

41126
80



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON**

**“OBTENCIÓN DE CURVAS DE CALIBRACIÓN
PARA EVALUAR ESFUERZOS RESIDUALES
EN MATERIALES FERROMAGNETICOS”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
JOSE LUIS OLVERA LOPEZ

ASESOR : ING. ALEJANDRO RODRÍGUEZ LORENZANA

MÉXICO

2002

A



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.

PAGINACION

DISCONTINUA

A TÍ SEÑOR. Por haberme permitido concluir este trabajo y por dejarme contemplar día a día tu maravillosa creación. ¡No te pido nada por que todo me lo das, te ofrezco todo de mí por que nada tengo!.

A MIS PADRES. Por todo su amor, apoyo, consejos y cariño a lo largo de mi vida, sin los cuales no hubiera podido dar fin a este trabajo. ¡Gracias mis viejos!

A MIS HERMANOS. Mayo, Javi, Lety, Sandra, Alicia, Mari y Ceci; por su amor y apoyo incondicional de toda la vida.

A MONSE. Por su apoyo, amor y comprensión en todo momento ¡gracias!

AL ING. ALEJANDRO RODRÍGUEZ LORENZANA Director de este Trabajo en la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón

AL ING. FRANCISCO JAVIER MERINO CABALLERO. Asesor del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) por su dirección, apoyo y consejos brindados para la realización de esta tesis. Gracias Javi.

A MIS AMIGOS. Miguel y Alex Nava, así como a Víctor Rivera, quienes siempre me han tendido la mano en todo momento y que de una u otra forma me ayudaron en este trabajo.

AL PERSONAL DEL ININ. Ángeles, Carlos, Carmen, Eduardo, Miguel, Rogelio, Víctor, Laura, Nacho, Pedro, Juana y Tere por su apoyo y consejos durante mi estancia en el instituto.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL ATÓNOMA DE MÉXICO Y A LA ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGÓN. Por la formación Académica y Profesional que me brindaron.

A TÍ SEÑOR. Por haberme permitido concluir este trabajo y por dejarme contemplar día a día tu maravillosa creación. ¡No te pido nada por que todo me lo das, te ofrezco todo de mí por que nada tengo!.

A MIS PADRES. Por todo su amor, apoyo, consejos y cariño a lo largo de mi vida, sin los cuales no hubiera podido dar fin a este trabajo. ¡Gracias mis viejos!

A MIS HERMANOS. Mayo, Javi, Lety, Sandra, Alicia, Mari y Ceci; por su amor y apoyo incondicional de toda la vida.

AL ING. ALEJANDRO RODRÍGUEZ LORENZANA Director de este Trabajo en la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón

AL ING. FRANCISCO JAVIER MERINO CABALLERO Asesor del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por su dirección, apoyo y consejos brindados para la realización de esta tesis. Gracias Javi.

A MIS AMIGOS Miguel y Alex Nava, así como a Víctor Rivera, quienes siempre me han tendido la mano en todo momento y que de una u otra forma me ayudaron en este trabajo.

AL PERSONAL DEL ININ Ángeles, Carlos, Carmen, Eduardo, Miguel, Rogelio, Victor, Laura, Nacho, Pedro, Juana y Tere por su apoyo y consejos durante mi estancia en el instituto.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL ATÓNOMA DE MÉXICO Y A LA ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON Por la formación Académica y Profesional que me brindaron.

ÍNDICE

	Página
ANTECEDENTES.	1
OBJETIVO GENERAL.	4
CAPÍTULO 1 ESFUERZOS RESIDUALES.	5
1.1 ESFUERZOS RESIDUALES.	5
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES.	6
1.2.1 MACROESFUERZOS.	6
1.2.2 MICROESFUERZOS.	6
1.3 CARACTERIZACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.	6
1.4 MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.	8
1.4.1 MÉTODOS DESTRUCTIVOS.	9
1.4.2 MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.	9
1.5 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN.	11
1.5.1.1 DEFORMACIÓN ELÁSTICA.	11
1.5.1.2 DEFORMACIÓN PLÁSTICA.	12
1.5.1.3 ESFUERZO A LA FLUENCIA.	13
1.5.1.4 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.	14
1.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS.	14
1.6.1 RECOCIDO.	14
1.6.2 REVENIDO.	14
1.6.3 NORMALIZADO.	15
1.6.4 TEMPLE.	15
1.6.5 RELEVADO DE ESFUERZOS.	16
CAPÍTULO 2 MÉTODOS MAGNÉTICOS.	18
2.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES.	18
2.2 MÉTODO MAGNÉTICO DEL RUIDO BARKHAUSEN.	21
2.3 MÉTODO DE MAGNETOESTRCCIÓN.	22

CAPÍTULO 3 MÉTODO DEL RUIDO BARKHAUSEN.	25
3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS.	25
3.1.1 CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS.	28
3.1.2 CONSIDERACIONES ESTÁTICAS.	31
3.1.3 PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN.	32
3.1.3.1 CALIBRACIÓN UNIAXIAL.	33
3.1.3.2 CALIBRACIÓN BIAXIAL.	34
CAPÍTULO 4 DESARROLLO EXPERIMENTAL.	37
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.	37
4.1.1 ANÁLISIS METALOGRAFÍCO.	37
4.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA.	42
4.1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS.	44
4.2 ENSAYOS MECÁNICOS.	45
4.2.1 ENSAYO DE TENSIÓN.	46
4.2.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN.	49
4.2.3 ENSAYO DE DUREZA.	51
4.3 TRATAMIENTOS TÉRMICOS.	53
4.3.1 ELIMINACIÓN DE TENSIONES.	53
4.4 MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.	55
4.4.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS RECTANGULARES.	56
4.4.1.1 ENSAYO DE TENSIÓN.	58
4.4.1.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN.	59
4.5 ELABORACIÓN DE CURVAS DE CALIBRACIÓN.	60

CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

CONCLUSIONES.

GLOSARIO.

ANTECEDENTES

Cuando un acero no está sometido a cargas de compresión o de tensión, los esfuerzos o tensiones internas que existan en él estarán también en equilibrio, por tanto el comportamiento de dicho material será el deseado de acuerdo con sus características mecánicas de diseño. Pero sucede muy a menudo que durante los procesos de maquinado que deforman al material tales como el cepillado, rolado, taladrado, prensado, estirado, rectificado etc. y además, como resultado de algunos tratamientos térmicos convencionales a que es sometido y aún, después de los diversos procesos de soldadura, se inducen cambios microscópicos que alteran el estado de equilibrio de su estructura, dichos cambios originan lo que actualmente es conocido con el nombre de Esfuerzos Residuales. Los Esfuerzos Residuales (ER) son pequeños estados de tensión o de compresión entre los planos atómicos en la red cristalina del material. Estos esfuerzos pueden ser de gran importancia y tener efectos profundos sobre las propiedades, vida y estabilidad dimensional del material. Y en ocasiones son responsables de diversos fenómenos tales como el crecimiento de grietas y la posterior falla del material.⁽¹⁾

Existen métodos mecánicos para medición de esfuerzos residuales que involucran la remoción de parte del material, en alguno de ellos el material es perforado en su superficie con un barreno y de esta forma se puede llegar a medir los cambios de tensión debido a la redistribución de tensión en el material restante. Este es un método indirecto porque los esfuerzos residuales también existen en el material separado, los cuales son medidos indirectamente por un método matemático, usado para calcular los esfuerzos residuales originales a partir de la medida del material remanente. Dichos cálculos son comúnmente muy sensibles a los efectos de los errores impuestos por el desequilibrio de tensión y compresión resultado de la remoción del material.

La medida de los esfuerzos residuales se ha vuelto tan importante como la medida de propiedades mecánicas usuales en la consideración de la fractura, la fatiga, corrosión, y características de carga para diseñar componentes de cualquier tipo. Sin embargo, en la práctica de la ingeniería común, esta medición no es considerada como parte de los parámetros de diseño

Actualmente existen diversos procedimientos para la detección de los esfuerzos residuales, cada uno de ellos, basado en técnicas específicas que pueden ser:

Destructivas: cuando se recurre al seccionamiento del material y su posterior análisis

No Destructivas: empleando métodos indirectos de medición de esfuerzos sin tener que destruir el material. De entre estos últimos se puede mencionar el método de medición que emplea el Ruido Barkhausen, cuyo principio de acción está basado en las propiedades magnetoelásticas de los materiales.

El presente trabajo hace uso de una de estas técnicas para la medición de esfuerzos residuales en diversos aceros con esfuerzos de cedencia comprendidos en un rango de 300 a 700 MPa. La selección de los aceros se realiza de acuerdo a su Esfuerzo de Cedencia (σ_c), así como sus diversas propiedades mecánicas.

Mediante el empleo de este principio básico, se procede a la construcción de curvas de calibración para esfuerzos residuales comprendidos dentro del rango mencionado, dichas curvas de calibración son construidas con la ayuda del equipo llamado STRESSCAN-100 que proporciona un parámetro magnetoelástico de acuerdo con el estado de tensión o de compresión interna que guarde el material a analizar, determinado por el maquinado, tratamiento térmico y carga aplicada en relación con su límite de cedencia y área correspondiente.

La construcción de dichas curvas es aplicable para determinar los esfuerzos residuales existentes en diversos materiales ferromagnéticos, utilizados en la industria para aplicaciones diversas y su posible remoción con métodos de atenuación apropiados. Es importante mencionar que las curvas de calibración sólo serán aplicables para materiales con esfuerzos residuales comprendidos dentro del rango (Parámetro Magnetoelástico-Esfuerzo) de cada curva construida, en caso de que algún material presentara un esfuerzo de cedencia mayor al manejado dentro de esta investigación, se tendría que recurrir a su construcción siguiendo los procedimientos que en esta tesis se indican.

Para su realización, este trabajo se dividió en 5 capítulos, además de conclusiones, anexos y bibliografía consultada; los cuales se sintetizan de la forma siguiente:

Capítulo 1. Se da una definición de Esfuerzos Residuales, orígenes, clasificación, características y métodos empleados para la eliminación o atenuación de los mismos.

Capítulo 2. Breve descripción de los métodos magnetoelásticos para medición de esfuerzos residuales: características y principios fundamentales.

Capítulo 3. Método del ruido Barkhausen: características y principios básicos de calibración Uniaxial y Biaxial.

Capítulo 4. Desarrollo experimental: caracterización del material, realización de ensayos mecánicos, medición de esfuerzos residuales y construcción de curvas de calibración.

Capítulo 5. Discusión de resultados: análisis de los resultados, curvas de calibración, ensayos mecánicos y metalográficos.

OBJETIVO

Construir curvas para la calibración de esfuerzos residuales en materiales de tipo ferromagnético que ayuden a la medición de esfuerzos residuales de aceros con esfuerzos de cedencia similares a los analizados, mediante el empleo del Parámetro Magnetoelástico basado en el Ruido Barkhausen.

CAPITULO 1

ESFUERZOS RESIDUALES

1.1 ESFUERZOS RESIDUALES

Las tensiones que quedan en los metales después de una deformación en frío o en un enfriamiento rápido se llaman *esfuerzos residuales* o *internos*, se dice que todas las tensiones actuales o potenciales son siempre internas; es decir, todo aquel estado de tensión o compresión derivado de la deformación mecánica en caliente o en frío, soldadura, tratamientos térmicos, servicio, etc, es conocido bajo el nombre de esfuerzos residuales.

Los esfuerzos residuales son una de las tres características fundamentales que determinan el comportamiento de un metal en servicio y son tan importantes como la composición química y la microestructura que constituyen a dicho metal.

Al proyectar máquinas o elementos estructurales se suele considerar sólo la magnitud de los posibles esfuerzos en servicio despreciando los esfuerzos residuales, que pueden resultar de la fabricación del metal aún cuando, en algunos casos puedan sobrepasar el valor de los primeros. En los metales tratados térmicamente, pueden producirse esfuerzos residuales muy elevados que, temporalmente pueden quedar ocultos y dar lugar a la rotura súbita de secciones gruesas de acero, o en el mejor de los casos, la deformación del mismo, haciendo que resulte fallido el diseño proyectado.

Los materiales no son ideales. Las fallas en ellos son de origen diferente, como inicios de grieta, vacancias y dislocaciones que pueden ser las fuentes de esfuerzos residuales presentes en todos los productos terminados, pero su presencia normalmente no hace que sean incapaces para el servicio. Mientras las estructuras son diseñadas para resistir cargas dinámicas, bastante a menudo las deformaciones plásticas, y los cambios térmicos originan adición de esfuerzos residuales. El esfuerzo residual total y la carga externa aplicada puede exceder el esfuerzo máximo del material. Por consiguiente, los estados de tensión residuales deberían ser de gran preocupación a diseñadores de toda la ingeniería. Los esfuerzos se introducen fácilmente pero son difíciles de relevar o redistribuirlos

Los procesos para tal acción son costosos e incompletos. Además, componentes grandes o estructuras, como los vehículos de transporte, de la industria nuclear como los reactores, y las naves son difíciles de aliviar de tensión y pueden causar importantes cambios dimensionales.

Alternativamente, se introducen a menudo intencionalmente los esfuerzos, porque ello puede ser favorable. Por consiguiente, es importante evaluar la distribución de estos esfuerzos para poder predecir la carga máxima y la capacidad productiva al diseñar componentes y estructuras.

Si el resultado de las cargas aplicadas y de los esfuerzos residuales excede la magnitud del esfuerzo de diseño, se tendrá una situación crítica, no solo de diseño, sino también de seguridad. Por ejemplo, para determinar el nivel crítico de presión de una tubería, se deberá considerar la presión del fluido y las tensiones residuales originadas por el rolado del material con que fue creada dicha tubería

1.2 CLASIFICACION DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES

1.2.1 Macroesfuerzos.

Son esfuerzos que afectan una porción relativamente grande del metal. Varían continuamente a través del cuerpo y actúan sobre regiones grandes con relación a las dimensiones atómicas.

1.2.2 Microesfuerzos.

Los micro-esfuerzos están ubicados en los granos individuales, son llamados también esfuerzos de textura y como se mencionó actúan sobre regiones a veces de sólo unas cuantas células-unidad aunque puede extenderse a la mayor parte del grano. Debido a la anisotropía de las constantes elásticas de los cristales, los microesfuerzos pueden variar de un grano a otro.

Los esfuerzos residuales sólo pueden ser elásticos. El valor máximo que llega a alcanzar el esfuerzo residual es el límite elástico del material, y cada esfuerzo queda determinado por su magnitud y dirección.⁽²⁾

1.3 CARACTERIZACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES

Los esfuerzos residuales sólo son una manifestación de la deformación elástica. El valor máximo que llega a alcanzar el esfuerzo residual es el límite elástico del material. Son el resultado de la deformación elástica de un cuerpo, que puede provenir de un cambio de forma o de un volumen no homogéneos. La precipitación de partículas de una segunda fase en una matriz metálica es un

ejemplo de las variaciones de volúmen no homogénea que producen microesfuerzos localizados.

La transformación de fase de austenita a martensita que se produce durante el temple del acero, es un ejemplo sobresaliente de un cambio de volúmen no uniforme que produce esfuerzos residuales. Las variaciones de volúmen no requieren necesariamente cambios de fase o temple para producir esfuerzos residuales. En el enfriamiento de un lingote grande y caliente de un metal que no muestra cambios de fase, bastan las diferencias de temperatura existentes entre la superficie y el centro para que se produzcan esfuerzos residuales.⁽³⁾

Son variados los mecanismos que desencadenan la aparición de esfuerzos residuales, a continuación se mencionan los más comunes.⁽⁴⁾

- 1. El trabajo o deformado en frío que cambia las propiedades físicas de los metales, incrementando su resistencia a la tracción, su límite a la fluencia y su dureza, con la consecuente disminución de su ductilidad.**
- 2. El precalentamiento de las piezas de forja a temperaturas por debajo de la temperatura crítica de transformación o cuando no es uniforme.**
- 3. en las piezas de acero forjado con martillo demasiado pequeño debido a que la deformación del metal no es uniforme**
- 4. Durante el trabajo mecánico si se usa una herramienta con poco filo.**
- 5. Las entalladuras, desgastes y fricción, son los factores que producen concentración local de esfuerzos.**
- 6. El enfriamiento desigual de las piezas calientes de acero, da lugar a esfuerzos residuales. Una ligera corriente de aire no considerada en el interior del taller puede ser motivo suficiente para ello.**

Además dentro de los originados por el trabajo en frío tenemos.⁽⁶⁾

- 7. Soldadura por puntos y la soldadura a tope producen esfuerzos residuales de tracción elevados en el centro de la región en la que se aplica el calor.**
- 8. El chorreado con granalla, el martillado de la superficie y el bruñido con rodillos, producen esfuerzos residuales biaxiales de tracción en el interior.**
- 9. Los recubrimientos electrolíticos**
- 10. Los recubrimientos blandos, tales como los del plomo, cadmio y zinc.**

1.4 MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES

Existen diversos métodos para medir esfuerzos residuales dentro de un cuerpo o estructura, la mayoría de ellos limitada por diversos factores e incertidumbre en su medición. Dichas limitaciones obedecen a una falta de unificación para determinar constantes, factores, efectos microestructurales, factores de conversión, referencias de calibración y técnicas empleadas. Sin embargo, se cuenta con una variedad de técnicas que haciendo uso de distintas ramas de la física ayudan a proporcionar información de la concentración de esfuerzos dentro de un material.

Para el análisis de los esfuerzos existen 2 técnicas básicas de acuerdo a las condiciones en que se presenten los esfuerzos residuales y a las formas en que ha de determinarse dichos esfuerzos,

1. Las que requieren el desprendimiento de pequeñas partes del material para el posterior análisis del material remanente, llamadas Técnicas Destructivas.
2. Las que no requieren de seccionamientos de material y por tanto pueden ser tomadas en el sitio de operación, conocidas como Técnicas no Destructivas.

La medida de los esfuerzos residuales por métodos no destructivos es indirecta, ya que se hace uso de otras cantidades medidas que se ven afectadas por la presencia de esfuerzos residuales, estas medidas son usadas para inferir la presencia, naturaleza y distribución de las magnitudes de esfuerzos residuales.

Dichas cantidades suelen ser parámetros como la composición de la red cristalográfica, velocidades ultrasónicas, que a su vez se ven afectadas por la composición química del material, textura metalúrgica, tamaño de grano, magnetismo, etc.

Independientemente de la técnica empleada, se hace uso de cálculos indirectos con las mediciones observadas, para así poder determinar la concentración de esfuerzos en el material analizado.

1.4.1 Métodos Destructivos

a) Método del barrenado.

Un procedimiento popular es taladrar un barreno en la superficie de una placa que contenga esfuerzos residuales. Es posible medir los esfuerzos residuales que existen en el área barrenada conociendo la medida de la relajación de esfuerzos en las áreas fuera del barreno. Se debe tener cuidado en no incrementar los esfuerzos debido al taladrado, ya que el propio agujero es un concentrador de tensiones, y esto puede llevar a la deformación plástica local no deseada contribuyendo a la distorsión de los resultados esperados.⁽⁶⁾

Una variación de este método, consiste en colocar galgas de deformación en forma de estrella a 120° cada una y perforar un hoyo en el centro como se muestra en la **figura 1.1**, las magnitudes y dirección del esfuerzo principal se calculan midiendo los cambios en la deformación de las tres galgas.⁽⁷⁾

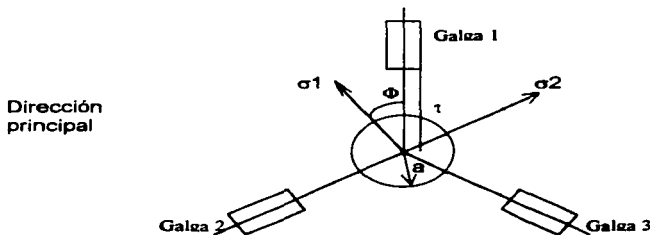


Figura 1.1 Arreglo de las galgas en estrella de 120° para la medición de esfuerzos residuales. Donde σ_1 y σ_2 son los esfuerzos a que se ve sometido el espécimen, T es la distancia de la galga al centro de l barreno y ϕ es el ángulo de la galga con respecto a la dirección del esfuerzo aplicado.

b) Relajación de Esfuerzos

En esta técnica los esfuerzos se determinan por la medida de la liberación de deformación elástica. Dicha deformación se origina cuando los esfuerzos residuales se relajan por corte del espécimen. En la mayoría de los casos galgas de deformación mecánicas o eléctricas son empleadas para medir la liberación de la deformación. Existe una variedad de técnicas dependiendo del modo de seccionar los especímenes para determinar los esfuerzos residuales. Algunas de ellas son aplicables a cilindros, tubos o a cuerpos tridimensionales.

c) Técnicas de Agrietamiento.

Se han desarrollado técnicas para el estudio de los esfuerzos residuales por la observación de los agrietamientos producidos por el esfuerzo residual en los especímenes, estas grietas pueden ser inducidas por hidruración o por corrosión bajo esfuerzo. Estas técnicas de agrietamiento se utilizan generalmente para el estudio de esfuerzos residuales en modelos de estructuras complejas, que tienen distribuciones complejas de esfuerzo residual, además de que estas técnicas proveen de datos cualitativos y no cuantitativos para la valuación de esfuerzos.

1.4.2 Métodos No Destructivos

a) Métodos Ultrasónicos.

Estos métodos están basados principalmente en los cambios de velocidad de ondas ultrasónicas debido a la presencia de esfuerzos. Varios métodos han sido probados encontrándose ventajas y desventajas entre unos y otros, por ejemplo:

- 1) Las ondas longitudinales pueden ser usadas en una reflexión continua de ondas para excitar una frecuencia de resonancia en un miembro. La frecuencia de ondas en ocasiones, depende de la deformación y las velocidades ultrasónicas en el miembro, de los cuales ambos son influenciados por los esfuerzos.
- 2) Las ondas polarizadas de corte pueden ser usadas para evaluar la doble refrigerancia inducida por los esfuerzos, en un miembro en una manera análoga a las técnicas ópticas de doble refrigerancia, por ejemplo la fotoelasticidad.

