis dinámico y este elemento fue separado del alma de acero. Para visualizar estas imperfecciones nos ayudamos de luz ultravioleta e inspeccionamos visualmente.

Los resultados obtenidos se describen en su correspondiente tabla comparativa:

Proceso General de Aplicación de Líquidos Penetrantes

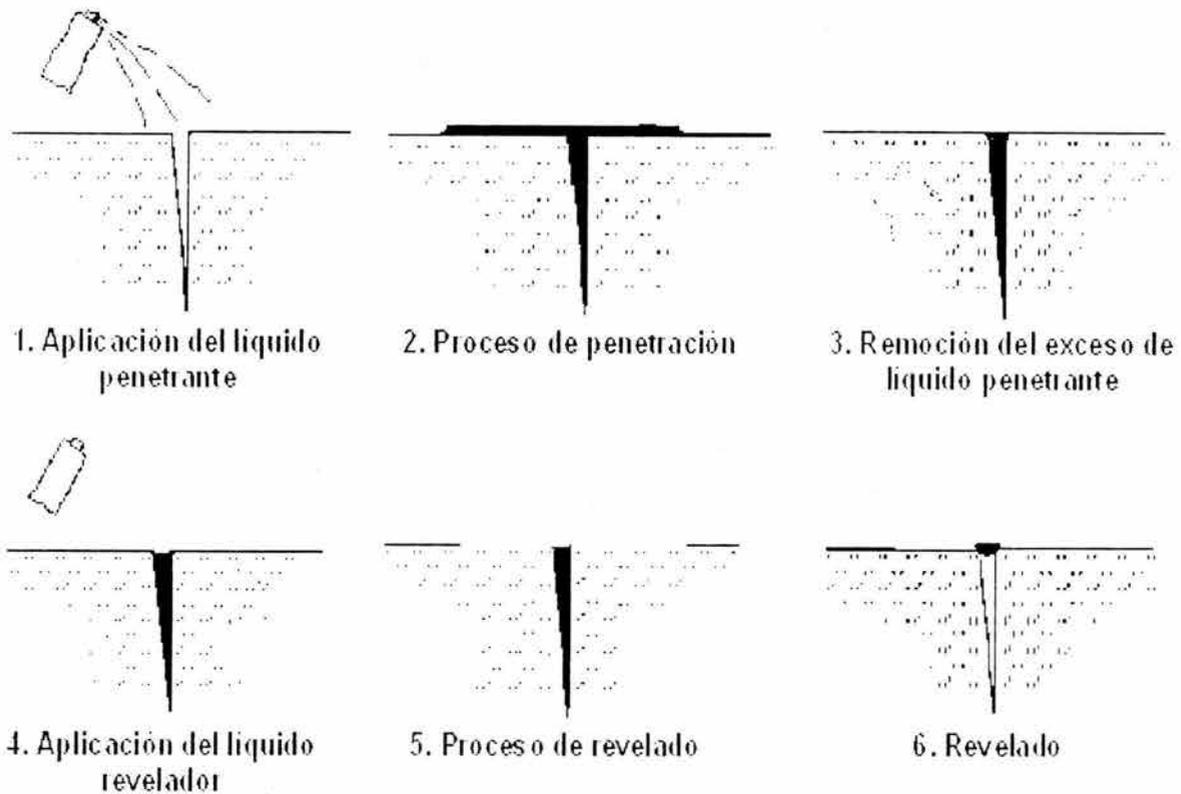


FIGURA 4.3.5 Procedimiento general de ejecución del método de Líquidos Penetrantes.

<i>Tabla comparativa del Análisis del Hule por el Método de Líquidos Penetrantes</i>	
<i>Modelo de Resorte Eligo</i>	<i>Características del Recubrimiento Elastomérico después de la prueba</i>
<i>Francés</i>	<i>Al término de la prueba no se encontró ninguna discontinuidad superficial</i>
<i>Japonés</i>	<i>También este recubrimiento no presentó ninguna discontinuidad en su superficie.</i>
<i>Nacional</i>	<i>Presentó ciertas imperfecciones tales como grietas y poros que pueden corregirse que no afectan el rendimiento del resorte en su conjunto.</i>

**Conclusión del Análisis del Elastómero:** El recubrimiento del resorte eligo nacional a diferencia de sus homólogos de procedencia extranjera presentó ciertas imperfecciones pero que no afectan el comportamiento del resorte en su conjunto y a diferencia del alma de acero solo hay algunos detalles para corregir las discontinuidades que mostró durante este análisis.

A continuación se presenta un resumen de todos los análisis aplicados al Resorte Eligo de Suspensión Secundaria.

#### **4.4 Resumen de los Análisis aplicados al Resorte Eligo**

1. **Prueba Estática:** Al comparar los tres resortes de acero, el modelo nacional quedó muy por debajo de los modelos extranjeros; cabe señalar que su comportamiento es un tanto regular debido a que el elastómero eleva sus propiedades elásticas más sin embargo, el alma de acero por sí solo nos muestra un comportamiento rígido, es decir, la dureza del acero no parece ser la adecuada.

