



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**INFLUENCIA DE PRECARGAS
EN EL MÓDULO DE YOUNG
DEL ACERO 1112**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A :

JOSÉ LUIS SOSA REYES



MÉXICO, D.F.

2007



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.

DOY GRACIAS A DIOS POR HABERME GUIADO Y DARME FUERZAS PARA
SALIR ADELANTE ANTE LA ADVERSIDAD

Dedico este trabajo a:

Mi madre Q.E.P.D., por haberme inculcado la fuerza y valor. Por el amor, apoyo y consejos que siempre me diste.

Miriam por su gran amor, apoyo y comprensión. Por estar conmigo sin importar lo difícil de la situación.

Miriam Itzel por llenar de luz mi vida con su sonrisa por su amor y todo su apoyo.

Mi hermano Arturo, por compartir noches de desvelo durante mis estudios.

Mi hermana Amalia por su apoyo y sus consejos.

La señora Graciela Raymudo por su apoyo y comprensión.

Nelly, Abraham y Graciela por el apoyo que me han brindado.

Edgar Ibarra y Gerardo Arriaga por su amistad

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi asesora, la profesora Teresita del Niño Jesús Robert Núñez, por sus consejos, su paciencia, dedicación y enseñanza que me brindó durante el desarrollo de este trabajo.

Por su apoyo incondicional en estos momentos de prueba.

Agradezco también a la profesora Teresa Unda Carbott, Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales, por su determinación y todas las facilidades que me brindó para lograr este objetivo.

A Bob (Robert Johnson), no existen palabras para agradecerte tu apoyo.

A Jahir Bautista por su tiempo y apoyo.

A los Drs. C. Lázaro Pino Rivero y Silvio Díaz Rojas, de la Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, por su apoyo en la parte estadística de esta tesis.

A las autoridades del R.P.O.:

Agradezco al Lic. Engels Lopez Barrios, Lic Alejandro Escorsa Arredondo y Lic Hildardo Huerta Castañeda, por todo el apoyo brindado a un servidor y a mi familia para lograr esta meta.

Estoy en manos de Dios desconocido y él me está infringiendo su propio olvido, para llevarme luego a un nuevo amanecer, a ser un hombre nuevo.

Un hombre dedicó gran parte de su vida a ganar dinero para financiar un hogar al lado de su mujer y el fruto de su amor que son sus hijos, pero no podemos pensar en su entrega cuando está fuera de casa.

ÍNDICE

RESUMEN	7
OBJETIVOS	8
 <i>CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</i>	
1.1. Introducción	9
1.2. Diagramas esfuerzo-deformación	11
1.2.1 Diagramas esfuerzo-deformación ingenieril o convencional	12
1.2.2 Diagrama esfuerzo-deformación real	13
1.2.3 Diagrama de cargas y descargas sucesivas	14
1.2.4 Energía de deformación o Resiliencia	15
1.3. Ensayo de compresión	16
1.3.1 Características	16
1.3.2. Probetas de compresión	17
1.3.2.1. Cilíndricas	17
1.3.2.2. Otras geometrías	19
1.4. Comparación del ensayo de tracción y compresión	21
1.5. Módulo de Young o Módulo elástico	23
1.5.1. Cálculo del módulo de Young	25
1.5.2. Rigidez de la máquina de prueba	27
 <i>CAPÍTULO 2. DISEÑO EXPERIMENTAL</i>	
2.1. Tipos de diseños	28
2.2. Diseño factorial	28
 <i>CAPÍTULO 3. EXPERIMENTACIÓN</i>	
3.1. Material	
3.1.1. Composición	31
3.1.2. Metalografía	32

3.2. Probetas de compresión y de tracción	33
3.2.1. Cilindros de compresión	33
3.2.2. Probeta de tracción	34
3.3. Deformación	34
3.3.1. Equipo de deformación	34
3.3.2. Placas compresoras	35
3.4. Desarrollo	36
3.5. Diseño experimental	36
<i>CAPÍTULO 4.</i>	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
<i>CAPÍTULO 5.</i>	
CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	51
APÉNDICE I. FRICCIÓN	53

RESUMEN

En la actualidad, la necesidad creciente de fabricar materiales para diferentes usos, con características que nos permitan un mejor funcionamiento y resistencia al ser sometidos a diferentes esfuerzos y medios, sin perder sus propiedades mecánicas -como la resistencia a la deformación, el límite elástico, la plasticidad, etc.- ha obligado a desarrollar una serie de investigaciones donde el objetivo principal es el conocimiento de dichas propiedades.