- 3) Los cambios de velocidad de ondas en la superficie entre dos puntos en la superficie de un miembro, puede ser relativa a la deformación y esfuerzos entre los puntos.

Un orden más alto en las constantes elásticas es generalmente un orden para relacionar las medidas de velocidad de ultrasonido a esfuerzos, estas constantes están generalmente disponibles y deben ser experimentalmente determinadas por el material en particular que está siendo examinado. Dichas constantes están influenciadas por la textura metalúrgica, produciendo una interpretación un tanto cuestionable para cada ensayo.

Además, los valores de una medida en particular, solamente son un porcentaje de la trayectoria recorrida por un rayo ultrasónico sobre el lugar donde el transductor es colocado en función de l espesor del espécimen.

La utilidad de la aproximación del ultrasonido se ve disminuido en materiales atenuantes tales como los plásticos, algunos compuestos y ciertos no-metales.

1.5 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

El grado con que una estructura se deforma depende de la magnitud de la tensión impuesta. Para muchos metales sometidos a esfuerzos de tracción pequeños, la tensión y la deformación son proporcionales según la relación:

$$\sigma = E\epsilon$$

Conocida con el nombre de Ley de Hooke, donde E es el Módulo de Elasticidad o Módulo de Young.

1.5.1 Deformación Elástica

Cuando se cumple que la deformación es proporcional al esfuerzo, la deformación se denomina **deformación elástica**; al representar al esfuerzo en función de la deformación producida, se obtiene una relación lineal tal y como lo muestra la **figura 1.2** la pendiente de este segmento lineal es el Módulo de Elasticidad E, este módulo puede ser interpretado como la rigidez o resistencia del material a la deformación elástica. Cuanto mayor es el módulo más rígido es el material, o sea, menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una determinada tensión.

La deformación elástica no es permanente, ya que al retirar la fuerza la pieza vuelve a su forma original.

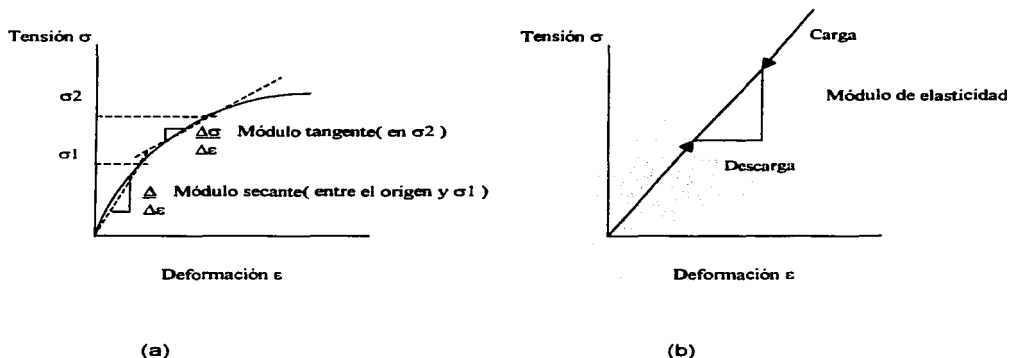


Figura 1.2 Diagrama esfuerzo-Deformación

(a) Diagrama esquemático tensión deformación mostrando comportamiento elástico no lineal, y como se determinan los módulos secante y tangente

(b) Diagrama esquemático esfuerzo -deformación con deformación elástica lineal, para ciclos de carga descarga.

1.5.2 Deformación Plástica.

Para la mayoría de los materiales metálicos, la deformación elástica únicamente persiste hasta deformaciones de alrededor de 0.005 a medida que el material se deforma más allá de este punto, la tensión deja de ser proporcional a la deformación y ocurre **deformación plástica**, la cual es permanente, es decir, no recuperable.

Desde un punto de vista atómico, la deformación plástica corresponde a la rotura de los enlaces entre átomos vecinos, ya que un gran número de átomos o moléculas se mueven respecto a otros; al eliminar la tensión no vuelven a sus posiciones originales.

1.5.3 Esfuerzo a la fluencia.

El nivel de tensiones para el cual empieza la deformación plástica, es conocido como fenómeno de **fluencia**, en el diagrama esfuerzo deformación, el punto de fluencia puede determinarse como la desviación inicial de la linealidad de la curva tensión-deformación; este punto se denomina a menudo **límite proporcional**, y esta indicado como **p** en la **figura 1.3**, no siempre es fácil determinar dicho punto, para ello se ha establecido la convención de usar una recta paralela a la línea elástica del diagrama desplazada usualmente .002. La intersección de la curva con esta nueva recta es conocida como **Límite elástico** σ_y .

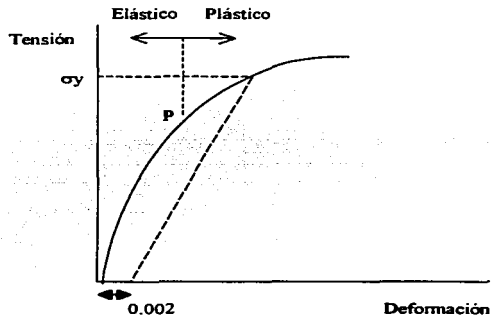


Figura 1.3 Curva de tracción típica de un material que muestra la deformación elástica y plástica, el límite proporcional P y el límite elástico σ_y determinado como la tensión para una deformación plástica del 0.002

1.5.4 Resistencia a la tracción.

La resistencia a la tensión es el esfuerzo resultante de la mayor fuerza aplicada, y por ello es el esfuerzo máximo que ocurre en la curva esfuerzo-deformación. En muchos materiales dúctiles, la deformación no permanece uniforme. En un cierto punto una región se deforma más que en otra área y ocurre una reducción de la sección transversal. Esta región localmente deformada se denomina garganta o estricción. Debido a que el área de la sección transversal se reduce en este punto, se requiere de una fuerza menor para continuar la deformación, y decrecerá el esfuerzo calculado a partir del área original A_0 . La resistencia a la tensión es el esfuerzo en que se inicia la estricción.

1.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Un adecuado tratamiento o proceso térmico resulta muy efectivo para alterar las propiedades mecánicas de los materiales. En el caso de los aceros, el tratamiento térmico es una operación que implica el calentamiento del acero a una temperatura específica, seguido de un enfriamiento a diversas velocidades con objeto de obtener ciertas propiedades que están asociadas con cambios en la naturaleza, forma, tamaño y distribución de los constituyentes de la microestructura.

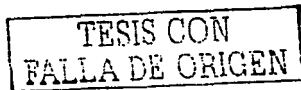
1.6.1 Recocido

Es el tratamiento térmico de un material expuesto a elevada temperatura durante un periodo de tiempo y luego, enfriado lentamente, el recocido se lleva a cabo para:

- 1) Eliminar tensiones,
- 2) Incrementar la plasticidad, ductilidad y la tenacidad y
- 3) Producir una microestructura específica.

1.6.2 Revenido.

Los aceros después del temple suelen quedar generalmente demasiado duros y frágiles para los usos a que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen por medio del revenido, que es un tratamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica, enfriándolo luego generalmente al aire y otras veces en aceite o agua, según la composición. El objeto del revenido no es eliminar los efectos del temple sino modificarlos, disminuyendo la dureza y resistencia, aumentando la tenacidad y



eliminando también los esfuerzos internos que tienen siempre los aceros templados.

1.6.3 Normalizado.

El normalizado se define como un calentamiento hasta una temperatura conveniente, por encima del rango de transformación, una permanencia a dicha temperatura, seguido de un enfriamiento en aire quieto hasta una temperatura suficientemente por debajo del rango de transformación.

Por lo tanto, un buen proceso de normalización requiere:

1. Que la pieza tratada sea calentada uniformemente a una temperatura suficientemente alta como para alcanzar la transformación completa de ferrita y cementita a austenita
2. Que permanezca a esta temperatura un tiempo suficientemente largo como para alcanzar uniformidad de temperatura a través de toda su masa.
3. Que se permita el enfriamiento en aire quieto, de manera uniforme.

Los objetivos de un normalizado pueden ser:

1. Refinar el grano y homogeneizar la microestructura para mejorar la respuesta del acero en una operación de endurecimiento por temple.
2. Mejorar las características de maquinabilidad del acero.
3. Alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

1.6.4. Temple.

El temple de un acero, es el enfriamiento rápido a partir de la temperatura de austenización. Usualmente este se realiza por inmersión de la pieza en agua o aceite y, a veces, se usa aire forzado.

Como resultado del temple se desarrollan estructuras martensíticas aceptables y propiedades mecánicas que deben cumplir especificaciones mínimas luego del revenido.

Varios factores intervienen en el mecanismo del temple:

1. Condiciones internas de la pieza que afectan la transmisión del calor hacia la superficie.
2. La superficie y otras condiciones externas que afectan la remoción del calor.
3. Cambios en el potencial de extracción de calor del fluido debido a condiciones no estándar como agitación, temperatura o presión.

1.6.5 Relevado de Esfuerzos

En una pieza metálica se generan tensiones internas como respuesta a:

1. Los procesos de deformación plástica, tales como mecanizado o estampado.
2. Enfriamiento no uniforme en piezas conformadas a elevada temperatura (soldada, moldeada, etc.).
3. Una transformación de fase, inducida por enfriamiento, en la que la fase madre y la fase producto tienen distinta densidad.

Si no se eliminan estos esfuerzos residuales se puede producir distorsiones o alabeos. La eliminación se produce por un tratamiento térmico de eliminación o relevado de esfuerzos, en el que la pieza se calienta hasta una temperatura recomendada (650°C para el caso de los aceros al carbono), manteniéndose así hasta alcanzar una temperatura uniforme y, finalmente, se enfría al aire hasta temperatura ambiente.

Generalmente la temperatura recomendada es baja para evitar los defectos de la deformación por enfriamiento y para no afectar a otros tratamientos térmicos.⁽⁹⁾

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Gary S. Schajer Wood Mechanics Laboratory
Dept. Mechanical Engineering
University of British Columbia. Vancouver BC, CANADA. V6T 1Z4
- (2) I. C. Noyan & J. B. Cohen;
RESIDUAL STRESS AND STRESS RELAXATION.
CHAPTER I, ERICK KULA-WEISS VOLKER
Vol I pp. 1-17, 315-329.
- (3) E.P. Polunshkin
DEFECTOS Y FALLOS DE LOS METALES/ SU ORIGEN Y ELIMINACIÓN.
Capitulo 8 Págs. 191-198
Ed. Paraninfo. Madrid, España.
- (4) E.P. Polunshkin
DEFECTOS Y FALLOS DE LOS METALES/ SU ORIGEN Y ELIMINACIÓN.
Capitulo 8 Págs. 200-210
Ed. Paraninfo. Madrid, España
- (5) Dieter E. George
METALURGIA MECÁNICA
Ed. Aguilar Págs. 420-446
México 1967
- (6) I. C. Noyan and J. B. Cohen
THE NATURE OF RESIDUAL STRESS AND ITS MEASUREMENT
Dept. Of materials Science and Engineering
Northwestern University. Evanston, Illinois 60201
- (7) Zamora R. Luis, Merino C. F. Javier
CORROSION INTERGRANULAR BAJO ESFUERZO
Reporte técnico de esfuerzos Residuales
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Págs. 8-25
México 1987
- (8) ASM Handbook
Vol. 4, HEAT TREATING
ASM International Materials Park OH. 1991

CAPITULO 2

MÉTODOS MAGNETOELÁSTICOS

2.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

El magnetismo, fenómeno mediante el cual los materiales ejercen fuerzas atractivas o repulsivas sobre otros materiales, fue conocido por los griegos desde hace miles de años. Sin embargo, los principios básicos y los mecanismos que explican el fenómeno magnético son complejos y ha intrigado hasta nuestros días a los científicos.

El hierro, algunos aceros y el mineral magnetita, son ejemplos bien conocidos de materiales que tienen propiedades magnéticas, dichas propiedades se incrementan o disminuyen de acuerdo a la aplicación de campos magnéticos aplicados externamente. Ciertos materiales poseen un momento magnético permanente en ausencia del campo externo aplicado y manifiestan magnetizaciones permanentes muy grandes. Estas son características del ferromagnetismo y lo presentan los metales de transición como el hierro (con estructura BCC, ferrita α), cobalto y níquel, y algunos elementos de las tierras raras.⁽¹⁾

Al aplicarse un campo magnético ocurre un momento magnético que tiene como consecuencia la alineación de los espines de los electrones, cuando esta alineación se presenta en volúmenes relativamente grandes del cristal se denomina "alineación de los dominios".

Todos los materiales ferromagnéticos a temperatura ambiente están formado por pequeñas regiones tridimensionales, en las cuales los momentos magnéticos están todos alineados en la misma dirección, tal como se muestra en la **figura. 2.1** Estas regiones se denominan Dominios y cada una está magnetizada hasta la saturación. Los dominios adyacentes están separados por límites de dominio o paredes, a través de las cuales la dirección de magnetización cambia gradualmente **figura. 2.2**. Normalmente los dominios son de tamaño microscópico y en el caso de un material policristalino, puede contener mas de un dominio. Por consiguiente en una pieza microscópica de material habrá un gran número de dominios y todos pueden tener orientaciones de magnetización distintas. La magnitud del campo M para todo el sólido es la suma de las magnetizaciones de todos los dominios, estando la distribución de cada dominio determinada por su fracción de volumen. Para una muestra no magnetizada, la suma vectorial de las magnetizaciones de cada dominio es cero.⁽²⁾

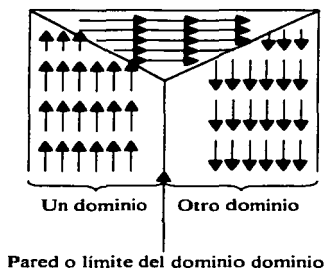


Figura 2.1

Ilustración esquemática de los dominios en un material ferromagnético; las flechas representan los dipolos magnéticos atómicos. Dentro de cada dominio, todos los dipolos están alineados, mientras que la dirección de la alineación varía de uno a otro dominio



Figura 2.2

El cambio gradual en la orientación de un dipolo magnético a través de la pared del dipolo.

A medida que se aplica el campo magnético H , los dominios cambian de forma y tamaño debido al movimiento de los límites de dominio. Las estructuras típicas de los dominios están representadas de forma esquemática en varios puntos de la curva de la densidad de flujo B frente a H , en la **figura 2.3**. Inicialmente, los

momentos de los dominios constituyentes están orientados al azar de tal manera que no existe un campo de momento neto B (o M). A medida que se aplica el campo externo, los dominios que están orientados en direcciones favorables al campo aplicado (o casi con ellos) crecen al aumentar la intensidad del campo hasta que la muestra microscópica se convierte en un solo dominio, el cual está casi completamente alineado con el campo. La saturación se alcanza cuando este dominio gira y se orienta con el campo H .

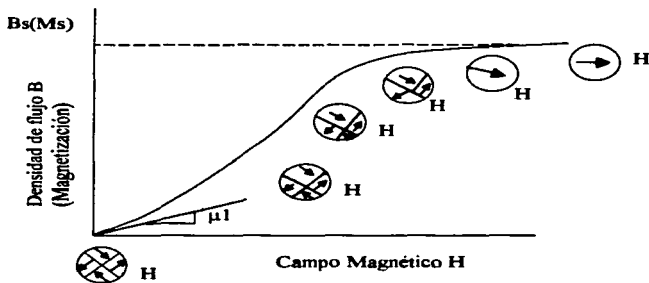


Figura 2.3

Comportamiento de B (densidad de flujo magnético) ante H (campo magnético) de un material ferromagnético que estaba inicialmente desmagnetizado. Se aprecian las magnetizaciones de los dominios durante varios estados de la magnetización.

La densidad de flujo de saturación B_s y la magnetización de saturación M_s se indican.

Experimentos realizados en la última década han confirmado que cuando filamentos de alambre son magnetizados, estos se deformarán en la dirección de la magnetización, cuando es tensionado se magnetizará en la dirección de su dilatación.

Este fenómeno es originado por la magnetostricción de pequeñas deformaciones en la red cristalina como resultado de la alineación atómica de los momentos magnéticos en las direcciones cristalográficas preferenciales. Estas magnetostricciones pueden ser positivas o negativas. Dicha deformación es paralela a la magnetización dentro de regiones ordenadas magnéticamente llamadas dominios, iguales en magnitud de saturación y dirigido a lo largo de la dirección preferencial.

La tensión magnetoestrictiva de cada dominio origina cambios dimensionales en los dominios del material, cuando los dominios son reordenados bajo la acción de un campo magnético aplicado. Para minimizar la energía elástica almacenada, los vectores de magnetización de los dominios en aceros con magnetoestricción positiva siguen una magnetización a lo largo del eje de los esfuerzos de tensión y perpendicular al eje de compresión.⁽³⁾

Las pruebas sobre esfuerzos magnéticos se encuentran en interacción con la deformación magnética de los cuerpos ferromagnéticos.

2.2 MÉTODO MAGNÉTICO DEL RUIDO BARKHAUSEN

Cuando un material ferromagnético es sujeto a un campo magnético, llega a ser magnetizado en una serie de pequeñas saltos no uniformes. Estos cambios discontinuos en magnetización son atribuidos como se dijo anteriormente, a las reorientaciones de los límites de los dominios magnéticos microscópicos en el material. Estos cambios pueden ser monitoreados mediante sensores electromagnéticos o detectores de tipo acústico y una unidad central para controlar y procesar la señal. La unidad central automáticamente evalúa y manifiesta en forma numérica los resultados de la medición, llamados "Parámetro Magnetoelástico (PM) en función de una carga aplicada o un estado de esfuerzos determinado por una condición de trabajo o conformado"

La señal recogida mediante este tipo de instrumentos es llamada "Ruido Barkhausen". Esta señal es fuertemente influenciada por los esfuerzos residuales presentes en el material. Bajo un campo magnético alternado, los patrones pueden ser obtenidos de señales repetitivas.

Algunos instrumentos portátiles para la medición rápida del Ruido Barkhausen se encuentran disponibles comercialmente, y un gran número de investigadores ha correlacionado varios parámetros de las señales patrones con los diversos de esfuerzo. Desafortunadamente un completo entendimiento de la relación teórica entre la señal Barkhausen y los esfuerzos no ha sido logrado todavía. Así cada aplicación requiere calibración si se requiere obtener resultados cuantitativos.

La señal Barkhausen es sensitiva a rasgos microestructurales del material, tales como el tamaño de grano, textura, deformación y envejecimiento; cualquier cambio en estos rasgos hace una necesaria recalibración. La influencia de campos de esfuerzos biaxiales no es clara. El método además de estar limitado a materiales ferromagnéticos, es solamente útil para esfuerzos en superficie, sin embargo, el espesor del material puede afectar los resultados.⁽⁴⁾

Este método puede proporcionar resultados cualitativos, y en muchos casos una indicación cuantitativa de la condición de tensión en los materiales

ferromagnéticos. La ventaja principal de este método es que pueden dirigirse las medidas no destructivas en condiciones de reposo y con carga. No se necesita ninguna preparación especial de la superficie y puede aplicarse sobre casi cualquier superficie, ya que existe una variedad de sensores para casi todo tipo de superficie.

La desventaja de este método es que no proporciona valores de esfuerzos absolutos en forma directa. En casos dónde es deseable saber los esfuerzos con precisión, la calibración debe ser cuidadosa. Satisface mejor la medición de esfuerzos dónde la exactitud no es necesaria y ya se han encontrado varias aplicaciones prometedoras en la industria.⁽⁶⁾

2.3 MÉTODO DE MAGNETOESTRCCIÓN

Cuando un material ferromagnético se magnetiza, sus dimensiones cambian sensiblemente, y la muestra a magnetizar se expandirá o contraerá en la dirección de magnetización (figura 2.4). Esta deformación elástica reversible inducida magnéticamente ($\Delta l/l$) se llama *magnetoestrcción*, y es del orden de 10^{-6} . La energía debida a los esfuerzos mecánicos de la magnetoestrcción se llama energía magnetoestrictiva. Para el hierro la magnetoestrcción es positiva a bajos campos y negativa a altos (figura 2.4).

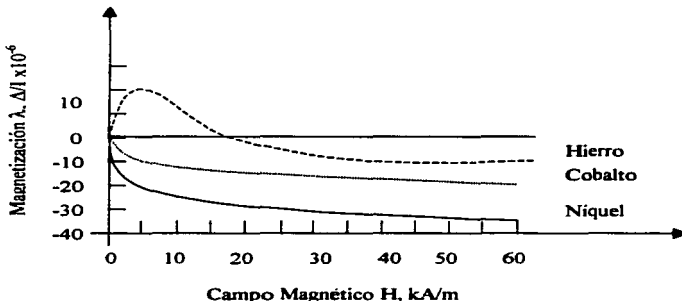


Figura 2.4

Comportamiento magnetoestrictivo del Fe, Co y Ni, elementos ferromagnéticos La magnetoestrcción es una elongación fraccionada (o contracción), y en esta ilustración sus unidades son de micrómetros por metro.

La causa de la magnetostricción se debe al cambio en la longitud del enlace entre átomos en metales ferromagnéticos, cuando el momento dipolar de su espín electrónico está rotando para la alineación durante la magnetización. Los dipolos pueden atraerse o repelerse el uno al otro, permitiendo la contracción o expansión del metal durante la magnetización.