Ante esta situación se procedió a realizar otros análisis enfocados directamente en el resorte eligo nacional con el objetivo de encontrar los factores que influyeron en el deficiente comportamiento del mismo.

2. **Prueba Dinámica:** Comparando los resultados obtenidos de los tres modelos de resorte eligo queda claro que el modelo francés obtuvo los mejores resultados de esta prueba dinámica, puede notarse que las propiedades elásticas de este resorte no se afectan de manera notoria y se encuentran en un nivel óptimo el cual se refleja en el rendimiento del resorte además de la poca dificultad que ofrecerá en las labores de mantenimiento. Obviamente que el recubrimiento elastomérico tuvo mucho que ver con estos resultados tan positivos al no presentar anomalía alguna que afectara el desempeño del resorte durante la prueba.

Al retirarse el hule, el alma de acero solo presentó la deformación ya mencionada en la tabla comparativa, pero ninguna otra condición que denotara alguna anomalía.

3. **Análisis Químico:** El resorte eligo nacional posee un mayor contenido de carbono, por lo que la dureza del acero tiende a ser mayor, pero estas propiedades serán definidas por el tratamiento térmico que se aplique.

Sabemos que los tres resortes se encontraban dentro de las especificaciones que indica la norma. Esto nos lleva realizar el siguiente análisis para observar el tipo de estructura que tiene el acero, revisar si el tratamiento térmico fue aplicado correctamente.

- 4. Análisis Metalográfico:** El resorte eligo nacional muestra una estructura martensítica con revenido parcial lo que indica que no hubo un proceso de revenido o no se realizó adecuadamente el mismo, como se señala en la tabla comparativa este tipo de estructura posee una dureza elevada pero esta característica le da una alta fragilidad al acero, si a esto añadimos que la proporción de carbono era mayor para este modelo con respecto a sus homólogos extranjeros entonces nuestro resorte sí se ve afectado en su estructura por estas condiciones.

Este análisis nos aclara el por qué del comportamiento irregular del resorte eligo nacional que se denota en una elasticidad muy limitada y por consecuencia alta rigidez. Estos resultados nos muestran un desempeño deficiente de este resorte y lo colocan muy por debajo de los modelos francés y japonés.

- 5. Análisis del Elastómero:** El recubrimiento del resorte eligo nacional a diferencia de sus homólogos de procedencia extranjera presentó ciertas imperfecciones pero que no afectan el comportamiento del resorte en su conjunto y a diferencia del alma de acero solo hay algunos detalles para corregir las discontinuidades que mostró durante este análisis.

#### **4.5 Conclusiones de los Análisis aplicados al Resorte Eligo**

De los datos obtenidos se concluye que el modelo de resorte nacional es más rígido, por lo cual disminuye su efecto de amortiguamiento, transmitiendo a los componentes del tren un mayor nivel de ruido y vibraciones que pueden afectar tanto la estructura como los componentes eléctricos y electrónicos provocando con esto un incremento en los períodos de mantenimiento (recambio de refacciones) lo que aumentará los costos de esta actividad.

Para el resorte fracturado el estudio arroja que el alma del metal presenta una discontinuidad superficial en toda su longitud, la cual trabaja como entalladura, es decir, como concentrador de esfuerzos a partir del cual se desarrolla prematuramente el efecto de fatiga por lo que la vida útil del resorte. Esta falla en operación puede originar que la caja se incline y pueda rozar con el andén poniendo en peligro la integridad del tren y en alguna medida la de los usuarios.

De los dos puntos anteriores se concluye que el prototipo de resorte eligo nacional no es fiable para su utilización en el material rodante del S.T.C. metro por lo cual se considera rechazado y se le sugiere al proveedor que toda vez superadas estas deficiencias presente un nuevo prototipo.

## *CONCLUSIÓN*

El desarrollar un prototipo nacional de resorte eligo representa un gran avance para el proyecto de integración del S.T.C. Metro, desafortunadamente pudimos constatar a través de pruebas y análisis que este modelo no cumplió con los requerimientos de operación y seguridad en comparación a sus antecesores de procedencia extranjera. Sin embargo, no podemos hablar de un retroceso mucho menos de tiempo perdido.

Este trabajo de tesis no tiene el objetivo desechar lo que se ha logrado sino por el contrario contribuir a la detección de aquellos puntos en los que debe trabajarse para mejorar el diseño, como el análisis de la estructura del acero cuya dureza evita que cumpla su función de amortiguamiento.

Se debe mejorar en varios aspectos con la información y experiencia obtenidas, utilizando alguna metodología (empleando un modelo o sistema de calidad) que nos guíe en todo el desarrollo de un nuevo prototipo desde una revisión de materiales (que sean los especificados), el proceso de manufactura del resorte hasta el comparar costos con varios proveedores buscando siempre la posibilidad de que sea un diseño rentable, es decir, que producirlo en el país sea más económico que importarlo.