Uno de los ensayos para el estudio de los materiales es el de compresión. Con esta prueba se determina la deformación producida al aplicar un esfuerzo compresivo a una probeta. La representación matemática de dicho comportamiento permite predecir la actuación del material, ya sea en piezas terminadas o durante su manufactura o en el conformado del material para su producción. Utilizando esta prueba, en combinación con otros tipos de ensayos, se determinan las características de los materiales acordes con las necesidades de cada uso u aplicación.

Para obtener valores confiables en las pruebas mecánicas de compresión y tracción es imprescindible utilizar un extensómetro que indica, exclusivamente, la deformación sufrida por la probeta. En caso de no contar con este instrumento, los valores de desplazamiento obtenidos están afectados por la deformación de todo el sistema de prueba.

En la norma ASTM E-111-04 se indica que las mediciones deberán hacerse desde una precarga, lo suficientemente alta para minimizar los efectos de curvatura de las muestras, alineación inicial de las mordazas, etc., que introducen errores significativos en los valores del extensómetro cuando se aplica una pequeña carga a la muestra a probar.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de un acero AISI 1112 en ensayos de tracción (con extensómetro) y de compresión (sin extensómetro) en probetas con distintas geometrías (relaciones de altura/diámetro $H/D = 0.5, 1.0, 1.5$ y 2.0) con diferentes niveles y número de precargas. Se mantienen los mismos acabados superficiales tanto en las probetas como en las placas compresoras para mantener constante el coeficiente de fricción en todos los ensayos. El valor del módulo elástico real se obtuvo mediante la prueba de tracción.

La finalidad de este trabajo de investigación es determinar la influencia de la aplicación de precargas y de probetas de diferentes geometrías H/D en el módulo de Young, obtenido por compresión, del acero 1112.

Se obtiene la ecuación que representa la influencia de la relación de aspecto y del número y nivel de precargas en el módulo elástico aparente (sin extensómetro). Se concluye que la relación de aspecto influye más que las precargas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Establecer la influencia del número y nivel de precargas y de la relación de aspecto de las probetas en el módulo elástico aparente obtenido por pruebas de compresión. Se denomina aparente porque se determina sin extensómetro y está afectado por la rigidez del sistema de prueba.

Objetivos particulares

Analizar las normas ASTM referentes a la determinación del Módulo de Young o módulo elástico, tanto en tracción como en compresión.

Investigar bibliográficamente los factores que afectan la realización del ensayo de compresión.

Establecer un diseño estadístico para el trabajo experimental, considerando como variables de entrada el porcentaje de deformación y la relación de aspecto de las probetas y como variable de salida el valor del Módulo elástico.

Representar gráficamente el comportamiento esfuerzo-deformación de probetas de diferente relación H/D.

Mostrar gráficamente la influencia de las precargas en el módulo elástico aparente (obtenido sin extensómetro).

Obtener los modelos matemáticos que representan los comportamientos anteriores.

Calcular estadísticamente la ecuación que considera la influencia conjunta de la relación de aspecto y de las precargas en el módulo de Young.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos el hombre ha tenido la necesidad de generar herramientas para lograr su desarrollo tecnológico e industrial, donde los materiales metálicos han jugado un valioso papel constituyendo una parte fundamental en la industria de la construcción, maquinaria y motores, navegación, etc. Sin embargo, para lograr la obtención de un material metálico útil se requieren diferentes procesos, desde la búsqueda del yacimiento minero, la extracción y refinación de los minerales, hasta los procesos alternos de manufactura, conformado y acabado, que se encargarán de darle al material las formas, dimensiones y calidad superficial requeridas para cada utilidad.

El ensaye mecánico es el medio de medición de las propiedades mecánicas que presentan los distintos materiales para: determinar su calidad, identificar fallas o defectos, asegurar su funcionamiento en ciertas condiciones específicas, sustituirlos por otros, seleccionar el más adecuado en una aplicación dada, etc. Para esto, se involucran la aplicación de las fuerzas y el cambio de longitud de la muestra a deformar, las cuales se convierten en términos de esfuerzos-deformación por medio de las consideraciones de la geometría de la probeta. Dentro de las condiciones en las que los materiales deben comportarse en servicio, es necesario realizar cierto tipo y número de ensayos para garantizar su desempeño. [1-7].