Consideremos el efecto de la magnetostricción en la configuración en equilibrio de los materiales cristalinos de estructura cúbica en dominios, como los que se muestran en la **figura 2.5 a y b**. A causa de la simetría cúbica de los cristales. La formación de los dominios de forma triangular, llamados dominios de cierre, al final el cristal elimina la energía magnetoestática asociada con un campo magnético exterior y a partir de ahí baja la energía del material. Podría parecer que los dominios muy grandes como los mostrados en la **figura 2.5 a y b**, fueran los más bajos en energía y los de configuración más estable, puesto que hay una energía mínima en la pared. Sin embargo, este no es el caso, ya que los esfuerzos magnetoestrictivos introducidos por la magnetización tienden a ser mayores para dominios grandes. Pequeños dominios magnéticos como los mostrados en la **figura 2.5c**, reducen los esfuerzos magnetoestrictivos, pero aumentan el área y la energía de la pared del dominio. Por consiguiente, la configuración del dominio en equilibrio se alcanza cuando las sumas de las energías magnetoestrictivas y de paredes de dominios son mínimas.

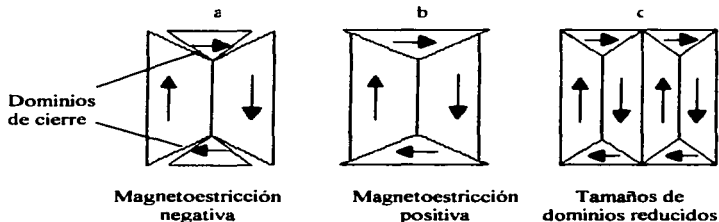


figura 2.5

Magnetostricción en materiales cúbicos magnéticos. Ilustración exagerada de la magnetostricción. (a) Negativa, (b) Positiva. Separando los bordes de los dominios de un material magnético. (c) Disminución de los esfuerzos magnetoestrictivos por creación de una estructura de tamaño de dominios más pequeña

En conclusión, la estructura en dominios constitutiva de los materiales ferromagnéticos esta determinada por las diferentes contribuciones (cambio, magnetostaticas, anisotrópicas, magnetocristalina y energias magnetoestrictivas) al total de la energía magnética. El equilibrio o la configuración más estables es aquella par la cual el total de la energía magnética es la más baja.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) William D. Callister Jr
INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES.
Pág. 700
Ed. Reverte México tomo II
México 1996
- (2) William F. Smith
FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES 2ª EDICIÓN
Pág. 696-697
Ed. Mc. Graw-Hill
México 1997
- (3) C. S. Barrett, W. D. Nix & A. S Tetelman
THE PRINCIPLES OF ENGINEERING MATERIALS
Pág. 485
Ed. Prentice-Hall
EU. 1973
- (4) Merino Caballero. F. Javier, Zamora R. Luis
CORROSIÓN INTERGRANULAR BAJO ESFUERZO
Reporte técnico de esfuerzos Residuales
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
pág. 8-25
México 1987

CAPITULO 3

MÉTODO DEL RUIDO BARKHAUSEN

3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS

Es conocida la interacción entre la magnetización y la deformación elástica en materiales ferromagnéticos. Experimentos realizados en las últimas décadas, han mostrado que si un alambre de acero es magnetizado, éste se alargará en la dirección de la magnetización aplicada; es decir se deformará en la dirección de la magnetización.

Este fenómeno es originado por la magnetoestricción, los reacomodos espontáneos de los esfuerzos resultado de la alineación de los momentos magnéticos atómicos en una dirección cristalográfica "preferencial". Esta magnetización espontánea puede ser positiva o negativa. Es paralela a la magnetización dentro de las regiones ordenadas magnéticamente llamadas **dominios**. La magnetización es uniforme dentro de cada dominio, y de igual magnitud de saturación en todas las direcciones preferenciales. Cada grano puede contener varios dominios.

La deformación magnetoestrictiva en cada dominio origina cambios dimensionales en el material cuando los dominios se reordenan bajo la presencia de un campo magnético. Para minimizar la energía elástica almacenados vectores del dominio de magnetización en el caso del acero con magnetoestricción positiva (-21×10^{-6}) tienen una alineación preferencial paralela al eje de tensión y perpendicular al eje de compresión esa alineación en algunos casos origina cambios en la magnetización total del material cuando el esfuerzo es aplicado. Lo anterior se representa en la figura 1

Si acercamos un campo magnético a un acero, se originan movimientos en todos sus dominios, los cambios en la magnetización inducirán pulsos eléctricos debido a un campo magnético. Barkhausen descubrió este fenómeno de magnetización. La curva de magnetización no es continua, ya que consiste en pequeños cambios de posición en los dominios magnéticos bajo la aplicación de un campo magnético. Cuando los pulsos eléctricos producidos por el movimiento de todos los dominios bajo un área magnetizada son sumados, la señal producida es llamada Ruido Barkhausen.

Esta señal inicia con una frecuencia de magnetización extendiéndose de 2 a 3 MHz. Este tipo de ruido es exponencial amortiguado como una función de la distancia sobre la que incide en el material, debido a residuos de corriente amortiguada experimentada por campos electromagnéticos que son creados alrededor de las fronteras de los dominios.

Estos campos pueden ser medidos solamente en la superficie del material, la extensión de la amortiguación, determina la profundidad con la cual la información puede ser obtenida. Algunos factores que afectan la lectura del espesor del material, son el rango de la frecuencia de la señal de análisis, la conductividad y la permeabilidad del material. Estas mediciones suelen variar entre 0.01 y 3 mm.

La extensión de los dominios que se moverán y la intensidad del ruido Barkhausen, dependen del esfuerzo y microestructura del material. El ruido Barkhausen puede ser aplicado en ensayos destructivos y no destructivos para superficies con esfuerzos uniaxiales y biaxiales.

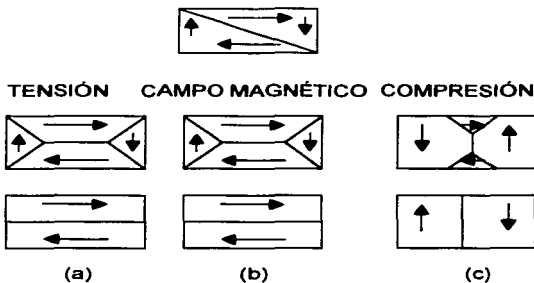


Figura 1

En la figura, una pieza de material ferromagnético contiene cuatro campos magnéticos iguales. La dirección de magnetización de los campos de acción están alineados, así que toda la magnetización de la pieza es cero.

En (a) se aprecia el cambio de configuración del campo cuando la pieza se expone a un esfuerzo de tensión. Los campos con una magnetización paralela directa a la dirección del esfuerzo de tensión, crecerán de tal manera que se unirán con otros campos y finalmente consumirán todo el volumen de la pieza.

En la figura (c) se muestran los campos con magnetización perpendicular a la dirección de esfuerzo compresivo, crecerán y aniquilarán los otros campos.

En presencia de un campo magnético, los campos con magnetización paralela a la dirección del campo magnético crecerá y los campos con magnetización transversal se contraen, tal como se muestra en la figura (b).

El efecto combinado de esfuerzo y campo magnético sobre el movimiento de la pared de un campo y el nivel de ruido Barkhausen puede ser descrito de una manera simple: por ejemplo, el esfuerzo de tensión de la figura (a) y el campo magnético de la figura (b) generan la misma clase de cambio en la configuración

del campo de acción. Las paredes del campo pueden ser fácilmente movidas creando un alto nivel de ruido. El esfuerzo compresivo de la figura (c) y el campo magnético de la figura (b), tienen efectos opuestos. Un movimiento pequeño en la pared tomará lugar y será generado solo ruido pequeño. El Método del Ruido Barkhasuen está basado en el concepto de Dominios Ferromagnéticos descubierto en 1919 por el Prof. Barkhasuen de la Universidad de Dresden Alemania.

Los materiales ferromagnéticos consisten en regiones microscópicas magnéticas llamadas Dominios, cada uno de ellos semejando una barra magnética, que es magnetizada a lo largo de la dirección cristalográfica de magnetización apropiada. Los dominios son separados unos de otros por barreras, donde la dirección de magnetización usualmente se encuentra entre 180° y 90° . La magnetización neta del material es el promedio de la magnetización de todos los dominios. Cuando campos magnéticos o fuerzas mecánicas son aplicadas a un material ferromagnético, ocurren cambios en los dominios de la estructura por un repentino movimiento de las fronteras o límites de los dominios o rotación de los vectores de magnetización. Estos cambios microscópicos producen cambios en toda la magnetización del material.

En la figura 2, se muestra la relación entre la inducción magnética del esfuerzo residual y el ruido Barkhasuen. Un esfuerzo alto de compresión genera expansión en la pieza y bajos niveles de ruido Barkhausen. Sin embargo con un decremento en el esfuerzo compresivo, el ruido Barkhausen se intensifica gradualmente. Como el esfuerzo de compresión cambia a cero y el esfuerzo de tensión también, el ruido se incrementa simultáneamente con un aumento en la pared de inducción magnética.

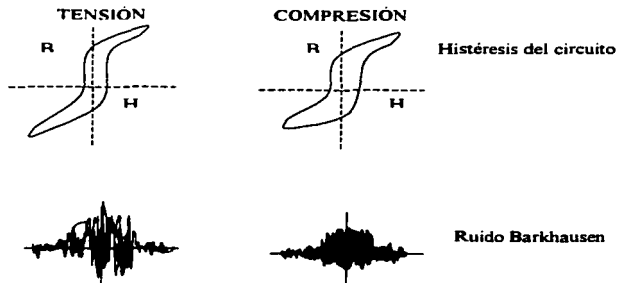


Figura 2. Relación entre la inducción simple (hysteresis loop), esfuerzo residual y la señal magnetoelástica(ruido Barkhausen).

Basado sobre la interacción del esfuerzo y el campo magnético en el ruido, el nivel de esfuerzo en un material ferromagnético puede ser determinado aplicando un campo magnético y la medición magnética del ruido creado, llamada señal magnetoelástica (PM= Parámetro Magnetoelástico). Los datos cuantitativos de esfuerzo pueden ser obtenidos calibrando el nivel del ruido para el valor absoluto del esfuerzo.

3.1.1 Consideraciones Energéticas

Es importante conocer la energía interna que afecta el movimiento del dominio bajo la aplicación de un campo magnético y sometido a esfuerzos, esta incluye:

$$E_H = -H_a I_s \quad 1$$

Que es la energía del dominio del vector magnetización I_s en el campo magnético H_a

$$E_K = K_1 (\alpha^1_2 \alpha^2_2 + \alpha^2_2 \alpha^2_3 + \alpha^2_3 \alpha^2_1) + K_2 (\alpha^2_1 \alpha^2_2 \alpha^2_3) + \dots \quad 2$$

Energía magnetocristalina anisotrópica con α_i en dirección del coseno del dominio de magnetización con respecto a los ejes del cubo; K_1 y K_2 siendo estos la primera y segunda constante de anisotropía.

$$E_\lambda = -B_1 [e_{11}(\alpha^2_1 - \frac{1}{3}) + e_{22}(\alpha^2_2 - \frac{1}{3}) + e_{33}(\alpha^2_3 - \frac{1}{3})] - B_2 [e_{12}\alpha_1\alpha_2 + e_{23}\alpha_2\alpha_3 + e_{31}\alpha_3\alpha_1] \quad 3$$

Energía magnetoelástica con reordenamiento elástico e_{ij} y B_1, B_2 son constantes.

$$E_{\lambda\sigma} = \frac{1}{2} \lambda_{100} \sigma (\alpha^2_1 \gamma^2_1 + \alpha^2_2 \gamma^2_2 + \alpha^2_3 \gamma^2_3) - 3\lambda_{111} \sigma (\alpha_1 \alpha_2 \gamma_1 \gamma_2 + \alpha_2 \alpha_3 \gamma_2 \gamma_3 + \alpha_3 \alpha_1 \gamma_3 \gamma_1) \\ = -\frac{1}{2} \gamma_{100} \sigma \cos^2 \phi \text{ si } K_1 > 0 \quad 4$$

Energía magnetoelástica bajo la influencia del esfuerzo normal σ teniendo dirección del coseno λ_i con respecto a los ejes del cubo; $\sigma_{100}, \lambda_{111}$ son constantes de magnetoestricción resultado de la deformación presente debida a la magnetización. ϕ es el ángulo entre σ y la dirección de la magnetización (tipo <100>).

$$E_D = \frac{1}{2\mu_0} N_D \Delta I_n^2 \quad 5$$

Energía magnetoestática μ_0 es la permeabilidad en el vacío N_D es el coeficiente de desmagnetización ($0 < N_D < 4\pi$), ΔI_n es la diferencia en la componente normal de magnetización sobre la superficie o en las fronteras del grano.

E_H proporciona primeramente la fuerza para el movimiento del dominio magnético. E_K identifica la dirección de magnetización que es $\langle 100 \rangle$ para Fe y Co ($K_1 > 0$), y $\langle 111 \rangle$ para Ni ($K_1 < 0$). El balance entre E_s y la energía de deformación normal determina el componente de deformación del esfuerzo en la dirección preferente de magnetización —elongación para Fe y Co, contracción para Ni.

$E_{\lambda,0}$ indica la interacción entre la magnetostricción y los esfuerzos aplicados. Esta proporciona la energía para la redistribución del dominio bajo esfuerzos aplicados y es la principal causa para esfuerzo dependientes del ruido Barkhausen. Con ciertos efectos acústicos.

Esto se representa en la **figura 3** donde se aprecian la alineación de los dominios bajo esfuerzos en un cristal de hierro. Para hieiros y aceros policristalinos el dominio de magnetización tiene 6 direcciones disponibles en cada grano $\langle 100 \rangle$ ⁽¹⁾

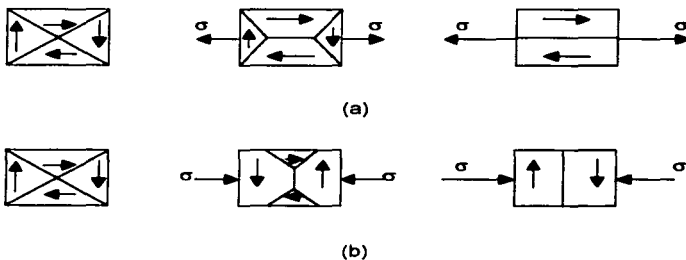


Figura 3. Esfuerzo uniaxial inducido en los dominios magnéticos alineados en materiales ferromagnéticos bcc con magnetostricción espontánea positiva. Las flechas indican los vectores de magnetización. (a) esfuerzo de tensión, (b) esfuerzo de compresión

Para minimizar $E_{\lambda,0}$ se puede escoger entre la dirección de tensión o de compresión. sin embargo y debido a que $E_{\lambda,0}$ en el acero es mucho menor que E_K , los vectores no pueden ser forzados fuera en cada una de las direcciones preferenciales del esfuerzo.

La configuración de los dominios en un espécimen no sometido a esfuerzo tiene una gran extensión determinada por E_D (componente normal de magnetización que cruza los límites de grano), los dominios se distribuyen con una continuidad de grano en grano como se ilustra en la figura 4.

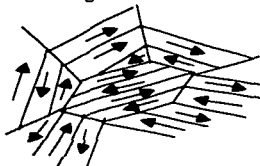


Figura 4. Estructura de los dominios de un material policristalino.

Por la misma razón, los movimientos de las paredes del dominio forman una cadena de varios granos como se ilustra en la figura 5a, los dominios se alinean de tal forma que la suma de ellos se presenta en la figura 5b. La elección en cada uno de los dominios es una mínima diferencial del ángulo que cruza el grano. En tanto que E_H es forzada a tomar esta dirección, incrementándose la oposición de E_D a alinearse en la cadena. El promedio del volumen del material v_c transformado en "una cadena" es también llamado correlación de volumen, el cual será proporcional a E_D

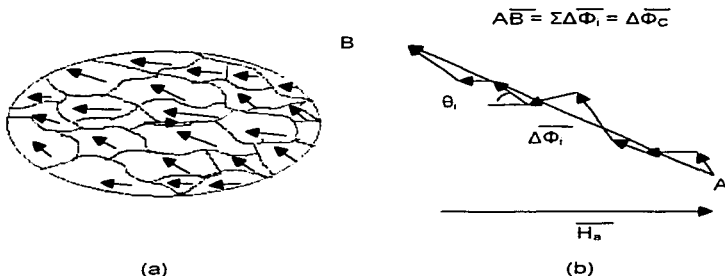
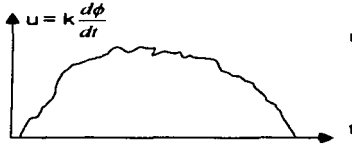


Figura 5. (a) Alineación de los dominios después de que ha sido aplicado el esfuerzo y el campo magnético (estado de saturación). (b) vector resultante de la sumatoria de los cambios de flujo de cada uno de los dominios.

3.1.2 Consideraciones Estáticas

Se ha propuesto que un dominio presenta movimientos con fluctuaciones de cambio, $\Delta\phi$, que son muy pequeñas para ser detectadas por un campo magnético. Los reacomodos por esta inducción están expresados por:



$$u = k \frac{d\phi}{dt} = k \frac{\phi_c}{\Delta t} = k' \frac{V_c}{\Delta t}$$

6

Donde Δt es la es el intervalo del tiempo, K y K' son constantes

El ruido Barkhausen es la suma de todos los reordenamientos ocurridos durante la aplicación del campo magnético. Con granos orientados isotrópicamente sin esfuerzos, los vectores magnetización están distribuidos aleatoriamente en todas las direcciones. Cuando se aplica una tensión, los vectores sufren una reorientación en la dirección $\langle 100 \rangle$ contenida en conos de 55° de ángulo con respecto al eje de los esfuerzos. Ver **figura 6a**. Cuando se aplica una fuerza de compresión, estos se redistribuyen dentro de un volumen definido en ese cono ahora a 90° con respecto al mismo eje Ver **figura 6b**

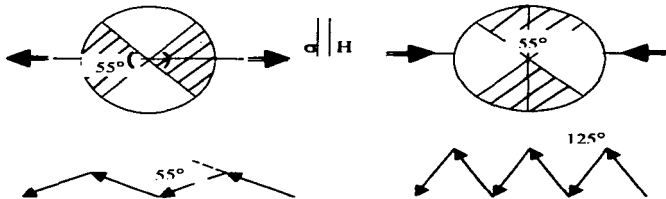


Figura 6. Distribución de los vectores de magnetización. El campo magnético es paralelo al esfuerzo.(a) en tensión, (b) en compresión

Tomando las ecuaciones 5 y 1 y asumiendo que el promedio de cambio de volumen V_C proporcional a E_H e inversamente proporcional a E_D . Se tiene:

$$\begin{aligned}
 V_C &= k_1 \frac{E_H}{E_D} \\
 &= k_1 \frac{H_a I_a \cos \frac{1}{2} \Theta_1}{\frac{1}{2\mu_0} N_D \Delta l^2_n} \\
 &= k_1 \frac{H_a I_a \cos \frac{1}{2} \Theta_1}{\frac{1}{2\mu_0} N_D l^2_s (1 - \cos \Theta_1)^2} \\
 &= \frac{K \cos \frac{1}{2} \Theta_1}{(1 - \cos \Theta_1)^2} \quad 7
 \end{aligned}$$

donde k_1 y K son constantes. El factor angular en el denominador está determinado como v_C podrá cambiar entre tensión y compresión, insertando los valores de la figura 6 dentro de la ecuación 6, la sensibilidad del ruido Barkhausen para esfuerzos entonces puede ser descrita como:

$$\begin{aligned}
 \frac{u \text{ (tensión)}}{u \text{ (compresión)}} &= \frac{v_C \text{ (tensión)}}{v_C \text{ (compresión)}} \\
 &= \frac{\cos 27.5^\circ}{(1 - \cos 55^\circ)^2} = 25.7 \quad 8 \\
 &= \frac{\cos 62.5^\circ}{(1 - \cos 125^\circ)^2}
 \end{aligned}$$

Se concluye entonces que la sensibilidad del esfuerzo con alineación completa de esfuerzos es de alrededor de 26. La sensibilidad del esfuerzo es mayor cuando la magnetización tiende a cero. Los cambios en el nivel del RB como función del esfuerzo se presentan en una curva característica S extendiéndose entre el límite elástico del material. Es obvio que la microestructura y otros parámetros de distribución contribuyen a la señal de ruido Barkhausen.

3.1.3 Procedimientos de Calibración

La calibración en una dimensión (uniaxial) ha sido tradicionalmente utilizada para mediciones magnetoelásticas con RB. Recientemente se ha desarrollado un método que emplea un procedimiento de dos dimensiones (biaxial) para el análisis de esfuerzos.⁽²⁾

Los niveles de RB son expresados en términos de PM (Parámetro Magnetoelástico) que es un número relativamente proporcional al nivel de ruido Barkhausen después de ser amplificado y filtrado, con análisis de frecuencia definido entre 3-15MHz y 70-2000MHz, que proporciona entre 0.2 y 0.02 mm de profundidad nominal para mediciones.⁽³⁾

3.1.3.1 Calibración Uniaxial

La calibración Uniaxial es realizada con la medición del nivel de RB como una función de compresión y tensión en una dirección de una muestra probada. Este procedimiento es empleado cuando el componente transversal biaxial de esfuerzos es menor al 25% del límite elástico del material.

La **figura 7** muestra el procedimiento para la calibración biaxial con los siguientes pasos:

1. Determinar por separado el Límite Elástico en Tensión (ϵ_t) y compresión (ϵ_c) por incrementos en la carga máxima, registrando el PM y el ϵ .
2. Trazar la curva PM vs ϵ con los límites elásticos de todas las observaciones. Tomar $\epsilon = 0$ para representar ausencia de esfuerzo; es decir, el cero aparente de la curva.
3. determinar el verdadero valor 0 para el esfuerzo $\epsilon = \epsilon_0$ asumiendo que el esfuerzo máximo es simétrico en tensión y compresión, siendo éste el punto medio en el rango elástico:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{2} (\epsilon_t - \epsilon_c)$$

9

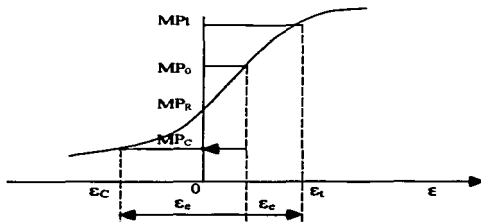


Figura 7. Curva de calibración uniaxial.