Al integrarse este resorte se desarrollará una tecnología propia que permita reducir la salida de divisas por su adquisición en el extranjero dado el número de piezas que se consumen anualmente, se contribuye con la economía nacional al generar empleos.

## ***GLOSARIO***

**Austenita:** Hierro  $\gamma$ , FCC, con un contenido máximo de 2.11% de carbono en solución sólida.

**Bainita:** Mezcla de  $\alpha$  y carburos muy finos que presentan una estructura en forma de agujas y que se producen por la transformación de la austenita entre 1000 °F (538 °C) y alrededor de los 500 °F (260°C).

**Carburo:** En el contexto de las aleaciones basadas en hierro, el carburo significa carburo de hierro,  $Fe_3C$ . También se denomina cementita.

**Crecimiento de grano:** Desarrollo de tamaños de grano mayores por medio del crecimiento preferencial de cristales (granos) de mayor tamaño después de la recristalización.

**Copolimerización:** Unión entre monómeros diferentes.

**Elastómero:** Alto polímero con una estructura enrollada y con características similares a las del caucho.

**Esferoidita:**  $\alpha$  + carburo esferoidizado, que se produce al calentar perlita, bainita o martensita a temperaturas elevadas. Se caracteriza por tener como su nombre lo dice una forma esférica.

**Eutéctico:** Significa “bajo punto de fusión”, en la práctica se refiere tanto a la composición en el punto mínimo de solidificación como la temperatura a la cual solidifica el líquido de composición eutéctica, todo esto aplicado a las aleaciones.

**Eutectoide:** Transformación de una fase sólida a otras dos fases sólidas durante el enfriamiento.

**Ferrita:** Hierro  $\alpha$ , BCC, con un contenido máximo de 0.022% de carbono en solución sólida.

**Inspección:** Es el proceso de medición, examen, prueba o de alguna otra forma de comparación de la unidad de producto bajo consideración.

**Intersticialidad:** Se nombra así a una imperfección (hueco) en la estructura cristalina de un metal y esto se debe a una distorsión de la red producida por la presencia de un átomo en la estructura.

**Lote o partida:** Se define como el conjunto de unidades de producto del cual se toma la muestra para su inspección.

**Martensita:** Fase metaestable, de estructura tetragonal de cuerpo centrado (BCT), formada al templar el hierro y que contiene carbono.

**Martensita revenida:** Martensita que se ha calentado para producir hierro BCC y una fina dispersión de carburo de hierro.

**Mero:** Unidad de pocos átomos que se une con otras unidades para formar un polímero.

**Monómero:** La misma unidad de un mero pero que está sola, es decir, que no está formando parte de un polímero.

**Muestra:** Consiste de una o más unidades de producto tomadas de un lote o partida.

**Perlita:** Mezcla de las fases  $\alpha$  y de carburo en placas paralelas, producidas por la transformación de la austenita entre 1341 °F (727 °C) y 1000 °F (538 °C).

**Polímero:** Molécula formada por grupos estructurales repetidos o meros.

**Recristalización:** Formación de nuevos cristales equiaxiales libres de esfuerzo en un material trabajado en frío.

**Temperatura eutéctica:** Temperatura a la cual un líquido de composición eutéctica se solidifica formando dos sólidos simultáneamente bajo condiciones de equilibrio. También es la temperatura a la cual un líquido y dos sólidos están en equilibrio.

**Termofijo:** Alto polímero que se estabiliza en una red rígida. Este polímero no se funde cuando se calienta sino que se carboniza y descompone en un proceso llamado degradación. Estos polímeros no son reutilizables.

**Termoplástico:** Alto polímero que fluye y se funde cuando se calienta. El retal se puede reconvertir fundiéndolo y reutilizándolo.

**Unidad de producto:** Es aquella que se inspecciona para su clasificación en defectuosa o no defectuosa o para contar el número de defectos que contiene.

## ***BIBLIOGRAFÍA***

- *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*  
*Serowe Kalpakjian*  
*Steven R. Schmid*  
*Pearson Educación*  
*4a. Edición*
  
- *Fundamentos de Manufactura Moderna*  
*Materiales, Procesos y Sistemas*  
*Mikell P. Groover*  
*Prentice Educación*
  
- *Diseño en Ingeniería Mecánica*  
*Joseph Edward Shigley*  
*Larry D. Mitchell*  
*Mc Graw Hill*
  
- *Bogies para carros del Metro*  
*S.T.C. Metro*  
*A09-G2-4-13*
  
- *Material Rodante*  
*S.T.C. Metro*  
*A09-G3-7-08*
  
- *Centro de Información y Documentación*  
*Técnica*  
*S.T.C. Metro*
  
- *NOM-Z12-1987*  
*Muestreo para la inspección por atributos*  
*Información General y Aplicaciones*
  
- *ISO 2859-1974*  
*Sampling procedures and tables for inspection by attributes*