Las condiciones en las que la carga es aplicada determinan el ensayo mecánico adecuado a las características que se desea saber del material en cuestión; hay tres factores involucrados en la selección:

1. El tipo de esfuerzo inducido.
2. La velocidad a la cual se aplica la carga.
3. El número de veces que la carga se aplica. [1-7]

Las características que presenta un material dúctil están dadas por una relación entre el grado de deformación y la carga aplicada por unidad de área, obteniéndose así gráficas esfuerzo-deformación.

La velocidad de aplicación de la carga es fundamental, ya que si la carga es aplicada con rapidez, de modo que el factor tiempo quede involucrado, los ensayos se denominan dinámicos; pero si la carga es aplicada por medio de un golpe, se le conoce como un ensayo de impacto. Por otro lado, si la carga es mantenida por un periodo largo, digamos meses y aun años, el ensayo es llamado de larga duración o creep [1-7].

Los esfuerzos de tracción, compresión o cortantes son provocados por fuerzas concentradas, donde las líneas de acción cruzan el centro de gravedad de la superficie sobre

el cual se considera al esfuerzo, distribuido en el área de su sección transversal, Figura 1.1 [1].

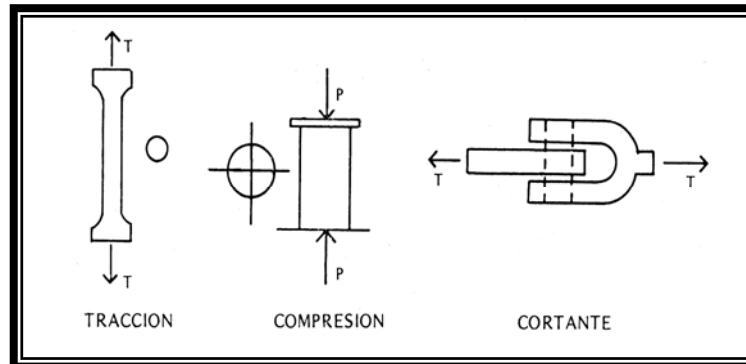


Fig. 1.1. Líneas de acción que cruzan el centro de gravedad de la superficie. [1]

Los materiales están formados por átomos, entre las cuales actúan fuerzas interatómicas que se oponen a los cambios de forma que sufren los materiales al someterse a fuerzas exteriores. Estas últimas fuerzas, cuando se aplican a un material, producen una deformación elástica o plástica.

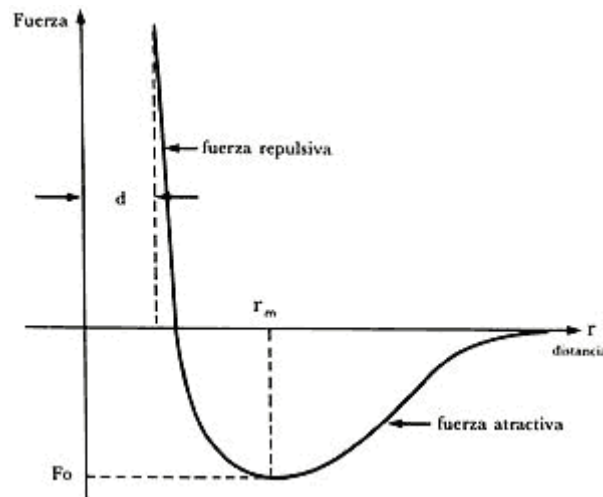


Fig. 1. 2. Esquema de la energía interatómica. [8]

En la Figura 1.2 se presenta un esquema de Energía de enlace vs. Separación interatómica [8]. La distancia interatómica en equilibrio es la que se presenta cuando la curva cruza el eje de la energía, Fuerza = 0. La línea recta, por arriba y abajo del punto mencionado, corresponde a la zona de deformación elástica, que es donde la energía interatómica mantiene los enlaces entre los átomos, en un rango de alargamiento o reducción. Microscópicamente, esta zona corresponde a la zona elástica, donde se permite una cierta deformación tensil o compresiva, sin que se rompa ningún enlace. La relación entre la fuerza aplicada y esa deformación corresponde al Módulo de Young o módulo elástico y está estipulada por la norma ASTM E111. [9]