La lectura tomada del PM corresponde con el cero real del esfuerzo PM_0 que es la proyección de ϵ_0 sobre el eje del PM. La diferencia entre aparente y verdadero esfuerzo cero $\epsilon(R)$, representa el esfuerzo residual uni-dimensional calibrado. Por consiguiente, la calibración completa de la curva, límite elástico, esfuerzo / deformación y esfuerzo/residual presente en el espécimen es determinado por la calibración uniaxial (la deformación puede ser transformada en esfuerzo mediante el modulo de Young). Ejemplos de curvas de calibración se pueden observar en la **figura 8**

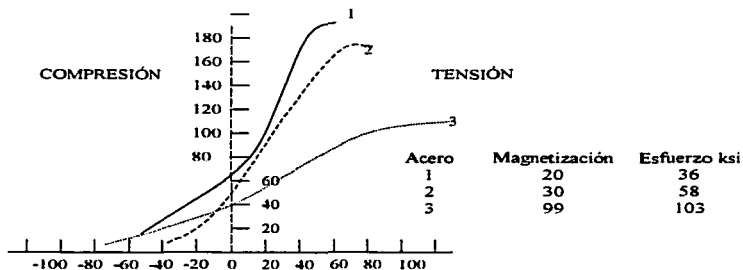


Figura 8. curvas de tres materiales diferentes usados para convertir el nivel de ruido Barkhausen (P.M.) a esfuerzo en Ksi.

3.1.3.2 Calibración Biaxial

Como ya se ha visto los esfuerzos transversales pueden tener un efecto en la calibración uniaxial de las curvas⁽⁴⁾⁽⁸⁾ e involucra un error en la evaluación de esfuerzos. Si la calibración uniaxial es aplicada en una prueba con condiciones de esfuerzo uniaxial , ese error puede ser eliminado mediante la aplicación de una calibración biaxial.

Básicamente consiste en la determinación de un grupo de curvas de calibración uniaxiales con una variación de esfuerzos en cada una de las direcciones longitudinal y transversal (esfuerzos principales). En cada combinación los valores de PM paralelos a ambos componentes de los esfuerzos son medidos así, la

combinación de los valores de PM con su correspondiente esfuerzo principal representan una calibración dual.

Se han desarrollado dos versiones de este método: El método de la aproximación Gráfica y el Método Numérico ⁽⁶⁾⁽⁷⁾. El último, desarrollado para aplicaciones de computadora siendo este más exacto.

Para evaluar los datos de calibración, es necesario seguir los pasos 1 a 3 del método uniaxial comenzando con una carga de cero e incrementándola gradualmente, para materiales totalmente isotrópicos, las curvas de tensión y compresión para esfuerzos residuales en dirección longitudinal y transversal podrán ser muy idénticas, sin embargo, se aprecia una variación en PM_T , PM_C , PM_0 y ϵ_0 entre las direcciones longitudinal y transversal caracterizando el grado de anisotropía. A continuación se sujeta el espécimen mediante mordazas y se deforma en dirección longitudinal L y transversal T sistemáticamente, obteniéndose las lecturas de ruido Barkhausen para el PM longitudinal y transversal. Las lecturas se asientan en tablas de PM, ϵ y σ , con estos datos se procede a trazar una gráfica tridimensional.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) William D. Callister Jr
INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES.
Pag. 700
Tomo II
Ed. Reverte México 1996
- (2) keefer, F.
"THE MAGNETIC PROPERTIES OF MATERIALS"
Scientific American vol. 217
No. 3, September 1967, pp. 222-234
- (3) Prof. Gary S. Schajer
WOOD MECHANICS LABORATORY
Dept. Mechanical Engineering
University of British Columbia
Vancouver BC. CANADA. V6T 1Z4
- (4) Kirsti Tiitto
SOLVIG INTERNAL STRESS MEASUREMET PROBLEMS BY A NEW
MAGNETOELASTIC METED
American Stress Technologies, Inc
pp 105-113
Pittsburgh, Pa

(5) Clay Olaf Ruud, R. E. Green, Jr
NONDESTRUCTIVE METHODS FOR MATERIAL PROPERTY DETERMINATION
Cap. 3 "Ultrasonic, and Analytical Techniques For Stress And Cold Work Indication"
pp 105-122
Pittsburgh, Pa

(6) Tiitto, S.
**MAGNETOELASTIC TESTING OF BIAXIAL STRESS/STRESSES, EXPERIMENTAL
TECHNIQUES**
Journal of JSNDI
pp 17-22
July/August 1991

(7) Furuya, Y., Shimada
MAGNETIC BARKHAUSEN NOISE ANALYSIS IN BIAXIAL STRESS TEST
Journal of JSNDI
1987

CAPITULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental se compone de los diversos análisis y ensayos para la realización de las curvas de calibración, para ello, es necesario caracterizar el material, proporcionarle un tratamiento térmico para el relevado de esfuerzos, una aplicación de ensayos mecánicos y la medición de esfuerzos residuales para la construcción de las curvas de calibración (PM-Esfuerzo).

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La caracterización del material se realizó tomando en cuenta la composición química, propiedades mecánicas y propiedades térmicas reportadas en la literatura, para compararlas con las medidas en el laboratorio, con objeto de identificar cada uno de los parámetros que constituyen a la familia de aceros empleados en este trabajo.

Las muestras fueron tomadas de placas de acero en grados AISI1018, AISI1045 y AISI4320, cuya composición química, propiedades mecánicas estandarizadas se muestran en la **tabla(1)** dentro de este capítulo.

4.1.1 Análisis metalográfico

Para apreciar las características microestructurales de los aceros, se recurre al ensayo metalográfico, en el cual se pueden determinar el tamaño de grano, fases, dirección de rolado y defectos estructurales.

En el desarrollo del presente trabajo se siguió el procedimiento siguiente:

- i. Montaje de probetas
- ii. Pulido mecánico de probetas
- iii. Ataque químico de probetas
- iv. Toma de Micrografías

i. Montaje de Probetas

Para el material de llegada.

El montaje de las probetas se realiza después de cortar una pequeña sección del material, teniendo cuidado de no elevar demasiado la temperatura de la muestra cortada para que la estructura se conserve lo más intacta posible. Una vez seccionado el material, se procede a montarlo en una matriz de acrílico mediante la montadora de probetas para después someterla a un proceso de desbaste con papeles abrasivos que van desde grado 240 hasta un grado 1000.

Equipo empleado

- Mesa de lijas Buehler LTD
- Devastadora de banda Buehler LTD
- Papeles abrasivos de grados 240, 320, 400, 600 y 1000
- Microscopio metalográfico Versamet (**ver fotografía 1**)
- Secadora de aire
- Probetas de acero AISI1018, AISI1045 y AISI4320 con dimensiones de 10x10x10 mm.
- Montadora de Probetas

Técnica operatoria

Cortar las probetas de acuerdo con las dimensiones establecidas y montarlas sobre una matriz de baquelita o de lucita en la montadora de probetas ver **fotografía 2** del capítulo 5. Una vez conseguido el montaje, proceder a su desbaste con la máquina de banda para desbaste e identificarlas de acuerdo a la sección de rolado y material de que se trate.

Inmediatamente después, colocarlas sobre la mesa de lijas y pasar cada una de las probetas por papel abrasivo en orden descendente en relación al grano; comenzando por lija número 240 hasta llegar a una número 600. El lijado deberá realizarse desplazando la probeta en un solo sentido a lo largo del papel abrasivo y utilizando agua como lubricante. Se debe tener cuidado de conservar la superficie de la probeta perfectamente plana procurando girar 90° a la misma cada vez que se cambie de papel abrasivo. Al concluir la operación de desbaste, enjuagar la probeta con agua y secar perfectamente con la secadora de aire para evitar una posible formación de óxido en la superficie.



Fotografía 1. Microscopio Metalográfico VERSAMET, con oculares de 10X a 800X y cámara de 135 mm adaptada para la toma de placas instantáneas.

II. Pulido Mecánico de Probetas

Llamado también pulido fino, permite eliminar rayas e imperfecciones en la superficie de la probeta resultado del desbaste con papel abrasivo. Tiene por objeto proporcionar un acabado de tipo espejo.

Lo anterior se lleva a cabo por medio de platos giratorios cubiertos con paño, raso o seda que giran en velocidades que van desde las 250 a las 500 r.p.m., sobre el cual se frotan las probetas empleando una solución de alúmina disuelta en agua como abrasivo o polvo de diamante disuelto en aceite mineral cuyas partículas abrasivas van desde 100 μm hasta décimas de micrón y agua como lubricante.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Equipo empleado

- Máquina pulidora "Struers DPS".
- Alúmina en solución acuosa de 5 y 3 μm .
- Algodón y alcohol.
- Microscopio metalográfico "Versamet"
- Probetas de acero 1018, 1045 y 4320

Técnica operatoria.

El disco perfectamente limpio y en marcha se baña con la solución de alúmina. La probeta es puesta contra el paño, sujetando con firmeza durante unos minutos y teniendo cuidado de guardar una posición paralela al disco giratorio con el objeto de evitar tener dos o más caras en la superficie de observación.

Se debe emplear agua a intervalos regulares como lubricante y alúmina como abrasivo tantas veces como sea necesario hasta que desaparezcan todas las rayas e imperfecciones de la superficie.

Es recomendable que una vez conseguido el "acabado a espejo" lavar la probeta con el chorro de agua y secar con la secadora de probetas inmediatamente para evitar la aparición de óxidos.

Observar al microscopio la superficie pulida anteriormente a un aumento de 100X, si esta se encuentra libre de imperfecciones o rayas se habrá concluido el proceso, de lo contrario, pasar la probeta de nuevo por la mesa de lijas a grado 600 y repetir el procedimiento anterior tantas veces como sea necesario.

Es importante señalar que en el proceso de pulido mecánico, se tiene que girar la probeta sobre si misma y ejercer una presión suave y firme.

iii Ataque químico de las probetas

Algunos defectos de elaboración pueden ponerse al descubierto mediante una ímple inspección ocular mediante el microscopio. Después de un pulido mecánico puede observarse el contenido de inclusiones que son pequeñas concentraciones de óxidos o silicatos, segregados como resultado del tratamiento térmico y el formado del material.

El conteo de inclusiones se realiza antes del ataque químico de la probeta en aumento de 100x.

Como resultado del ataque con sustancias químicas apropiadas, queda al descubierto la microestructura del material, pudiendo de esta forma apreciar el tamaño, forma y constitución de los granos.

Equipo empleado

- Reactivo de ataque (Nital al 2%)
- Microscopio metalográfico "Versamet"
- Probetas de acero 1018, 1045 y 4320
- Algodón y alcohol
- Secadora de probetas

Técnica operatoria

a) Conteo de inclusiones

La probeta previamente pulida con acabado a espejo es observada en el microscopio.

Con un aumento de 100x se procede al conteo de inclusiones, clasificándolas por su tipo, tamaño, concentración y características en una zona marcada conforme a la norma **ASTM E45-97** ⁽¹⁾

b) determinación de microestructura

Limpiar la superficie pulida a espejo con un algodón humedecido en alcohol, para dejarla libre de polvo y grasa. Aplicar el reactivo sobre la superficie pulida con un algodón y dejar que éste actúe durante unos segundos hasta que la superficie adquiera una coloración mate. Una vez logrado el ataque, se lava la superficie con agua y se seca con la secadora de probetas. ⁽²⁾

Después del ataque químico con el reactivo, se procede a la observación microscópica del material a 100X para determinar el tamaño de grano, se cuenta por parte de la ASTM con 10 cartas normalizadas con granos de diferente tamaño medio de grano. Se ha asignado un índice a cada una de estas cartas del 1 al 10 conocido como índice de tamaño de grano. El mayor índice tiene el menor tamaño de grano; en el caso de este trabajo se recurre a la norma ⁽²⁾, fases presentes y características de las mismas.

iv. Toma de Micrografías

La fotomicrografía es aquella que recoge la imagen microscópica de un material en diversas condiciones físicas, en un espacio determinado por un campo microscópico con la ayuda de un dispositivo fotográfico acoplado al ocular del microscópico.

La toma de imágenes se puede realizar con cámaras de película muy sensible, cámaras digitales o cámaras de video y durante un periodo de exposición variable dependiendo de las características del material y el ataque químico que se le haya aplicado para revelar su microestructura. En algunas ocasiones es recomendable la utilización de filtros para apreciar algunas propiedades como concentración de componentes o fases típicas.⁽⁴⁾

Equipo empleado

- Microscopio metalográfico
- Probetas de acero 1018, 1045 y 4320
- Algodón y alcohol
- Secadora de probetas
- Cámara Digital

Técnica operatoria.

La probeta atacada es puesta y sujeta en la platina del microscopio

Con ayuda del tornillo para desplazamiento horizontal y vertical, ubicar y enfocar mediante el ajuste fino una zona libre de rayas donde se aprecie la microestructura del acero en forma clara.

Una vez seleccionada el área representativa, enfocar la cámara y tomar fotografías en aumentos de 100X, 150X, 300X.

4.1.2 Composición Química

Para la construcción de las curvas de calibración se emplearon tres tipos de acero al carbono en los siguientes grados:

Aceros AISI-1018, AISI-1045 y AISI-4320 con contenidos de C, Mn, P, Si, Ni, Cr y S según literatura mostrados en la **tabla 1**.

ACERO	C	Mn	P _{MAX}	S _{MAX}	Si	Ni	Cr	Mo
AISI 1018	0.15-0.18	0.60-0.90	0.040	0.050	0.15-0.30	1.65-2.00	0.40-0.60	0.20-0.30

ACERO	C	Mn	P _{MAX}	S _{MAX}	Si	Ni	Cr	Mo
AISI 1045	0.15-0.18	0.43-0.50	0.50-0.60	0.040	0.050	---	---	---

ACERO	C	Mn	P _{MAX}	S _{MAX}	Si	Ni	Cr	Mo
AISI 4320	0.17-0.22	0.45-0.65	0.35	0.040	0.050	---	---	---

Tabla 1

Composición Química de aceros tipo AISI 1018, 1045 y 4320 según "PRINCIPLES OF METALLOGRAPHIC LABORATORY PRACTICE", Mc. Graw-Hill; New York 1949

Con los datos reportados en la literatura, se procedió a la realización de un análisis químico en el Departamento de Análisis Químicos del ININ y cuyos resultados se proporcionan en informe de resultados DAQ-154, con Número de Control 620-621/99 (Tabla 2), pudiéndose observar que los resultados del análisis se encuentran dentro de los rangos especificados en la literatura.

MUESTRA	DATOS	C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
Acero 1018	Rebaba	0.151	0.70	0.028	0.032
Acero 1045	"	0.440±0.002	0.66	0.009	0.035
Acero 4320	"	0.221	0.60	0.005	0.038

Tabla 2

Reporte de análisis químico de los aceros 1018, 1045 y 4320 realizado en el Departamento de Análisis Químico del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Los datos guardan una proporción con los obtenidos según PRINCIPLES OF METALLOGRAPHIC LABORATORY PRACTICE"

4.1.3 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de los aceros seleccionados para este estudio se muestran en la **tabla 3** Tomados de ASM Handbook Vol. 4, Heat Treating ASM International Materials, suprimiendo valores tales como Energía de Impacto Izod, elongación y otras relacionadas con el tamaño, acabado y tratamiento térmico aplicado a una probeta de análisis.

PROPIEDADES MECANICAS AISI-1018

CONDICION O TRATAMIENTO	TAMAÑO		ESFUERZO A LA TENSION		ESFUERZO DADO		REDUCCION DE AREA %	DUREZA HB
	mm	in.	MPa	KSI	MPa	KSI		
• Rolado en caliente	19-32	0.75-1.25	400	58	220	32	50	116
	19-32	0.75-1.25	475	69	275	40	62	143
• Estirado en frío	19-32	0.75-1.25	440	64	370	54	40	126
• Estirado en frío, y templado	19-32	0.75-1.25	565	82	485	70	57	163
	16-22	0.63-0.88	485	70	415	60	40	143
	22-32	0.88-1.25	450	65	380	55	40	131
	32-50	1.25-2	415	60	345	50	35	121
	50-76	2-3	380	55	310	45	35	111
• Terminado en frío, relevado de esfuerzos a alta temperatura	16-22	0.63-0.88	450	65	310	45	45	131
	22-32	0.88-1.25	415	60	310	45	45	121
	32-50	1.25-2	380	55	310	45	40	111
	50-76	2-3	345	50	275	40	40	101
• Carburizado a 925°C (1700°F); enfriado y recalentado a 775°C (1425°F), templado en agua, tempered a 175°C (350°F)	19-32	0.75-1.25	634	92	386	56	48	197

PROPIEDADES MECANICAS AISI-1045

CONDICION O TRATAMIENTO	TAMAÑO		ESFUERZO A LA TENSION		ESFUERZO DADO		REDUCCION DE AREA %	DUREZA HB
	mm	in.	MPa	KSI	MPa	KSI		
• Rolado en caliente	19-32	0.75-1.25	565	82	310	45	40	163
	19-32	0.75-1.25	625	91	530	77	35	179
• Estirado en frío	19-32	0.75-1.25	585	85	505	73	45	170
• Estirado en frío, y templado	19-32	0.75-1.25	675	98	405	59	45	212
• Terminado en frío, relevado de esfuerzos a alta temperatura	16-22	0.63-0.88	655	95	585	85	35	187
	22-32	0.88-1.25	620	90	550	80	30	179
	32-50	1.25-2	585	85	515	75	30	170
	50-76	2-3	515	75	485	70	30	163
• Rolado en frío, Relevado de esfuerzos a baja temperatura	16-22	0.63-0.88	690	100	620	90	35	197
	22-32	0.88-1.25	655	95	585	85	30	187
	32-50	1.25-2	620	90	550	80	30	179
	50-76	2-3	585	85	515	75	25	170
• Carburizado a 925°C (1700°F); enfriado y recalentado a 775°C (1425°F), templado en agua, tempered a 175°C (350°F)	16-22	0.63-0.88	655	95	515	75	45	187
	22-32	0.88-1.25	620	90	515	75	40	179
	32-50	1.25-2	585	85	485	70	40	170
	50-76	2-3	550	80	450	65	35	163

Tabla 3

PROPIEDADES MECANICAS AISI-4320

CONDICION O TRATAMIENTO	TAMAÑO		ESFUERZO A LA TENSION		ESFUERZO DADO		REDUCCION DE AREA %	DUREZA HB
	mm	in.	MPa	KSI	MPa	KSI		
• Rolado en caliente	19-32	0.75-1.25	793	115	460	67	51	235
• Rolado en caliente y templado	19-32	0.75-1.25	580	84	425	62	58	163
• Estirado en frío	19-32	0.75-1.25	585	85	505	73	45	170
• Estirado en frío, y templado	19-32	0.75-1.25	675	98	405	59	45	212
• Terminado en frío, relevado de esfuerzos a alta temperatura	16-22	0.63-0.88	655	95	585	85	35	187
	22-32	0.88-1.25	620	90	550	80	30	179
	32-50	1.25-2	585	85	515	75	30	170
	50-76	2-3	515	75	485	70	30	163
• Rolado en frío, Relevado de esfuerzos a baja temperatura	16-22	0.63-0.88	650	100	620	90	35	197
	22-32	0.88-1.25	655	95	585	85	30	187
	32-50	1.25-2	620	90	550	80	30	179
	50-76	2-3	585	85	515	75	25	170
• Carburizado a 925°C (1700°F); enfriado y recalentado a 775°C (1425°F), templado en agua, temperado a 175°C (350°F)	16-22	0.63-0.88	655	95	515	75	45	187
	22-32	0.88-1.25	620	90	515	75	40	179
	32-50	1.25-2	585	85	485	70	40	170
	50-76	2-3	550	80	450	65	35	163

Tabla 3 (continuación)
Propiedades Mecánicas de aceros tipo AISI 1018, 1045 y 4320

Tomados de ASM Handbook Vol. 4, Heat Treating ASM International Materials

4.2 ENSAYOS MECÁNICOS

El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material (es decir, su deformación). Algunas de las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez.

Las propiedades mecánicas de los materiales se determinan realizando ensayos de laboratorio que reproducen las condiciones de servicio hasta donde sea posible. Los factores que deben considerarse son la naturaleza de la carga aplicada, su duración, así como las condiciones del medio. La carga puede ser de compresión, de tensión o de cizalladura, y su magnitud puede ser constante con el tiempo o bien fluctuar con él; mientras que la temperatura puede modificarse de acuerdo con las necesidades de la prueba.

Estas y otras condiciones se aplican para determinar las propiedades mecánicas de los materiales en los llamados Ensayos Mecánicos, que se realizan sobre muestras representativas de material llamadas "probetas"

4.2.1 Ensayo de Tensión.

El ensayo de tensión mide la resistencia de un material a la aplicación gradual de una fuerza de tensión. La probeta se fija en la máquina de ensayo de materiales y se aplica una fuerza F , llamada Carga. Un extensómetro se emplea para medir el alargamiento de la probeta entre las marcas de calibración cuando se aplica la fuerza.

Los esfuerzos de un ensayo simple pueden aplicarse a todos los tamaños y formas de probeta para un material si se transforma la fuerza en esfuerzo y la distancia entre las marcas de calibración a deformación. El esfuerzo y la deformación son importantes para determinar diversas propiedades mecánicas tales como: esfuerzo de cedencia, resistencia verdadera a la fractura, resistencia última, módulo de elasticidad, resistencia a la fluencia, etc.

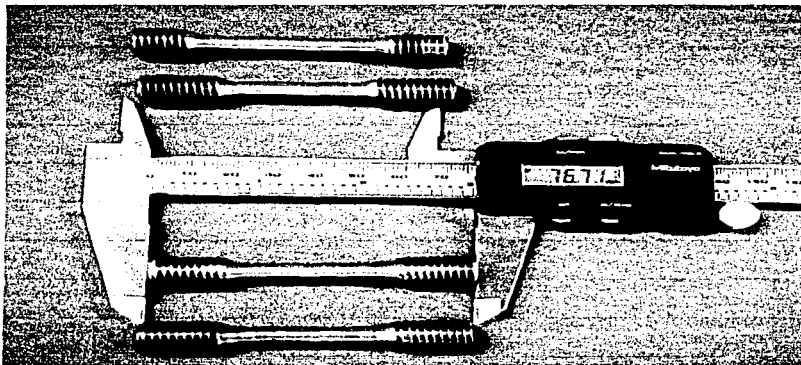
Equipo empleado

- Probetas para ensayo a tensión de aceros al carbono 1018, 1045 y 4320 (**fotografía 4**)
- Máquina de Ensayos Universales "MTS 810" (**fotografía 3**)
- Mordazas de seguridad
- Extensómetro
- PC para captura y proceso de información

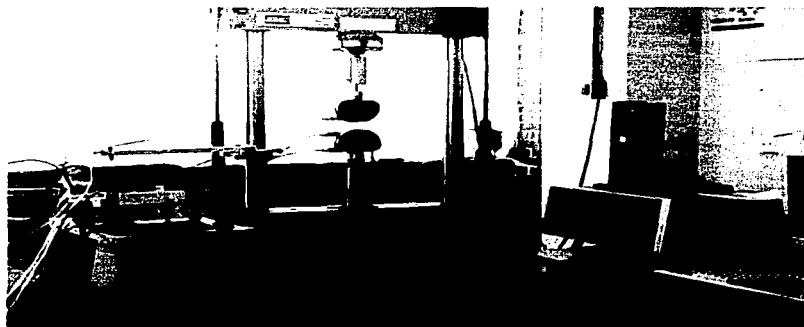
Técnica operatoria

Se preparan las probetas de tensión cilíndricas conforme la norma **ASTM E8M.**⁽⁶⁾

Se colocan las probetas en las mordazas de seguridad, enseguida se aplica una carga de tensión que es incrementada de forma progresiva, el alargamiento producido por la fuerza aplicada es registrado con el extensómetro acoplado a la probeta. El proceso continúa hasta que ocurre la fractura del material.



Fotografía 2
Probetas cilíndricas para ensayos Mecánicos según norma ASTM E8



Fotografía 3
Máquina de Ensayos Universales "MTS 810" y consola de control para proceso de datos en PC

Los datos de carga y elongación son capturados y enviados a la consola para ser presentados en la PC. Con estos datos se procede a la construcción de la curva **esfuerzo-deformación** convencional ver figura 1.

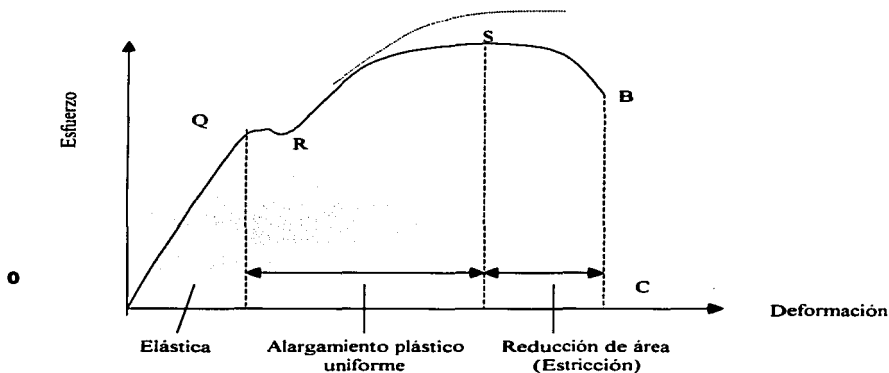


Figura1
Diagrama esfuerzo deformación convencional

La tensión media longitudinal o esfuerzo, se obtiene dividiendo a la carga aplicada (P) entre el área original de la sección transversal de la probeta (A_0), matemáticamente:

$$\text{Esfuerzo} = P/A_0$$

La elongación o alargamiento sufrido por la probeta en las 2" de referencia, se obtiene de la relación:

$$e = [(L_f - L_0) / L_0] \times 100$$

donde:

e % de elongación o alargamiento de la probeta

L_f es la longitud final

L_0 es la longitud inicial

La estricción o por ciento de estricción indica la disminución de área de la sección transversal de la probeta después de la fractura y la superficie original, expresado en por ciento ⁽⁶⁾

$$\text{Reducción de área} = [(A_0 - A_f) / A_0] \times 100$$

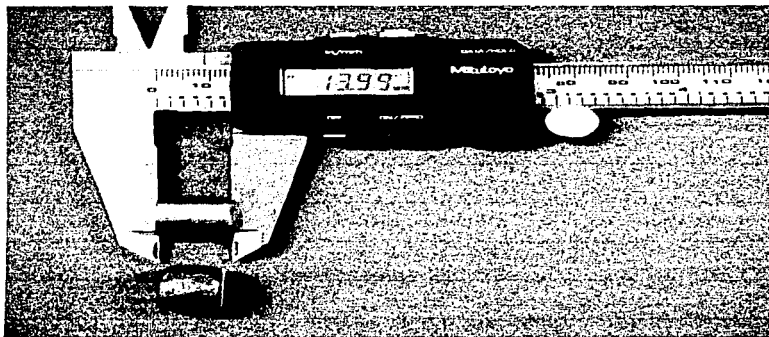
La norma **ASTM E8** marca como mínimo la realización de 3 ensayos para validar los resultados, en este caso se aplicaron los ensayos a tres probetas por cada tipo de acero, con un tratamiento de relevado de esfuerzos aplicado según procedimiento de la **ASM⁽⁷⁾**. Los resultados de cada uno de ellos se presentan en la **tabla 5.1, 5.2 y 5.3** del capítulo 5.

4.2.2 Ensayo de compresión

Un ensayo de compresión se realiza de forma similar a un ensayo de tracción o tensión, excepto que la fuerza es compresiva y la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza. En este caso se utilizan también las ecuaciones para determinar el esfuerzo, elongación y reducción de área. Por convención, una fuerza de compresión se considera negativa y por tanto produce un esfuerzo negativo. Además puesto que L_0 es mayor que L , la deformación calculada es también "negativa". Los ensayos de compresión se utilizan cuando se desea conocer el comportamiento del material bajo deformaciones permanentes grandes (o sea, plásticas) tal como ocurren en los procesos de deformación, o bien cuando tienen un comportamiento frágil a tracción.

Equipo empleado

- Probetas para ensayo a compresión de aceros al carbono 1018, 1045 y 4320 (**ver fotografía 4**)
- Máquina de Ensayos Universales "MTS 810"
- Mordazas de sujeción para probetas cilíndricas
- Extensómetro
- PC para captura y proceso de información



Fotografía 4
Probeta para ensayo a compresión según norma ASTM-8

Técnica operatoria

Se preparan las probetas de compresión cilíndricas conforme la norma **ASTM E8M**.

Se colocan las probetas en las mordazas de sujeción, enseguida se aplica una carga de compresión que es incrementada de forma progresiva, la contracción producida por la fuerza aplicada es registrada con el extensómetro acoplado a la probeta. El proceso continúa hasta que ocurre un "abarrilamiento" o hasta que la carga es tal que no se registra deformación aparente.

Los datos de carga y contracción son capturados y enviados a la consola para ser presentados en la PC. Con estos datos se procede a la construcción de la curva **esfuerzo-deformación** convencional figura 2. Al igual que en la prueba de tensión, la norma **ASTM E8M** indica como mínimo 3 ensayos para validar los resultados, en este caso se aplicaron los ensayos a tres probetas por cada tipo de acero. Los resultados de cada uno de ellos se presentan en la **tabla 5.1, 5.2 y 5.3** en el capítulo 5.

4.2.3 Ensayo de Dureza

La Dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada (por ejemplo, una pequeña abolladura o ralladura). La técnica más empleada se basa en un penetrador pequeño que es forzado sobre una superficie de material a ensayar en condiciones controladas de carga y velocidad de aplicación de la carga.

En este trabajo, se realizó un ensayo de dureza "Rockwell B". Que utiliza distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar virtualmente cualquier metal o aleación desde el más duro al más blando. Los penetradores son bolas esféricas de acero endurecido que tienen diámetros de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 plg (1.588, 3.175, 6.350 y 12.70 mm) y un penetrador cónico de diamante (Brinell), el cual se utiliza para materiales más duros.

Con este sistema se determina un número de dureza a partir de la diferencia de profundidad de penetración que resulta al aplicar primero una precarga inicial pequeña y después una carga mayor. Existen dos tipos de ensayo: Rockwell y Rockwell Superficial, la carga menor es de 10 Kg, mientras que la mayor es de 60, 100 y 150 Kg. Cada escala de medición está representada por una letra del alfabeto como se muestra en la tabla (tabla 4)

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10mm	3000 kg	Hierro fundido y acero
Brinell	Bola de 10mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Tabla 4

Comparación de ensayos típicos de Durezas en diversos materiales y bajo distintas cargas

En el presente trabajo, se determinó la dureza Rockwell B con una carga de 100 Kg y una precarga de 10 Kg. Utilizando un penetrador de bola de acero extraduro de 1/16".

Equipo empleado:

- **Probetas de acero al carbono 1018, 1045 y 4320**
- **Durómetro Universal (ver fotografía 5)**
- **Penetrador de Bola de acero extraduro de 1/16" (Rockwell B)**



Fotografía 5

Durómetro Universal para Rockwell B, equipado con penetrador de bola de 1/16" de acero extraduro para materiales blandos; pero también, se puede emplear para medir dureza Rockwell C en materiales duros.

Técnica operatoria

La dureza de cada una de las probetas deberá ser tomada en el material antes y después del tratamiento térmico de relevado de esfuerzos. Para tal efecto, se selecciona una escala con prefijo B, en el durómetro, una carga de menor o pre carga de 10 Kg. y una carga mayor de 100 Kg.

La superficie de cada una de las probetas deberá estar libre de óxidos o de cualquier otra película que pudiera alterar las mediciones. Colocar la probeta sobre el yunque con la cara a probar hacia arriba y aplicar la pre carga de 10 Kg. para fijar el punto de penetración.

Girar la carátula con el **dial de carga** ubicándola en 90 Kg.

Retirar la carga mayor después de unos segundos mediante el botón de liberación de carga y anotar el valor indicado en la carátula.

El proceso se repite tantas veces como probetas se tengan que analizar, se debe tener cuidado de que el espacio entre mediciones debe de ser de al menos de 3 diámetros de huella entre el centro de una huella y el borde de la probeta o bien con el centro de la otra indentación y muy importante que la probeta sea lo más lisa posible.

Los resultados del ensayo de dureza a material de llegada y con tratamiento térmico se muestran en la sección de "Discusión de Resultados" correspondiente.

4.3 Tratamiento Térmico

4.3.1 Eliminación de Tensiones

Algunos metales experimentan alteraciones en su estructura como consecuencia del incremento de su temperatura por periodos de tiempo específicos, estos procedimientos de variar la temperatura para cambiar algunas de las propiedades de un material, se denominan tratamientos térmicos.

En el desarrollo de este trabajo se realizó el llamado tratamiento térmico de relevado de esfuerzos. La generación de tensiones como se indicó anteriormente es consecuencia de procesos de formado y maquinado del material, para el caso específico, las probetas tienen que liberarse de tensiones. De esta forma las probetas se calientan en un horno a una temperatura de 800° C por alrededor de 1 hora, y después se deja enfriar dentro del horno hasta temperatura ambiente.

Equipo empleado

- **Probetas de acero al carbono 1018, 1045 y 4320**
- **Horno para tratamiento térmico**
- **Secadora de probetas**
- **Reactivos de protección antioxidante**
- **Bolsas de acero inoxidable**
- **Pinzas**

Técnica Operatoria

Antes del tratamiento térmico de relevado de esfuerzos se recurre al siguiente proceso:

Limpiar las probetas de grasa y polvo con la ayuda de un baño ultrasónico. Una vez limpias se procede a bañarlas con una solución de cobre con objeto de evitar posibles oxidaciones dentro del horno de tratamiento térmico.

El baño de cobre se realiza sujetando las piezas con unas pinzas de acero inoxidable e introduciéndolas dentro de un recipiente con solución de sulfato de cobre durante 15 o 20 segundos, agitando constantemente para lograr que el material quede recubierto en su totalidad. Una vez transcurrido el tiempo, las muestras se lavan con agua y se secan con la secadora de probetas.

Las probetas así recubiertas, son introducidas en bolsas de acero inoxidable, para una mejor protección e introducidas en el horno a una temperatura de 650°C por una hora, durante este tiempo se lleva a cabo una homogenización de grano con el consecuente relevado de esfuerzos.

Después de transcurrido el tiempo indicado, el horno es apagado y las probetas se dejan enfriar dentro del "hogar" hasta temperatura ambiente.

Una vez a temperatura ambiente, las probetas son sacadas de la bolsa de foie y son fijadas y lavadas en baño ultrasónico, acto seguido se procede al montaje y preparación metalográfica.

Para el desarrollo de esta práctica, se procedió a realizar el tratamiento térmico a las probetas para metalografía (14 en total) cortadas longitudinal y transversalmente para cada uno de los tres aceros.

El mismo proceso fue seguido para la preparación de las probetas cilíndricas de ensayos a tensión (15 en total) y compresión (15 en total) de cada uno de los aceros; y para las probetas rectangulares empleadas en la medición de esfuerzos residuales (15 de compresión y 15 de tensión).

4.4 Medición de Esfuerzos Residuales

Los esfuerzos residuales son como ya se mencionó en el capítulo 1 estados de tensión o de compresión presentes en los aceros como consecuencia del trabajo mecánico empleado para su deformación y también como consecuencia de algunos procesos de tratamiento térmico. Su determinación en el presente trabajo, se realizó por medio del Parámetro Magnetoelástico, el cual se basa en el llamado Ruido Barkhausen que induce un campo magnético y una reordenación de los dominios magnéticos del material, dichos cambios son registrados por un sensor y presentados en forma de mediciones del Parámetro Magnético en Función de una carga aplicada.

Equipo Empleado

- Equipo de Medición "STRESSCAN-100" (ver fotografía 6)
- Papeles abrasivos grados 240, 320, 400 y 600
- Máquina pulidora "Struers DPS".
- Probetas de acero 1018, 1045 y 4320 para determinar Esfuerzos residuales en ensayo a tensión y compresión
- Algodón y alcohol
- Secadora de probetas



Fotografía 6

Equipo de Medición de Esfuerzos Residuales "STRESSCAN-100". El cual mide el Parámetro Magnetoelástico de un material por medio del Ruido Barkhausen

4.4.1 Preparación de probetas Rectangulares

Equipo empleado

- Papeles abrasivos grados 240, 320, 400 y 600
- Probetas de acero 1018, 1045 y 4320
- Algodón y alcohol
- Secadora de probetas
- Sulfato de cobre
- Baño Ultrasónico

Técnica Operatoria

En la realización de este trabajo, se procedió al maquinado de 5 probetas de tensión y 5 probetas de compresión con las dimensiones indicadas en la **figura 2**, para cada tipo de acero, en total se maquinaron 15 probetas para ensayos a tensión y 15 probetas para ensayo a compresión.

Se realizó a un desbaste con papel abrasivo comenzando con un papel grado 240 y terminando con un papel grado 600.

Las probetas una vez lijadas hasta grado 600, son puestas en un baño de ultrasonido para librarlas de grasas o polvos y poder aplicar el recubrimiento antioxidante de cobre, para posteriormente, administrarle un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos. Para el tratamiento térmico se sigue la misma técnica operatoria indicada en el apartado 4.2.4.1.

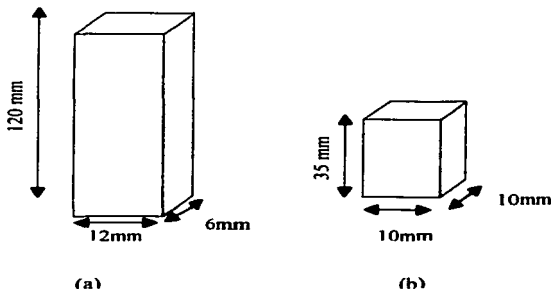


Figura 2
Probetas típicas para determinar concentración de esfuerzos residuales
(a) probetas de tensión, (b) probeta de compresión

Calibración del equipo STRESSCAN-100

Dos importantes variables que intervienen en la calibración del equipo son el Rango (R) y la Magnetización (M) para una correcta lectura del Parámetro Magnetoelástico (PM).

Selección de rango.

Para el procedimiento de la selección se usa la combinación de R y M convenientes en el S-100 para tal efecto, se hace lo siguiente:

1. Seleccionar R = 8, haciendo mediciones sucesivas con incrementos de M comenzando desde 00 hasta lecturas aproximadas de SD = 50. Si SD = 50, se obtiene un solo valor de M [$15 < M < 99$], implicando que R = 8 es el rango correcto.

2. Si SD = 50, y se tiene que M < 15 y R = 8, seleccionar R = 4 y repetir el punto (1). Si SD = 50, se tiene ahora un solo valor de M [$15 < M < 99$], implica que R = 4 es el rango correcto.

3. Si SD = 50, y se tiene que M < 15 y R = 4, seleccionar R = 2 y repetir el punto (1). Si SD = 50, se tiene ahora un solo valor de M [$15 < M < 99$], implica que R = 2 es el rango correcto.

4. Si SD = 50, y se tiene que M < 15 y R = 2, seleccionar R = 1 y repetir el punto (1). Si SD = 50, se tiene ahora un solo valor de M [$15 < M < 99$], implica que R = 1 es el rango correcto.

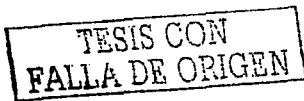
Teniendo la combinación correcta de R y M, en el S-100, el equipo estará listo para hacer mediciones del parámetro magnetoelástico en la pieza a ensayar.

Calibración.

Para la calibración del S-100 debe tomarse en cuenta el rango, la magnetización y el valor obtenido de la medición hecha en el "aire" conforme a la siguiente tabla:

Magnetización	Rango	Lectura en pantalla
99	1	1.0
99	2	1.0
99	4	1.2
99	8	2.5

Estas lecturas corresponden al transductor normal y deben estar dentro del rango con una variación de $\pm 10\%$.



Precauciones de manejo y seguridad.

Se debe tomar en cuenta y llevar a cabo los siguientes requisitos:

- a). **No calentar o sobre calentar al momento del desbaste y pulido en la zona o muestra a estudiar.**
- b). **Un pulido mínimo con papel abrasivo 1000.**
- c). **Que no exista campo magnético en la muestra.**
- d). **Abstenerse de acercarse al transductor a cualquier objeto magnético, como: bobinas, imán, etc., no golpearlo.**
- e). **El transductor debe estar limpio.**
- f). **Sujetar con firmeza el transductor al momento o durante la prueba.**
- h). **El transductor debe permanecer al menos cinco segundos por medición en la muestra.**

Técnica Operativa

1. **Es necesario que las probetas sometidas a tratamiento térmico estén completamente limpias de polvo, óxidos o cualquier recubrimiento para ello es necesario lijarlas con papel abrasivo número 240 hasta llegar a número 600 y limpiarlas mediante un baño ultrasónico con alcohol. Es necesario que el transductor se encuentre perfectamente limpio de grasa y polvo, si es necesario, se recomienda limpiarlo con un algodón humedecido con alcohol.**
2. **Seleccionar el rango apropiado para el acero a medir de acuerdo con la tabla de rango y magnetización, procurando que la lectura en pantalla no se sature o llegue a un valor por debajo del de saturación sin la presencia de carga.**

4.4.1.1 Ensayo a Tensión

1. **Colocar las probetas de tensión en las mordazas de sujeción y aplicar una carga de tensión gradual hasta un máximo de 90% del esfuerzo de cedencia (real) calculado en el ensayo a tensión de cada uno de los aceros.**
2. **Encienda el S-100 con el botón "POWER", Seleccionar a R y M en el panel frontal del S-100.**

3. Colocar el transductor en el área o muestra a examinar y anotar la lectura de SD, cuyo valor es el parámetro magnetoelástico.

4. Variar la carga de tensión en forma gradual y anotar el valor de la lectura SD, continuar con este procedimiento para realizar por lo menos 20 mediciones en cada prueba. Rechazar aquellas lecturas que se alejen más o menos del 3% en el mismo punto.

5. No es válido tomar lecturas donde el transductor no tenga un plano paralelo a él.

6. Se realizan tres series de mediciones en cada prueba, comenzando por tomar la lectura cuando la carga es cero y finalizando cuando la carga alcanza el 90% del esfuerzo de cedencia como máximo.

4.4.1.2 Ensayo a Compresión

El ensayo a Compresión, se realiza de igual manera que el de tensión, solo que ahora la carga aplicada es de compresión y siguiendo los pasos 1 a 6 del apartado anterior.

1. Colocar las probetas de compresión en las mordazas de sujeción y aplicar una carga de tensión gradual hasta un máximo de 90% del esfuerzo de cedencia (real) calculado en el ensayo a tensión de cada uno de los aceros.

2. Encender el S-100 con el botón "POWER", Seleccionar a R y M en el panel frontal del S-100.

3. Colocar el transductor en el área o muestra a examinar y anotar la lectura de SD, cuyo valor es el parámetro magnetoelástico.

4. Variar la carga de compresión y anotar el valor de la lectura SD, continuar con este procedimiento para realizar por lo menos 20 mediciones en cada prueba. Rechazar aquellas lecturas que se alejen más o menos del 3% en el mismo punto.