Cuando se rompen los enlaces interatómicos se presenta la deformación plástica, que es permanente. La Figura 1.3 muestra una estructura cristalina: a) sin deformar y b) deformada. En la primera, la red cristalina está sin deformar y en la última se observan los planos atómicos que han roto los enlaces interatómicos originales y creados nuevos, generando así una pieza deformada, de geometría diferente a la original. Estos átomos no retornan a su posición original al retirar los esfuerzos cortantes aplicados, por lo que se considera a la deformación plástica como irreversible y permanente. Si se aplica una nueva carga, mayor que la anterior, se produce una nueva deformación interatómica. [2]

La deformación plástica depende del número de planos y direcciones de deslizamiento involucrados los que, a su vez, dependen del arreglo atómico que la estructura del material presente. También influyen la orientación de los cristales y la intensidad de los esfuerzos cortantes aplicados, como se muestra en la Figura 1.3 b). [1-7]

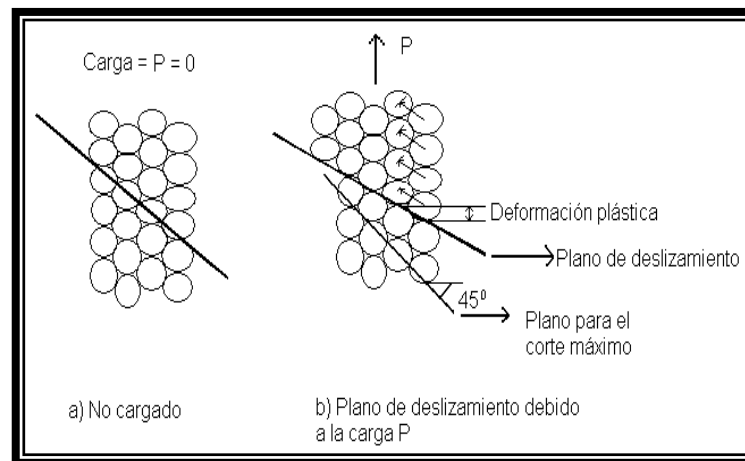


Fig. 1.3. Deformación plástica y plano de deslizamiento. [2]

1.2. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN [1-7]

La determinación de las propiedades de los materiales usuales en ingeniería se efectúa mediante pruebas sobre muestras pequeñas de los mismos. Cada diagrama esfuerzo-deformación es característico del material y proporciona información importante acerca de las propiedades mecánicas y del comportamiento típico del material; como límite elástico, resistencia última (en el caso de tracción), Módulo de Young, etc. Se pueden obtener los modelos matemáticos que representan el comportamiento del material en estudio, tanto en la región elástica como plástica, esto es, la respuesta del material a la aplicación de una fuerza. De los datos fuerza-alargamiento o contracción arrojadas por ensayos de tracción o compresión es posible trazar los diagramas esfuerzo-deformación ingenieril y/o real correspondiente de los materiales ensayados.

Los diagramas esfuerzo-deformación fueron creados por Jacobo Bernoulli (1654-1705) y J.V. Poncelet (1788-1867) [1].

1.2.1. Diagramas esfuerzo-deformación ingenieril o convencional.

El esfuerzo ingenieril o nominal, σ , se obtiene dividiendo la fuerza aplicada, F , entre el área original, A_o , de la sección transversal del espécimen, Ec. 1.1,

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (1.1)$$

La deformación unitaria ingenieril o nominal o unitaria e , se obtiene de la lectura del cambio (incremento o decremento, según la prueba realizada) de la longitud calibrada, ΔL , dividido entre la longitud inicial calibrada, L_o , del espécimen original. L_f es la longitud final, Ec. 1.2:

$$e = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (1.2)$$

Estos diagramas son característicos de cada material en ciertas condiciones, como lo muestra la Figura 1.4, dado que los resultados dependen de la composición química, de la microestructura, de la manera en que se fabricó el material, del régimen de carga, de la temperatura durante la prueba, etc.

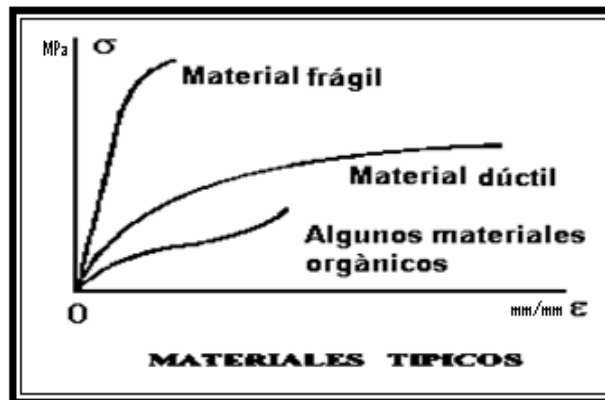


Fig. 1.4. Diagrama esfuerzo-deformación en tracción de diversos materiales. En [12].

Los diagramas esfuerzo-deformación presentan varios puntos importantes, como se indican en la Figura 1.5. En una primera instancia estos diagramas se dividen en dos partes: la zona elástica y la zona plástica.

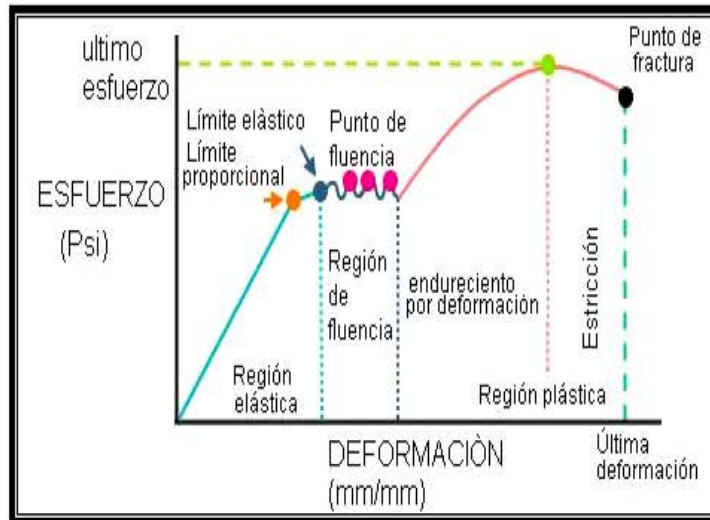


Fig. 1.5. Esquema del comportamiento esfuerzo deformación en tracción, de aceros de bajo carbono. [6]

- Zona elástica. Todos los materiales al ser sometidos a un esfuerzo sufren una deformación elástica; es decir, una modificación en sus dimensiones mientras la carga se conserve sobre el material, al retirar la carga aplicada el material recobra sus dimensiones originales. En el diagrama se observa una línea recta con una pendiente que es característica de cada material.
- Esfuerzo de fluencia: es el límite de la deformación elástica, a partir de este punto se presenta deformación plástica. En la Figura 1.5 se representa la zona típica de fluencia de un acero de bajo carbono.
- Zona plástica. Se dice que todo material sufre una deformación plástica cuando es sometido a un esfuerzo mayor del de la zona elástica; al retirar dicho esfuerzo el material pierde sus dimensiones y forma inicial.

- En las pruebas de tracción [11]:

- Resistencia a la tracción o último esfuerzo: es el punto de máxima aplicación de la carga, a partir de este punto inicia la estricción localizada o formación de cuello de la probeta.
- Porcentaje de deformación: es la diferencia entre la longitud inicial y final dividida entre la longitud inicial de la probeta.

1.2.2. Diagramas esfuerzo-deformación real.

Se forman utilizando el área instantánea de la sección transversal y la longitud real o instantánea de la probeta en el momento en que la carga se esta aplicando, Ecs. 1.3 y 1.4.

$$\text{Esfuerzo real} = \bar{\sigma} = \frac{F}{A} \quad (1.3)$$

$$\text{Deformación real} = \varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (1.4)$$

F = fuerza aplicada

A = área instantánea en el momento de aplicar la carga

L = longitud instantánea de la probeta al aplicar la carga

L₀ = longitud inicial de la probeta.

Los diagramas esfuerzo-deformación ingenieril o nominal y el real no presentan desigualdad alguna cuando la deformación unitaria es pequeña, o sea en la zona elástica, pero en la zona correspondiente a la deformación plástica (endurecimiento por deformación) si hay diferencias.

1.2.3. Diagramas de carga y descarga sucesiva.

Al descargar la fuerza en la zona plástica el material presenta recuperación elástica, lo cual implica que al descargar la fuerza el material permanece exclusivamente con la deformación plástica.