5. No es válido tomar lecturas donde el transductor no tenga un plano paralelo a él.

6. Se realizan tres series de mediciones en cada prueba, comenzando por tomar la lectura cuando la carga es cero y finalizando cuando la carga alcanza el 90% del esfuerzo de cedencia como máximo.

4.5 ELABORACION DE CURVAS DE CALIBRACIÓN

Después de realizar los ensayos de tensión y compresión a tres probetas de tensión y tres de compresión por cada tipo de acero, se procede a la construcción de las curvas de calibración.

Las mediciones observadas mediante el equipo de medición STRESSCAN100 son tabuladas junto con su respectiva carga aplicada transformada a unidades de esfuerzo, para lo cual se realiza la siguiente operación.

$$\sigma = (F/A) \times 1000$$

Donde:

σ = Esfuerzo (Ksi)

F= Carga aplicada (KN)

A= Area transversal de la probeta (mm²)

Los resultados de las mediciones de Esfuerzo (σ) vs Parámetro Magnetoelástico (PM), se muestran en las tablas:

1.0 a 1.6 para el Acero AISI-1018, 2.0 a 2.6 para el Acero AISI-1045 y 3.0 a 3.6 para el Acero AISI 4320.

El valor promedio obtenido de cada tercio de lecturas se aplica en la gráfica Parámetro Magnetoelástico (PM) contra Esfuerzo aplicado (σ) respectivamente colocando al Parámetro Magnetoelástico sobre el eje de las ordenadas, mientras que al esfuerzo se le coloca sobre el eje de las abscisas como se muestra en la **figura 3**.

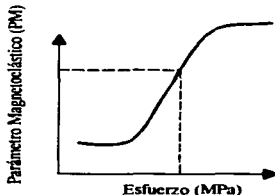


Figura 3

Ubicación de los valores de parámetro magnetoelástico –esfuerzo en una grafica

Manera de leer la gráfica.

En la gráfica léase el valor PM en el eje de las ordenadas y luego perpendicular al mismo con la ayuda de una regla trace una línea que intercepte la curva, después baje sobre la gráfica hasta encontrarse con el eje de las abscisas y léase el valor del esfuerzo σ correspondiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(1) ASTM E45-97 "STANDARD TEST METHODS FOR DETERMINING THE INCLUSION CONTENT OF STEEL"

(2) ASTM E-3 "STANDARD METHODS OF PREPARATION OF METALLOGRAPHICS SPECIMENS", ASTM E-407 "STANDARD TEST METHODS FOR MICROTETCHING METALS AND ALLOYS"

(3) ASTM E-3 "STANDARD METHODS OF PREPARATION OF METALLOGRAPHICS SPECIMENS"

(4) Kelh, G.L.
PRINCIPLES OF METALLOGRAPHIC LABORATORY PRACTICE,
Mc. Graw-Hill
New York 1949

(5) ASTM E8 "METHODS OF TENSION TESTING OF METALLIC MATERIALS "

(6) Dieter, G.E.,
MECHANICAL METALLURGY. 3rd EDITION,
Mc Graw-Hill , Pág. 125
New York 1986.

(7) M. Unterweiser Paul & E. Bayer Howard,
HEAT TREATER 'S GUIDE. STANDARD PRACTICES AND PROCEDURES FOR
STEEL. AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM)
Pág 16, 1981.
Ohio, USA

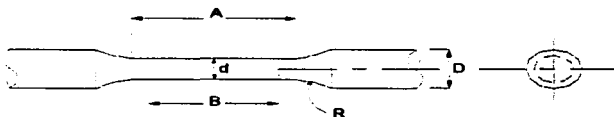
CAPITULO 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Dentro de este capítulo se presenta el análisis de los datos resultado de la medición de los Esfuerzos Residuales determinados a través del equipo STRESSCAN-100 que se auxilia del método del Ruido Barkhausen. dentro de la familia de aceros seleccionada.

Previo a la evaluación de la concentración de esfuerzos residuales en los aceros, se procedió a determinar el valor real del esfuerzo de cedencia, fractura y esfuerzo máximo; así como el porcentaje de deformación y otros parámetros mecánicos cuyos resultados se presentan en la **Tablas 5.1, 5.2 y 5.3** Que se encuentran en concordancia con los valores reportados dentro de la literatura para este tipo de aceros y para las condiciones de acabado y tratamiento térmico como se indica en la **tabla 5.4.** del capítulo 5.

Para lo cual se preparan y ensayan las probetas de tensión circulares conforme a la norma ASTM, como se muestra en la figura siguiente.



- A = Sección Reducida 2 $\frac{1}{2}$ "
- B = Longitud de prueba 2"
- D = Diámetro $\frac{1}{2}$ "
- R = Radio $\frac{1}{8}$ "
- d = Diámetro interno 0.505"

Probeta de tensión normalizada con sección recta circular

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Donde

- Φ = Diámetro de la sección transversal
 L_0 = Longitud inicial de la probeta antes de la prueba (tensión)
 L_r = Longitud Final de la probeta después de la prueba (tensión)
 A = Área inicial de la probeta
 Φ = Diámetro final de la probeta
 σ_{max} = Esfuerzo máximo
 σ_{rep} = Esfuerzo a la ruptura
 σ_c = Esfuerzo a la cedencia
 $\%d$ = Porcentaje de deformación
 h_0 = Longitud inicial de la probeta (compresión)
 h_r = Longitud final de la probeta (compresión)

DIMENSIONES PROBETAS DE TENSIÓN

MUESTRA	Φ (mm)	L_0 (mm)	L_r (mm)	A (mm ²)	Φ_{final} (mm)
T1	6.37	30	41.36	31.869	3.90
T2	6.40	31	38.94	32.169	3.87
T3	6.38	30	39.68	31.969	4.01

DIMENSIONES PROBETAS DE COMPRESIÓN

MUESTRA	Φ (mm)	h_0 (mm)	h_r (mm)	$\%d$	A (mm ²)
C1	10.02	20.05	15.41	23.1421	78.854
C2	10.01	19.89	14.56	26.797	78.696
C3	10.11	19.99	17.13	14.307	80.277

ESFUERZOS DE TENSIÓN

MUESTRA	σ_{max} (MPa)	$\%d$	σ_{rep} (MPa)	σ_c (MPa)
T1	430.562	23.568	310.256	345.865
T2	415.625	26.432	312.546	340.564
T3	380.834	22.863	320.536	360.512

ESFUERZOS DE COMPRESIÓN

MUESTRA	σ_{max} (MPa)
C1	249.825
C2	272.56
C3	265.715

Tabla 5.1
Resultados de Ensayos de Tensión y Compresión en acero AISI-1018
Probetas sometidas a Tratamiento Térmico de Relevado de Esfuerzos

DIMENSIONES PROBETAS DE TENSION

MUESTRA	Φ (mm)	L_0 (mm)	L_f (mm)	A (mm ²)	Φ_{final} (mm)
T1	6.38	30	40.46	31.969	3.95
T2	6.42	30	38.55	32.371	3.94
T3	6.46	30	38.67	32.169	4.14

DIMENSIONES PROBETAS DE COMPRESION

MUESTRA	Φ (mm)	h_0 (mm)	h_f (mm)	%d	A (mm ²)
C1	10.01	19.99	11.52	42.4	78.696
C2	10.01	19.95	16.14	19.1	78.696
C3	10.70	20.20	18.50	8.41	89.920

ESFUERZOS DE TENSION

MUESTRA	σ_{max} (MPa)	%d	σ_{avg} (MPa)	σ_c (MPa)
T1	972.326	1.45	771.258	904.534
T2	952.086	1.48	750.679	892.401
T3	939.640	1.46	745.835	891.053

ESFUERZOS DE COMPRESION

MUESTRA	σ_{max} (MPa)
C1	450.638
C2	468.835
C3	430.325

Tabla 5.2
Resultados de Ensayos de Tensión y Compresión en acero AISI-1045
Probetas sometidas a Tratamiento Térmico de Relevado de Esfuerzos

DIMENSIONES PROBETAS DE TENSIÓN

MUESTRA	Φ (mm)	L_0 (mm)	L_r (mm)	A (mm ²)	Φ_{resal} (mm)
T1	6.35	30.01	37.89	31.669	4.02
T2	6.39	30.10	40.25	32.069	3.97
T3	6.40	30	29.87	32.169	3.85

DIMENSIONES PROBETAS DE COMPRESIÓN

MUESTRA	Φ (mm)	h_0 (mm)	h_f (mm)	% ϵ_d	A (mm ²)
CT1	9.95	20	17.25	13.750	77.756
CT2	10.12	19.76	15.37	22.217	80.436
CT3	10.08	20.03	17.43	12.981	79.801

ESFUERZOS DE TENSIÓN

MUESTRA	σ_{max} (MPa)	% ϵ_d	σ_{mg} (MPa)	σ_c (MPa)
T1	730.568	1.38	690.156	785.314
T2	690.986	2.13	700.326	685.641
T3	760.595	1.56	680.975	891.052

ESFUERZOS DE COMPRESIÓN

MUESTRA	σ_{max} (MPa)
T1	520.637
T2	490.685
T3	517.698

Tabla 5.3
Resultados de Ensayos de Tensión y Compresión en acero AISI-4320
Probetas sometidas a Tratamiento Térmico de Relevado de Esfuerzos

Acero AISI 1018

Tratamiento	Rango de Temperatura	
	°C	°F
Forjado	1290-1120	2350-2050
Templado	850-900	1575-1650
Normalizado	900-955	1650-1750

Acero AISI 1045

Tratamiento	Rango de Temperatura	
	°C	°F
Forjado	1245 _{máx}	2275 _{máx}
Templado	790-870	1450-1600
Normalizado	830-915	1525-1675

Acero AISI 4320

Tratamiento	Rango de Temperatura	
	°C	°F
Forjado	1230 _{máx}	2250 _{máx}
Templado	830-845	1525-1550-
Normalizado	900-955	1650-1750

Tabla 5.4

Temperaturas de tratamientos Tomados de Carbon Steels/Engineering Properties of Steel

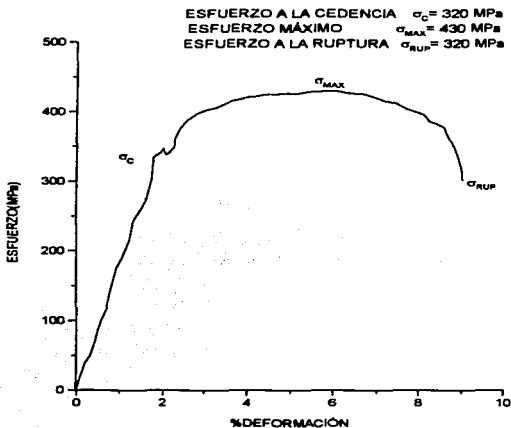
Las pruebas se realizaron con probetas cilíndricas para ensayo a tensión de acuerdo con la norma ASTM E8⁽¹⁾ para pruebas mecánicas.

Para cada acero, se inicia con la probeta identificada como T1 a la cual se le aplicó un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos a temperatura de 800 °C durante una hora y enfriada al aire, la prueba continua con la probeta T2 bajo las mismas condiciones y finaliza con la probeta T3 ya que la prueba marca un mínimo de tres probetas ensayadas para validar resultados⁽²⁾.

Se encuentra que el esfuerzo a la cedencia es de 360 MPa, esfuerzo máximo de 430MPa y un esfuerzo a la fractura de 320 MPa para acero AISI-1018.

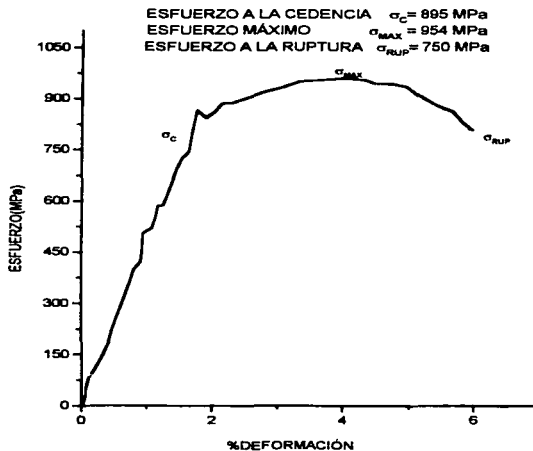
En tanto que se reportan los valores de 900 MPa en esfuerzo de cedencia, 970 MPa en esfuerzo máximo y 770 MPa en esfuerzo a la fractura para acero tipo AISI-1045, mientras que para el acero AISI-4320 se encuentran 800 MPa para esfuerzo a la cedencia, 760 MPa para esfuerzo máximo y 700 MPa para el esfuerzo de fractura en Pruebas de Tensión.

Así mismo, para las pruebas de compresión se reportan los valores 300 MPa para acero AISI-1018, 500 MPa en acero AISI-1045 y 520 MPa para el tipo AISI-4320. Los resultados de los ensayos de esfuerzo-deformación, se muestran en las graficas 1, 2 y 3.



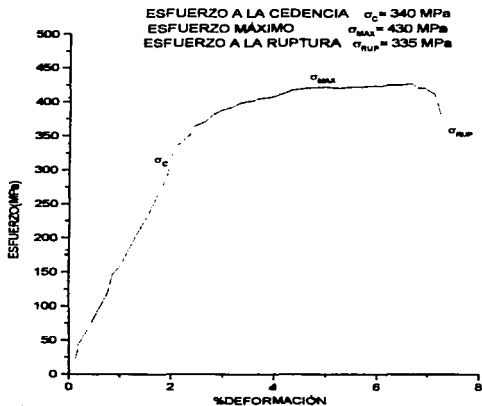
GRAFICA No. 1
 ENSAYO DE TENSIÓN ACERO AISI-1018

MUESTRA	σ_{max} (MPa)	%d	σ_{rup} (MPa)	σ_c (MPa)
T1	430.562	23.568	310.256	345.865
T2	415.625	26.432	312.546	340.564
T3	380.834	22.863	320.536	360.512



GRAFICA No. 2
 ENSAYO DE TENSIÓN ACERO AISI-1045

MUESTRA	σ_{max} (MPa)	%d	σ_{rup} (MPa)	σ_C (MPa)
T1	972.326	1.45	771.258	904.534
T2	952.086	1.48	750.679	892.401
T3	939.640	1.46	745.835	891.053

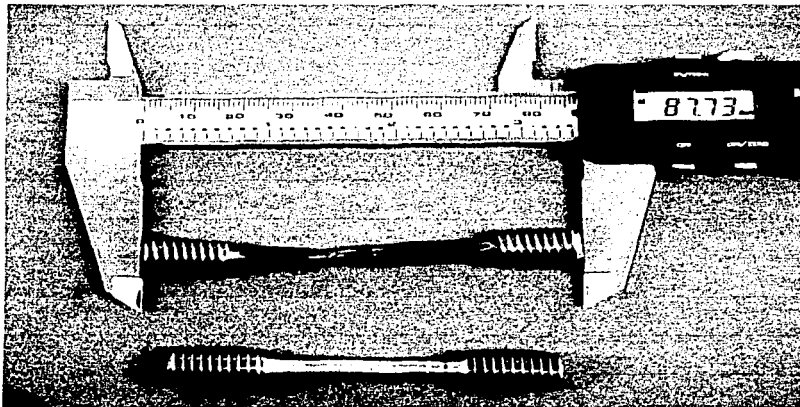


GRAFICA No. 3
 ENSAYO DE TENSION ACERO AISI-4320

MUESTRA	σ_{max} (MPa)	%d	σ_{RUP} (MPa)	σ_c (MPa)
T1	730.568	1.38	690.156	785.314
T2	690.986	2.13	700.326	685.641
T3	760.595	1.56	680.975	891.052

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

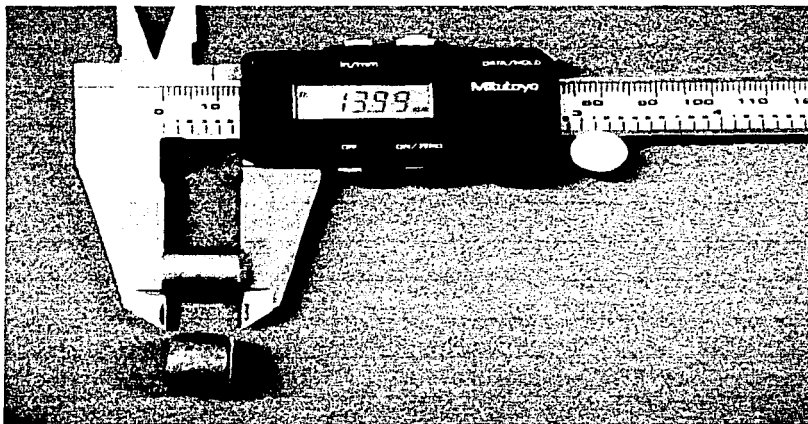
Las fotografías 1a y 1b, muestran el tipo de probetas empleadas en las pruebas mecánicas de tensión, donde se aprecia la disminución de área transversal característica de la deformación sufrida por un probeta sometida a carga de tensión y llevada hasta la ruptura. Por otra parte, también se muestran las probetas de compresión empleadas para tal ensayo, en donde se puede apreciar el "abarrilamiento" que sufren las probetas cuando son sometidas a cargas de compresión durante un ensayo de compresión convencional.



Fotografía 1a

Probetas cilíndricas para ensayos Mecánicos según norma ASTM E8
Probeta para ensayo a tensión, la probeta ensayada se presenta entintada y se observa el incremento en la longitud con la respectiva disminución de área.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 1b

Probeta para ensayo a compresión. En este caso, la probeta ensayada presenta una disminución de la longitud y aumento de área transversal.

Los resultados determinados mediante esta prueba, se encuentran dentro de los parámetros indicados en la literatura correspondiente; la variación de algunos valores se deben a factores tales como tipo y tiempo de tratamiento térmico, formado y corte de las probetas del material original.

Dentro de las pruebas de caracterización, se realizó la prueba para determinar la dureza del material tanto en material de llegada, como en el material sometido a tratamiento térmico de relevado de esfuerzos. Esta prueba se realizó con un penetrador esférico de 1/16 in, con una carga de 100 Kg y una precarga de 10 Kg calibrada en una dureza patrón de 98.6 HB y a temperatura ambiente⁽⁴⁾.

Los resultados indican que la dureza en el material de llegada AISI-1018 es de 92 HB en promedio para las probetas C1, C2, C3, T1, T2 y T3 respectivamente y medidas según las zonas indicadas. Mientras que para el caso de probetas sometidas a tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, se reportan los valores de 86 HB en promedio en las zonas de medición.

En tanto que para el acero AISI-1045 se encontró un valor de 91HB en material de llegada para las probetas C1, C2, C3, T1, T2 y T3, valor que varía solamente un poco, ya que después del relevado de esfuerzos, esta dureza disminuye a 90 HB en cada una de las probetas en promedio.

Los valores de dureza determinados para el material de llegada del acero AISI-4320 determinados fueron de 85 HB en cada una de las probetas, mientras que la dureza observada después del tratamiento térmico fue de 85 HB.

Los valores correspondientes a cada una de estas pruebas se muestran en la **Tabla 5.5, 5.6 y 5.7.**

MUESTRA	DUREZA HB			PROMEDIO
	I	II	III	
C1	92	92	91	92
C2	91	92	91	91
C3	90	91	91	91
T1	93	90	92	92
T2	92	92	93	92
T3	91	92	91	91

Durezas en material de llegada AISI1018

MUESTRA	DUREZA HB			PROMEDIO
	I	II	III	
C1	69	69	69	69
C2	70	69	70	70
C3	67	68	67	67
T1	86	86	86	86
T2	82	86	86	85
T3	89	85	83	86

Durezas en acero AISI1018 con Tratamiento Térmico de Relevado de Esfuerzos

Condiciones de ensayo:
 Penetrador de esfera de 1/16 in
 100 Kg de carga
 10 Kg de precarga
 Dureza Patrón 98.6

**Tabla 5.5
 Resultado de Durezas en acero 1018**

MUESTRA	DUREZA HB			PROMEDIO
	I	II	III	
C1	92	90	91	91
C2	89	91	90	90
C3	90	91	90	90
T1	91	92	91	91
T2	90	91	90	90
T3	90	90	91	90

Durezas en acero AISI1045 material de llegada

MUESTRA	DUREZA HB			PROMEDIO
	I	II	III	
C1	92	93	92	92
C2	91	88	92	90
C3	90	91	92	91
T1	91	90	91	91
T2	88	89	90	89
T3	89	90	90	90

Durezas en acero AISI1045 con tratamiento térmico de relevado de esfuerzos

Condiciones de ensayo:
 Penetrador de esfera de 1/16 in
 100 Kg de carga
 10 Kg de precarga
 Dureza Patrón 98.6

Tabla 5.6
 Resultado de Durezas en acero 1045

MUESTRA	DUREZA HB			PROMEDIO
	I	II	III	
C1	83	87	83	84
C2	85	84	85	85
C3	85	87	83	85
T1	86	85	86	86
T2	85	84	84	84
T3	86	85	85	85

Dureza en material de llegada acero AISI4320

MUESTRA	DUREZA HB			PROMEDIO
	I	II	III	
C1	85	83	85	84
C2	84	84	87	85
C3	86	85	86	86
T1	83	83	83	83
T2	83	84	84	84
T3	83	84	83	83

Durezas en acero AISI4320 con tratamiento térmico de relevado de esfuerzos

Condiciones de ensayo:
 Penetrador de esfera de 1/16 in
 100 Kg de carga
 10 Kg de precarga
 Dureza Patrón 98.6

Tabla 5.7
 Resultado de Durezas en acero 4320

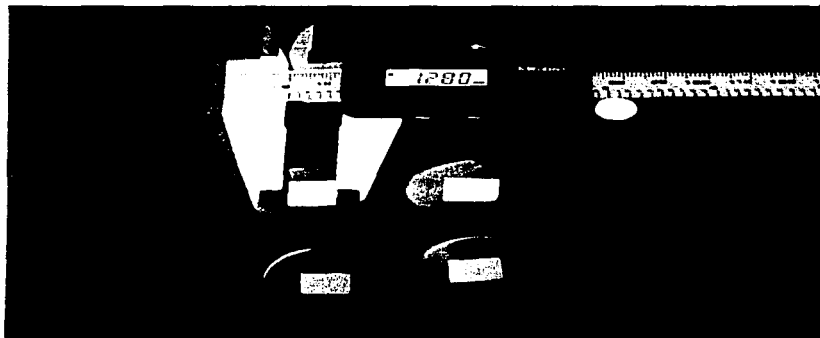
En cuanto al análisis para la determinación de inclusiones dentro de los aceros, se logro observar un número de entre 3 y 4 inclusiones por zona observada con tamaño de alrededor de $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$, siendo estas del tipo óxidos globulares de tamaño estándar 1 a ½.

Como se mencionó anteriormente, para el desarrollo de este trabajo, se seleccionaron aceros tipo AISI-1018, AISI-1045 y AISI-4320 para la medición de esfuerzos residuales y la posterior construcción de curvas de calibración de acuerdo con sus esfuerzos de cedencia encontrados por medio de las pruebas mecánicas correspondientes. Para la determinación de dichos esfuerzos residuales, los aceros fueron preparados en probetas rectangulares con dimensiones de 120x6x12 mm para ensayos de tensión y de 35x10x10 mm para ensayo de compresión cuyas características se muestran en la **figura 4.3**, A las cuales se les aplico un tratamiento térmico de relevado de tensiones según procedimiento de la ASM para tratamientos térmicos con el objeto de homogenizar y medir el tamaño de grano, contenido de inclusiones, medir dureza y concentración de esfuerzos residuales en el material analizado⁽⁸⁾.

El tratamiento térmico aplicado en este caso fue un Relevado de Esfuerzos, el cual se llevo a cabo después de preparar las probetas y recubrirlas con una solución antioxidante, se colocan dentro del horno por un tiempo de 1 hora a 800°C de temperatura, para dejarse enfriar al aire como lo indica el apartado 4.3.1

Es importante mencionar que todas las probetas se prepararon y recibieron el mismo tratamiento térmico al mismo tiempo para asegurar tener las mismas condiciones tanto físicas como mecánicas en cada una de ellas.

El conteo de inclusiones se realizó preparando probetas metalográficas ver **fotografía 2a y 2b**, después de un acabado a espejo siguiendo el procedimiento **ASTM E45** ⁽²⁾, el cual marca una superficie de medición de al menos 0.50 mm² de área para la medición del conteo de inclusiones, en recorridos continuos del material y empleando aumentos de 100x para la visualización en microscopio de cualquier tipo de imperfecciones presentes en las condiciones de tratamiento térmico indicado en una superficie con pulido tipo espejo.



a



b

Fotografía 2

Probetas para ensayos de metalografía típica, montadas sobre una matriz de baquelita y pulidas a espejo. (a) corte longitudinal y (b) corte transversal

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados de este proceso de medición dentro del material se reportan en las **Tablas 5.8, 5.9 y 5.10**. Mediante esta prueba se determinó la presencia de entre 3 y 4 inclusiones por zona, siendo estas ligeras y pronunciadas de tipo D, Óxidos Globulares con una intensidad de entre 1 y 1½, valor que se encuentra dentro de los parámetros establecidos por el procedimiento mencionado para aceros ferromagnéticos.⁽³⁾. Es importante mencionar que las muestras tienen que estar libres de cualquier óxido o carburo que pudieran afectar en la determinación de el contenido de inclusiones y como se mencionó estas deberán tener un acabado tipo espejo libres de ralladuras o manchas en las zonas de medición.

MATERIAL ACERO AISI-1018

ZONA	INCLUSIONES EN MATERIAL DE LLEGADA	INCLUSIONES CON TRATAMIENTO TÉRMICO
1	1	1
2	1	1
3	4	1
4	1	1
5	4	1
6	1	1
7	1	2
8	1	1
9	1	2
10	1	4
11	4	1
12	4	1
13	4	1
14	9	1
15	1	0
16	4	1
17	1	1
18	9	1
19	1	1
20	1	0
21	1	1
22	1	1
23	4	1
24	1	1
PROMEDIO	3	1

Tabla 5.8 Conteo de inclusiones acero AISI-1018

MATERIAL ACERO AISI-1045

LLEGADA	INCLUSIONES EN MATERIAL DE LLEGADA	INCLUSIONES CON TRATAMIENTO TÉRMICO
1	4	4
2	4	4
3	4	4
4	4	4
5	4	4
6	4	4
7	0	0
8	4	4
9	1	1
10	4	4
11	4	4
12	4	4
13	4	4
14	4	4
15	4	4
16	4	4
17	1	1
18	4	4
19	4	4
20	4	4
21	4	4
22	4	4
23	4	4
24	4	4
PROMEDIO	4	4

Tabla 5.9 Conteo de inclusiones acero AISI-1045

MATERIAL ACERO AISI-4320

LLEGADA	INCLUSIONES EN MATERIAL DE LLEGADA	INCLUSIONES CON TRATAMIENTO TÉRMICO
1	4	1
2	4	4
3	4	4
4	9	4
5	4	1
6	1	1
7	4	1
8	4	4
9	4	4
10	4	4
11	4	4
12	4	4
13	4	1
14	4	4
15	4	4
16	1	4
17	4	4
18	9	4
19	4	1
20	4	1
21	4	1
22	4	4
23	1	1
24	4	1
PROMEDIO	4	3

Tabla 5.10 Conteo de inclusiones acero AISI-4320

Para la medición del tamaño de grano, los resultados indican un tamaño de entre ASTM 8 para los aceros AISI-1018 y AISI-1045, mientras que para el acero AISI-4320, se reporta un tamaño de grano ASTM 10 como lo indica la **Tabla 5.11**.

MATERIAL	MUESTRA	TAMAÑO DE GRANO		OBSERVACIONES
		MATERIAL DE LLEGADA	TRATAMIENTO TÉRMICO	
AISI-1018	T1	7	8	Granos equiaxiales de ferrita de tamaño 7 y 8 para el material de llegada, cambiando a número 8 después del TT
	T2	7	8	
	T3	8	7	
	C1	8	8	
	C2	8	8	
	C3	8	8	
AISI-1045	T1	8	6	Presenta en su microestructura granos de ferrita y perlita, con un ligero cambio del grano pasando de 8 a 10 el tamaño.
	T2	8	6	
	T3	8	6	
	C1	8	6	
	C2	8	7	
	C3	8	7	
AISI-4320	T1	10	10	Microestructura forma por granos equiaxiales de ferrita hierro alfa, manteniéndose el tamaño de grano en 10 de promedio
	T2	10	10	
	T3	10	10	
	C1	10	10	
	C2	10	10	
	C3	10	10	

Tabla 5.11

Tamaño de Grano en aceros AISI 1018, 1045 y 4320

Se inicia la prueba con el material de llegada AISI-1018 en la probeta identificada como T1 encontrándose un tamaño de grano ASTM 7, para pasar a un tamaño de ASTM 8 como consecuencia de la aplicación del tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, el cual es similar al reportado en las probetas de tensión T2 y T3 y compresión C1, C2 y C3, respectivamente.

Este mismo tamaño de grano, se repite para el material de llegada AISI-1045 en sus probetas T1, T2 y T3; C1, C2 y C3. En tanto que el tamaño de grano para el acero AISI-4320 se reporta de tamaño ASTM 10 para el material de llegada en sus probetas T1, T2 y T3; C1, C2 y C3, respectivamente.

Los granos del acero 1018, como se dijo tienen un tamaño de grano ASTM 7 antes del tratamiento térmico, con microestructura formada por granos equiaxiales de ferrita rodeado por áreas de perlita. Ver fotografías 3 a 6.



Fotografía 3. 1018 Material de llegada Transversal
150X



Fotografía 5. 1018 Material de llegada Corte
Longitudinal 150X



Fotografía 4. 1018 Material de llegada Transversal
300X



Fotografía 6. 1018 Material de llegada Corte
Longitudinal 300X

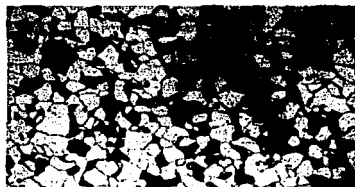
Como resultado del tratamiento térmico, el tamaño sufre una variación muy pequeña, es decir, cambia a un tamaño de grano ASTM 8 debido al tiempo de permanencia en el horno; la microestructura es de granos equiaxiales de ferrita hierro alfa, ver fotografías 7 a 16



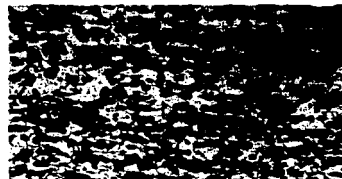
Fotografía 7. Probeta T2 1018 Corte Longitudinal 150X



Fotografía 10. Probeta T2 1018 Corte Transversal 300X



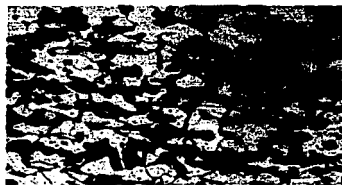
Fotografía 8. Probeta T2 1018 Corte Longitudinal 300X



Fotografía 11. Probeta de C1 1018 Corte Longitudinal 150X



Fotografía 9. Probeta T2 1018 Corte Transversal 150X



Fotografía 12. Probeta de C1 1018 Corte Longitudinal 300X



**Fotografía 13. 1045 Material de Llegada
Corte Longitudinal 150X**



**Fotografía 15. 1045 Material de Llegada
Corte Transversal 150X**

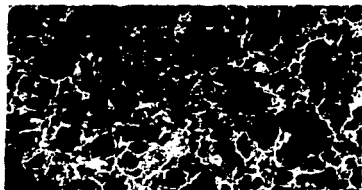


**Fotografía 14. 1045 Material de Llegada
Corte Longitudinal 300X**

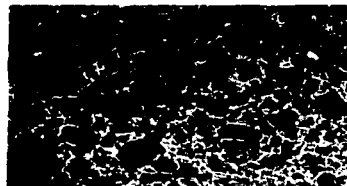


**Fotografía 16. 1045 Material de Llegada
Corte Longitudinal 300X**

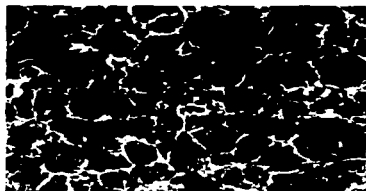
En tanto que para el acero 1045, se tienen granos de ferrita con zonas de perita y como resultado del tratamiento térmico, se observa una microestructura formada por granos de ferrita equiaxiales con el tamaño de grano ASTM 8. Ver fotografías 17 a 20



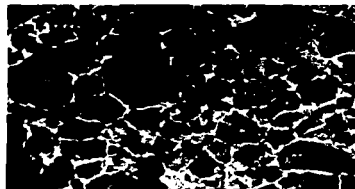
Fotografía 17. Probeta T1 1045 Corte Longitudinal 150X



Fotografía 19. Probeta T1 1045 Corte Longitudinal 300X



Fotografía 18. Probeta T1 1045 Corte Transversal 150X



Fotografía 20. Probeta T1 1045 Corte Longitudinal 300X

Para el caso del acero 4320, el tamaño de grano es ASTM 10, con granos de estructura ferrítica hierro alfa, orientados en forma homogénea, con pequeñas concentraciones de carburos en los granos, ver fotografías 21 a 24.



Fotografía 21. 4320 Material de llegada
Corte Longitudinal 150X



Fotografía 23. 4320 Con Tratamiento
Térmico de Relevado de Esfuerzos
Corte Longitudinal 300X



Fotografía 22. 4320 Material de llegada
Corte Longitudinal 300X



Fotografía 24. 4320 Material de llegada
Corte Transversal 150X

Como resultado del tratamiento térmico, el tamaño de grano mantiene su tamaño de grano de ASTM 10, aunque se observa una mejor distribución de los mismos. Ver fotografías 25 a 26.



Fotografía 25. 4320 Material de Llegada
Corte Transversal 300X



Fotografía 26. 4320 Con Tratamiento
Térmico de Relevado de Esfuerzos Corte
Transversal 300X

En consecuencia se observa que con el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos aplicado durante una hora a 800°C, las condiciones en el tamaño de grano, no sufre variación significativa, sólo se presenta una mejor distribución de granos equiaxiales. La tabla 5.11 indica estos resultados.

Después de realizada la caracterización del material, y de realizados los ensayos mecánicos para obtener los parámetros mecánicos reales, se procedió a la medición de los esfuerzos residuales en las probetas sometidas a tratamiento térmico, tanto en probetas de tensión como en probetas de compresión, de cada uno de los aceros mediante la técnica del Ruido Barkhausen utilizada por el aparato Stresscan-100. Es importante señalar que los valores obtenidos por el equipo de medición indican un Parámetro Magnetoelástico (PM), que es un número adimensional que puede ser graficado en una curva para esfuerzos residuales ya calibrada.

Para el presente trabajo, se inicia la construcción de la primer gráfica tomando como elemento de análisis al acero AISI-1018, con un esfuerzo a la cedencia de 370 MPa. Se realizaron cortes de probetas rectangulares (ver figura 4.3 de capítulo 4) tensión y compresión, las cuales son sometidas a cargas de tensión con una carga máxima del 90% del esfuerzo de cedencia del material. Se toman lecturas a intervalos de carga iguales empezando por 2KN hasta llegar al 90% del esfuerzo de cedencia del material, esto con el fin de no entrar en la zona de fluencia plástica y por consiguiente evitar una deformación plástica.

Para el acero AISI-1018 la prueba inicia con la probeta T02 sometida a carga de tensión en tres series de mediciones de 0 a 320 MPa, la cual reporta PM de 45.8 en reposo hasta 56 PM con una carga máxima de 320 MPa.

A continuación se somete la probeta T04 a la misma prueba y se encuentran valores de PM=43.6 con 0 MPa de carga hasta un valor de PM=59 con 320 MPa de carga.

La prueba termina con la probeta T05 bajo las mismas condiciones y en la cual se reportan los valores de PM=43.3 con 0 MPa de carga y un valor de PM=58.8 para una carga de 320 MPa.

En cuanto a la prueba para determinar esfuerzos residuales de compresión, se inicia con la probeta C02 con PM=29.2 para 0 MPa de carga observándose una disminución de PM= 12.9 con 240 MPa de carga a compresión.

Continúa la prueba con la probeta C03 la cual reporta un valor de PM=39.0 cuando la carga es 0 MPa y ese valor disminuye hasta PM=20.3 con los 240 MPa.

Finalmente se concluye la prueba con la probeta C04 la cual reporta un PM=36.9 cuando no existe carga, dicho valor disminuye hasta PM=12.3 con una carga de 240 MPa.

Todas las pruebas anteriores fueron realizadas a condición ambiente con un rango R=8, una magnetización M=99 y una calibración al aire C=2.5. la carga empleada para las pruebas fue del 90% σ_c P=24 KN (240 MPa)

Los valores totales se encuentran contenidos dentro de la **tabla 5.12**, las tablas que contienen los valores para cada prueba se pueden consultar dentro del anexo de tablas

PROMEDIOS TENSION					PM
CARGA (MPa)	CARGA (KN)	T2	T4	T8	PROM. GRAL.
0.0	0.0	45.8	43.6	43.3	44.2
16.7	1.2	48.7	46.5	45.4	46.9
33.4	2.4	49.6	49.5	47.4	48.8
50.1	3.6	52.8	50.8	49.6	51.1
66.8	4.8	53.9	51.4	51.5	52.3
83.5	6.0	53.8	52.1	52.6	52.9
100.2	7.2	54.4	54.2	52.8	53.8
116.9	8.4	54.5	54.2	54.6	54.4
133.6	9.6	54.2	55.2	55.3	54.9
150.4	10.8	55.3	56.2	55.9	55.8
167.1	12.0	55.6	56.1	55.9	55.8
183.8	13.2	55.2	57.2	55.9	56.1
200.5	14.4	55.1	56.3	55.4	55.6
217.2	15.6	55.0	57.2	56.3	56.2
233.9	16.8	55.4	57.6	56.1	56.4
250.6	18.0	56.0	57.8	56.2	56.7
267.3	19.2	55.7	58.1	56.7	56.8
284.0	20.4	54.8	57.9	57.1	56.6
300.7	21.6	53.7	57.1	57.7	56.2
317.4	22.8	55.6	58.7	58.7	57.7
334.112	24.0	55.9	59.2	59.4	58.2

PROMEDIOS COMPRESIÓN					PM
CARGA (MPa)	CARGA (KN)	C2	C3	C4	PROM. GRAL.
0.0	0.00	29.2	39	37	38.0
-12.0	-1.20	27.8	42	37	38.5
-24.0	-2.40	30.3	45	36	37.4
-36.0	-3.60	28.1	45	38	37.1
-48.0	-4.80	24.7	46	35	38.1
-60.0	-6.00	23.6	42	33	32.9
-72.0	-7.20	20.3	39	32	30.6
-84.0	-8.40	17.6	40	30	29.2
-96.0	-9.60	16.0	39	30	28.4
-108.0	-10.80	15.2	37	29	27.0
-120.0	-12.00	13.8	36	28	25.9
-132.0	-13.20	13.3	30	25	22.6
-144.0	-14.40	11.8	29	23	21.4
-156.0	-15.60	12.3	30	24	22.0
-168.0	-16.80	13.3	26	20	19.8
-180.0	-18.00	10.9	23	19	17.6
-192.0	-19.20	10.4	23	18	17.1
-204.0	-20.40	10.3	21	15	16.6
-216.0	-21.60	10.2	20	15	16.0
-228.0	-22.80	9.8	20	13	14.4
-240.0	-24.00	12.9	19.2	12.8	16.0

Tabla No. 5.12 Medición de parámetro magnetoelástico contra carga aplicada

Para el caso de la construcción de la segunda curva de calibración, se tomó como base de carga para la medición, el valor reportado en el análisis del acero AISI-1045, el cual tiene un esfuerzo a la cedencia de $\sigma_c=890$ MPa (58.4 KN). Dentro del $90\%\sigma_c$

La prueba inicia sometiendo a la probeta T1 a carga desde 0 MPa y con $PM=25.3$ hasta una carga de 376 MPa reportándose un $PM=74.3$, se observa un incremento en el parámetro magnetoelástico muy significativo en esta probeta casi de 3 veces el valor inicial comparado con el valor final.

Continúa el ensayo con la probeta T3 la cual tiene un $PM=24.7$ para 0 MPa de carga y $PM=44.8$ cuando la carga se incrementa hasta 376 MPa.

Finalmente la prueba concluye con el ensayo aplicado a la probeta identificada como T4 la cual presenta un $PM=22.6$ cuando no existe carga aplicada, y que se incrementa a $PM=44.3$ cuando se llega a una carga de 376 MPa.

Para el caso de la prueba a compresión se procede tomando la probeta C2 en la cual se observa un valor de $PM=35.9$ con 0 MPa de carga aplicada valor que se incrementa hasta alcanzar los 340 MPa cuando se obtiene un $PM=9.9$.

La probeta C3 reporta un valor de $PM=39.0$ con una carga de 0 MPa aplicada y decrece hasta $PM=15.9$ cuando el esfuerzo es de los 340 MPa.

Finalmente la prueba concluye cuando se analiza la probeta C4 la cual presenta un valor de $PM=36.9$ cuando no existe carga aplicada sobre ella y un valor que desciende hasta los $PM=12.8$ cuando se le aplica el máximo valor de 340 MPa.

Los resultados de dichas observaciones pueden apreciarse con detalle en las **Tablas 5.13**, los demás valores para el cálculo de esos promedios pueden consultarse en el anexo correspondiente de tablas.

PROMEDIOS TENSION					P.M
CARGA (MPa)	CARGA (KN)	T1	T3	T4	PROM. GRAL.
0.0	0	25.3	24.7	22.6	24.2
18.8	1.2	30.2	28.4	24.7	27.7
37.6	2.4	40.9	29.2	28.2	32.8
56.3	3.6	48.6	29.9	30.7	36.4
75.1	4.8	48.9	32.1	31.4	37.6
93.9	6	52.3	32.9	31.8	38.0
112.7	7.2	53.2	35.2	33.0	40.5
131.4	8.4	56.7	35.2	34.1	42.0
150.2	9.6	56.5	36.1	33.5	42.0
169.0	10.8	58.6	37.1	38.0	44.6
187.8	12	60.5	39.8	38.8	46.3
206.6	13.2	62.2	40.8	40.1	47.7
225.3	14.4	63.2	41.6	41.0	48.6
244.1	15.6	63.5	42.2	34.6	46.8
262.9	16.8	63.9	42.7	41.7	49.4
281.7	18	65.9	43.3	43.2	50.8
300.5	19.2	68.3	43.5	43.7	51.8
319.2	20.4	71.2	44.2	43.4	52.9
338.0	21.6	71.0	43.6	42.6	52.4
356.8	22.8	73.5	44.6	44.0	54.0
375.6	24	74.3	44.8	44.3	54.6

PROMEDIOS COMPRESION					
CARGA (MPa)	CARGA (KN)	C2	C3	C4	PROM. GRAL.
0	0	35.9	39.0	36.9	37.2
-13.0	-1.2	27.9	42.0	36.9	36.6
-26.1	-2.4	30.4	45.4	36.4	37.4
-39.1	-3.6	28.1	45.0	38.3	37.1
-52.2	-4.8	24.8	45.5	35.0	36.1
-65.2	-6	23.7	42.0	33.1	32.9
-78.3	-7.2	20.3	39.3	32.2	30.6
-91.3	-8.4	17.7	40.4	29.5	29.2
-104.3	-9.6	16.0	38.6	30.3	28.4
-117.4	-10.8	15.3	37.2	28.7	27.0
-130.4	-12	13.8	35.9	28.1	26.9
-143.5	-13.2	13.3	30.4	24.8	22.8
-156.5	-14.4	11.8	29.2	23.3	21.4
-169.6	-15.6	12.0	26.8	23.7	20.8
-182.6	-16.8	13.3	26.2	19.6	19.8
-195.7	-18	10.9	23.0	18.6	17.6
-208.7	-19.2	10.4	21.9	17.6	16.7
-221.7	-20.4	10.3	21.0	15.1	16.6
-234.8	-21.6	10.2	20.1	14.6	16.0
-247.8	-22.8	9.8	20.3	13.2	14.4
-260.9	-24	9.9	15.9	12.8	12.9

Tabla No. 5.13 Medición de parámetro magnetoelástico contra carga aplicada

La construcción de la tercer curva de calibración se realiza tomando en cuenta el esfuerzo de cedencia del acero AISI-4320 el cual tiene un esfuerzo de cedencia que cae dentro del rango de los 500 MPa.

La prueba inicia con la determinación de PM en estado de tensión, para ello se identifica la probeta T1 con un PM=35.5 cuando no existe una carga aplicada sobre ella, llegando hasta los PM=174 cuando la carga aplicada sobre ella es de 475 MPa, se observa un claro incremento en los niveles de PM como es de suponerse, por tratarse de una carga de tensión.

Continúa la prueba con la probeta identificada como T2 con un promedio de PM=36.4 para 0 MPa de esfuerzo aplicado, valor que cambia a PM=173.3 cuando se llega al valor máximo de 475 MPa, valor que se aproxima al calculado anteriormente.

Por último, se somete a tensión a la probeta identificada como T4 que presenta un valor de PM=40.1 cuando no existe carga aplicada sobre ella, valor que se incrementa a PM=167.3 con 475 MPa de esfuerzo calculado.

En el caso de los valores calculados cuando el material es sometido a carga de compresión se toma para iniciar, la probeta identificada como C1 con un valor de PM=101.7 cuando no hay carga aplicada sobre ella y PM=97.3 cuando la carga llega a los 380 MPa de esfuerzo aplicado.

La siguiente probeta analizada es identificada como C2 que presenta un valor de PM=95 sin carga aplicada, valor que decrece hasta alcanzar los PM=54.4 cuando se le somete a la máxima carga indicada de 380 MPa.

Finalmente la prueba concluye con el ensayo sobre la probeta C3 que presenta un PM=73.2 con 0 MPa de esfuerzo aplicado, valor que se incrementa a PM=109.6 con los 380 MPa de esfuerzo aplicado de compresión.

Los resultados de las pruebas en general para este acero se presentan dentro de las **tablas 5.14**, los resultados completos .pueden apreciarse en las tablas del anexo correspondiente

PROMEDIOS TENSION					PM
CARGA (MPa)	CARGA(KN)	T1	T2	T4	PROM. GRAL
0	0	35.5	36.4	40.1	37.3
28.0	2	56.5	51.9	48.3	52.2
55.9	4	64.1	60.5	72.5	65.7
83.9	6	88.3	75.0	88.5	84.0
111.9	8	97.2	91.5	99.9	96.2
139.8	10	114.7	100.2	115.5	110.2
167.6	12	125.3	113.5	121.1	120.0
195.7	14	132.5	119.5	130.8	127.6
223.7	16	142.4	132.4	142.5	139.1
251.7	18	153.1	135.5	150.3	146.3
279.6	20	156.6	139.6	158.8	151.7
307.6	22	162.0	145.9	162.6	156.8
335.6	24	165.6	154.6	164.2	161.5
363.5	26	173.8	155.3	168.0	165.7
391.5	28	175.3	158.5	170.9	168.3
419.4	30	178.6	162.2	172.8	171.2
447.4	32	179.9	171.1	170.9	174.0
475.4	34	173.3	173.3	167.3	171.3

PROMEDIOS COMPRESIÓN					PM
CARGA (MPa)	CARGA (KN)	PM1	PM2	PM3	PROM. GRAL
0	0	101.7	95.0	73.2	90.0
-20.9	-2	107.8	93.9	85.8	95.8
-41.8	-4	103.2	84.0	79.7	89.0
-62.6	-6	99.5	75.5	85.5	86.8
-83.5	-8	98.0	71.0	82.2	83.8
-104.4	-10	89.7	64.5	87.5	80.5
-125.3	-12	89.3	68.2	87.0	81.5
-146.1	-14	90.3	61.7	90.2	80.7
-167.0	-16	87.8	56.3	94.8	79.6
-187.9	-18	87.8	54.1	98.5	80.1
-208.8	-20	88.1	51.2	94.4	77.9
-229.7	-22	84.8	52.8	101.7	79.8
-250.5	-24	87.0	51.8	99.0	79.3
-271.4	-26	84.7	50.8	92.1	75.9
-292.3	-28	82.0	49.3	97.6	76.3
-313.2	-30	81.9	49.8	94.0	75.2
-334.1	-32	85.0	51.0	96.1	77.4
-354.9	-34	86.0	51.0	93.5	76.8
-375.8	-36	97.3	54.4	109.6	87.1

Tabla 5.14 Medición de parámetro magnetoelástico contra carga aplicada

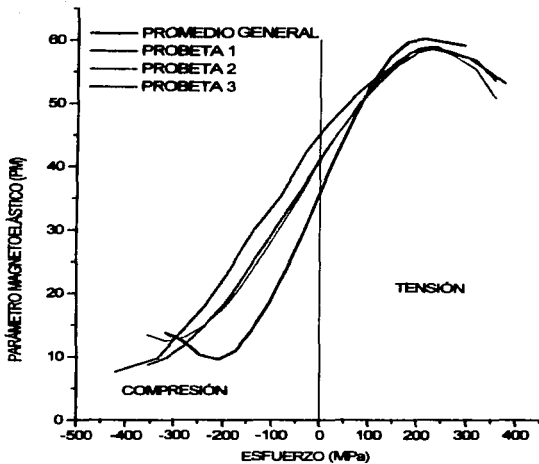
Es importante señalar que cada prueba consta de tres corridas y los valores aquí mencionados son el promedio de las observaciones realizadas a lo largo del intervalo de carga aplicada; dicho intervalo de carga, se divide en tantos puntos como precisión quiera que se tenga la curva de calibración. Para el presente trabajo, se tomaron de 18 a 24 intervalos de medición a lo largo del esfuerzo de cedencia del material en cuestión y sobre de ella se determino el valor de PM correspondiente tanto de tensión como de compresión.

Como se observa en cada una de las pruebas, los valores de PM en compresión decrecen en relación con la carga aplicada, situación contraria a la presentada en los ensayos de tensión, que como se observa cuando la carga aplicada es de tensión, los valores de PM se incrementan.

Tomando en consideración los resultados anteriores, se procede a la construcción de las curvas de calibración Parámetro Magnetoelástico contra Esfuerzo aplicado (PM vs Esfuerzo), colocando los valores del Parámetro Magnetoelástico (PM) sobre el eje vertical, mientras que el valor del esfuerzo aplicado es asentado sobre el eje horizontal, la intersección de abscisas y ordenadas define puntos que van determinando una curva a la izquierda y a la derecha del origen de los esfuerzos y hacia arriba y debajo del origen del PM calculado que es conocido como curva de calibración.

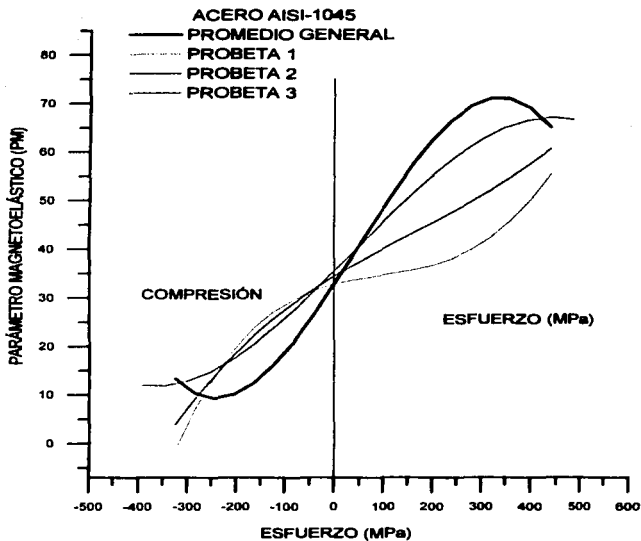
El proceso se repite en cada uno de los aceros analizados en este trabajo, lográndose la construcción de las curvas mostradas en las gráficas mostradas a continuación:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



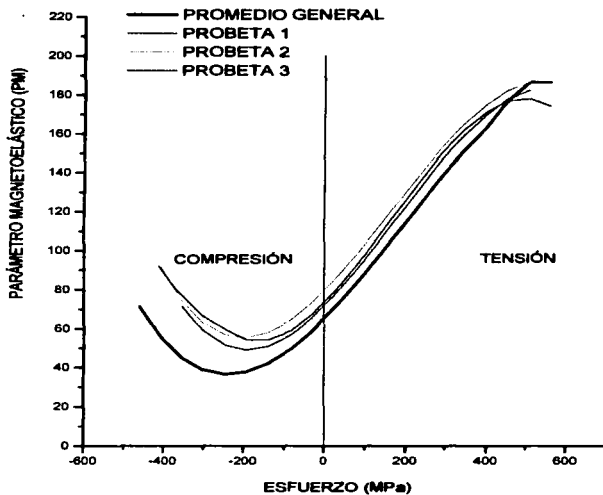
Gráfica 4
 Curvas calibradas para Esfuerzos Residuales
 curvas calibradas para acero con esfuerzo a la cedencia de 93Ksi (360MPa)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



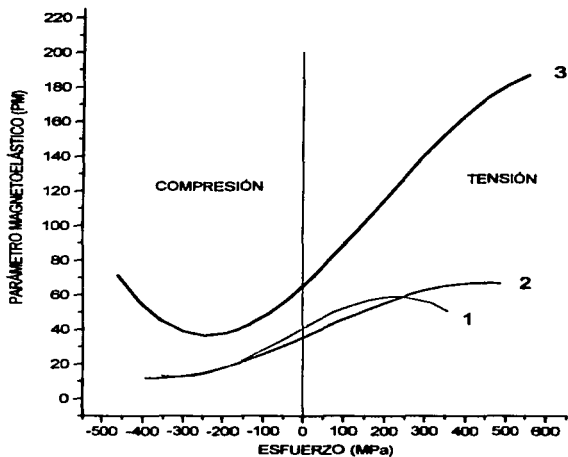
Gráfica 5
Curvas calibradas para acero con esfuerzo a la cedencia de 231Ksi (900MPa)

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**



Gráfica 6
Curvas calibradas para Esfuerzos Residuales
curvas calibradas para acero con esfuerzo a la cedencia de 2061Ksi (800MPa)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



Gráfica Final.

Curvas calibradas para Esfuerzos Residuales en aceros con esfuerzo a la cedencia de

(1) 93Ksi (360MPa)

(2) 231Ksi (900 MPa)

(3) 260.1Ksi (800 MPa)

TESIS CON
FALLA DE OPIEN

CONCLUSIONES

Una vez concluido el análisis de las observaciones realizadas en el apartado anterior, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Los esfuerzos residuales están presentes dentro del material analizado, bien sea por el proceso de deformación mecánica o como resultado del tratamiento térmico aplicado.

La naturaleza de los esfuerzos residuales existentes en las probetas analizadas depende de la carga aplicada sobre ellas ya sea de compresión o de tensión y en este caso la carga no excede del valor del esfuerzo de cedencia del material que es del 90% σ_c .

El tamaño de grano es un factor primordial para el incremento o disminución de la concentración de ER, ya que para un tamaño de grano de ASTM-8 se observa un PM=25, cuando no existe carga aplicada sobre la muestra, mismo que se incrementa hasta los 60 de PM como máximo. Mientras que para un tamaño de grano menor ASTM-10 el valor se incrementa hasta los 170 de PM en el valor máximo de carga, estos valores corresponden a la parte de tensión.

Situación similar se presenta con los valores calculados de PM en compresión que en tamaño de grano ASTM-8 es de 15 PM y 90 PM para tamaño de grano ASTM igual a 10.

Factores como el tamaño de grano, acabado y tratamiento térmico del material y por consiguiente los esfuerzos de cedencia determinan la naturaleza y comportamiento de la curva trazada parámetro magnetoelástico(PM)-esfuerzo(σ_c).

Los esfuerzos determinados por este método, son aproximados, ya que no existe una unificación en cuanto a la determinación de los mismos, por tratarse de una técnica aun en desarrollo; sin embargo, son aceptables en la industria como método no destructivo de detección de posibles fallas en componentes mecánicos.

Como se mencionó al inicio de este trabajo, el conocimiento y la determinación de los esfuerzos residuales en materiales ferromagnéticos es de gran interés técnico, ya que su conocimiento puede determinar el funcionamiento de componentes mecánicos y equipos industriales.

Debe quedar claro que los esfuerzos residuales no son totalmente perjudiciales, ya que por ejemplo en el caso de los esfuerzos residuales de compresión son beneficios en tuberías a alta presión. Esto es porque los esfuerzos de compresión inducidos en el interior de la tubería son contrarrestados por los esfuerzos de tensión originados por el flujo en su interior.

GLOSARIO

Acero Aleaciones con base hierro, por lo común contienen carbono. En la práctica todo el carbono puede estar disuelto por algún tratamiento térmico en una proporción que oscila entre el 0.03 y el 2 %. Los aceros especiales contienen además pequeñas proporciones de cromo, níquel, titanio, volframio, etc., con el fin de mejorar su dureza, maleabilidad u otras propiedades. El acero se usa como elemento estructural en las obras de ingeniería civil, en la fabricación de railes, barcos, cañones, máquinas herramientas, etc.

Allotropía Propiedad de algunos elementos químicos de presentarse en dos o más formas distintas, llamadas alotrópicas, en un mismo estado físico.

Anisotropía Propiedad de algunos cuerpos por la cual determinadas propiedades físicas varían según la dirección en que se consideren. Las propiedades de los cristales simples muestran valores diferentes si se miden en direcciones distintas; con respecto a los ejes del cristal, pero son invariables cuando se miden en sentidos cristalográficamente similares. La anisotropía se aplica a propiedades mecánicas, físicas y químicas, tales como la resistencia estructural, la resistencia eléctrica, la conductividad térmica y la actividad química. Son anisótropas casi todas las sustancias cristalinas.

Austenita Fase CCCa rica en hierro

Carburo Combinaciones entre el carbono y otro elemento más electropositivo que él. Se pueden agrupar en cuatro tipos: salinos, intersticiales, covalentes y de la serie del hierro.

Carburación Proceso de endurecer un acero por la difusión de carbono en la superficie.

Cementita (Fe_3C) Compuesto de hierro y carbono conocido como carburo de hierro con estructura cristalina ortorrómbica.

Crecimiento de grano Aumento en promedio del tamaño de grano por difusión de átomos que cruzan los límites de grano (o fase).

Cristal Un sólido uniforme estructuralmente en tres dimensiones, con un intervalo grande de repetición de átomos.

Cristalización Proceso físico por el cual un cuerpo adquiere la estructura cristalina. Puede realizarse por sublimación, por fusión y posterior enfriamiento de la masa fundida o por evaporación gradual del disolvente en una disolución saturada. Es un método de purificación de sustancias, que se basa en la variación que experimenta la solubilidad con la temperatura.

Deformación Cambio de la forma o dimensión de un cuerpo producida por la aplicación de un esfuerzo

Deformación Elástica Deformación reversible sin desplazamientos atómicos (o moleculares) permanentes.

Deformación Plástica deformación permanente originada por los desplazamientos de átomos (o moléculas) a nuevos lugares de la red.

Dipolo Eléctrico polaridad con un extremo cargado positivamente y el otro negativamente. El momento del dipolo, M , es el producto de la carga y la distancia d entre los centros de cargas opuestas.

Ductilidad Deformación permanente antes de la fractura; se mide por el alargamiento o la reducción del área de la sección transversal.

Dureza Resistencia a la penetración.

Elasticidad Propiedad de los cuerpos de recuperar su forma original cuando dejan de actuar las fuerzas que los han deformado.

Esfuerzo Fuerza por unidad de área, puede ser normal o paralelo al plano de aplicación; llamado esfuerzo Normal y esfuerzo Cortante.

Esfuerzo Residual Estados de tensión o compresión que permanecen en piezas aún después de la fabricación, deformación, soldadura, maquinado, tratamiento térmico u operación en servicio.

Fase Parte físicamente homogénea de un sistema de materiales.

Ferrita Fase CCCu rica en hierro, estable a temperaturas inferiores a 900°C ; aparece en forma de poliedros en el análisis micrográfico de las aleaciones hierro-carbono. En algunos diagramas de equilibrio hay dos regiones ferríticas, separadas por un área austenítica, la parte inferior es ferrita alfa, y la superior es ferrita delta.

Fluencia Deformación lenta que experimenta un metal sometido a una carga permanente.

Fragilidad Calidad de un material que da lugar a la propagación de fisuras sin la deformación plástica.

Granallado Método para mejorar la resistencia a la fatiga del metal dejando esfuerzos de compresión en la superficie proyectando un chorro de granalla sobre la pieza metálica para limpiarla o aumentar su resistencia.

Grano Cristal individual dentro de un material

Isotropía Calidad de los cuerpos o medios cuyas propiedades son independientes de las direcciones que se consideren en los mismos.

Límite de grano Zona cristalina entre granos adyacentes

Límite Elástico Primera deformación plástica debido a un esfuerzo.

Límite de fluencia Es aquella carga que soporta el material sin romperse durante un tiempo definido.

Martensita Fase metaestable, centrada en el cuerpo, del hierro supersaturado con carbono; producido a partir de la austenita por una transformación por deformación durante el templeado.

Macroestructura Estructura de metales relevada por un examen de la superficie atacada químicamente de una muestra pulida a una amplificación que no exceda de los diez diámetros

Metal Elemento químico caracterizado por su brillo peculiar, por dar cationes en disolución, por formar óxidos e hidróxidos de carácter básico y por actuar sólo como reductor. Los metales poseen pocos electrones en su último nivel ocupado, son poco electronegativos y su potencial de ionización es bajo. Son conductores del calor y la electricidad, y la mayoría son sólidos, dúctiles y maleables. Los no metales poseen, relativamente, electronegatividades y potenciales de ionización elevados y tienden a captar electrones. Pueden ser gaseosos (flúor, oxígeno, cloro, nitrógeno, hidrógeno), líquidos (bromo) o sólidos (yodo, azufre, selenio, fósforo, carbono).

Metalografía Ciencia que trata del estudio de la estructura de los metales y aleaciones mediante la utilización del microscopio.

Microestructura Estructura detallada de un sólido, generalmente un mineral o un metal, en que se aprecian sus componentes y fuerzas tensionales.

Módulo de elasticidad Medida de la rigidez de un metal; razón del esfuerzo dentro del límite proporcional a una deformación correspondiente.

Normalización Calentamiento del acero a 1000 °F en el intervalo de la austenita para que ésta pueda ser homogeneizada

Número de tamaño de grano Índice de granos por unidad de área estándar en una sección de 2 dimensiones en un sólido

Pperlita Una microestructura de ferrita más un carburo laminar formado a partir de la austenita de composición eutectoide.

Policristalino Materiales con más de un cristal; por lo tanto con límite de grano.

Red cristalina Arreglo especial de sitios equivalentes dentro de un cristal.

Reducción de área Medida de la deformación plástica en el punto de fractura.

Relajación de esfuerzo Descenso de esfuerzo con deformación constante debido al reacondicionamiento molecular.

Resiliencia Cantidad de energía liberada por unidad de volumen, al remover la carga. Capacidad de un metal, en virtud de la alta resistencia a la cedencia y al bajo módulo elástico, para exhibir considerable recuperación elástica al liberar la carga aplicada.

Resistencia es la capacidad del metal de oponerse a su deformación o ruptura.

Resistencia última Máximo esfuerzo convencional tensil, compresivo o de corte que un material puede soportar.

Resistencia a la tensión carga máxima por unidad de área original. Esta es la resistencia final, última, utilizada para diseño.

Stresscan-100 Equipo de medición de esfuerzos residuales, mediante el empleo del método metalográfico basado en el Ruido Barkhausen.

Temperatura de recristalización Temperatura a la cual la recristalización es espontánea, normalmente de un tercio medio de la temperatura absoluta de fundición.

Temperatura de transición Temperatura en la cual la fractura dúctil cambia a fractura frágil.

Tenacidad Capacidad de un metal para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse.

Termofluencia Deformación lenta debida a esfuerzos por debajo del punto de cedencia normal (por lo común ocurre a altas temperaturas).

Tratamientos térmicos Los tratamientos térmicos posteriores a los que se somete el acero tienen como finalidad modificar las propiedades mecánicas del metal por un cambio adecuado de su estructura metalúrgica. Los principales tipos de tratamiento térmico son:

a) **Normalización.** Consiste en calentar el acero unos 50 °C por encima de su temperatura de transformación y dejarlo enfriar lentamente, con lo que se mejora su tenacidad.

b) **Temple.** Se consigue calentando el acero hasta una temperatura de 780 a 880 °C y enfriándolo después rápidamente en agua, aceite, etc. El acero así tratado es duro y flexible.

c) **Revenido.** Después de dar temple al acero se le calienta a unos 200 °C, con lo que se eliminan tensiones internas y se aumenta su tenacidad y ductilidad.

d) **Nitruración.** Se consigue manteniendo los aceros aleados con cromo, aluminio, manganeso o vanadio en una atmósfera de nitrógeno durante unas 50 horas a 500 °C. Proporciona piezas libres de tensiones internas, con gran dureza superficial y resistentes a la corrosión.

e) **Cementación.** Consiste en recocer el acero a unos 900 °C en un medio carburante (polvo de cementar), templándolo después en agua o aceite. Con este tratamiento se obtienen piezas de superficie dura y núcleo tenaz.