En la Fig. 1.6 el material se carga hasta el punto E y posteriormente hasta el punto B, en ambos puntos hay deformación elástica mas plástica (indicada por los puntos OCD), pero al retirar la carga el material recupera la deformación elástica, indicada por la línea CD, esta recuperación es paralela a la zona elástica inicial. La deformación permanente es plástica, OC.

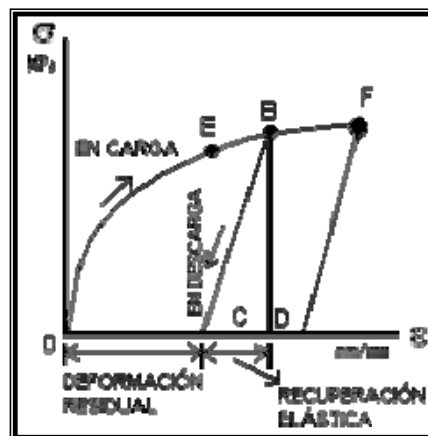


Fig. 1.6. Diagramas de carga y descarga.
Gere & Timoshenko, 1984. [3]

Si aplicamos una nueva carga, superior a la anterior, más allá del punto B se continúa la curva original. Al descargarse en F el material restaura la deformación elástica, mostrando únicamente la deformación permanente, Fig.1.6. Para continuar deformando, se observa

que el punto al cual el material comienza a fluir se va incrementando, esto es, presenta un mayor punto de fluencia, producido por el endurecimiento por deformación, así como también una mayor zona elástica que en el estado original antes de aplicar la carga. [3] Siempre se presenta esto al deformar a un metal en la zona plástica.

1.2.4. Energía de deformación, resiliencia.

Cuando una probeta es sometida a un esfuerzo uniaxial, la energía de deformación por unidad de volumen se expresa como:

$$\Delta U = \left(\frac{1}{2} \Delta F \right) \varepsilon \Delta Z = \left(\frac{1}{2} \sigma \Delta X \Delta Y \right) \varepsilon \Delta Z \quad (1.5)$$

puesto que el volumen del elemento es $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$, la ecuación queda

$$\Delta U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \Delta Z \quad (1.6)$$

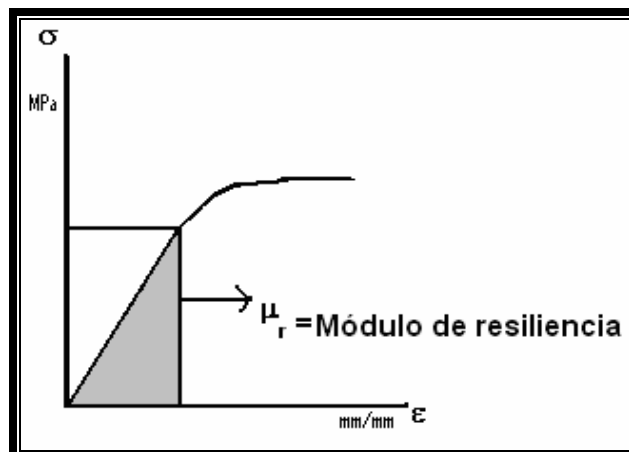
reescribiendo la ecuación en términos del volumen, se obtiene μ (Módulo de resiliencia):

$$\mu = \frac{\Delta U}{\Delta V} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (1.7)$$

Si el comportamiento del material es elástico-lineal, se aplica la ley de Hooke, Ec 4. La energía de deformación elástica es conocida como módulo de resiliencia, que indica la habilidad de un material para absorber energía sin deformación permanente.

$$\mu = \int_{e_0}^e \sigma de = \int_{e_0}^e Ee de = E \int_{e_0}^e e de = \left[\frac{Ee^2}{2} \right]_{e_0}^e \quad (1.8)$$

El área bajo la curva σ - ε , en la zona elástica desde el inicio de la deformación hasta la zona elástica. [6]



1.3. ENSAYO DE COMPRESIÓN

1.3.1. Características

Este tipo de pruebas se utilizan para ensayar materiales frágiles, como es el caso de piedras, hormigón, concretos y fundiciones ferrosas; también es muy utilizado para metales no ferrosos.

La norma ASTM E9-89a (Reaprobada en 2000) [11] establece los métodos para efectuar la prueba de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente. Consiste en aplicar una carga a una probeta, generalmente cilíndrica, en la dirección de su eje longitudinal, que tiende a provocar un acortamiento de longitud, cuyo valor se irá incrementando hasta la rotura o suspensión del ensayo.

Existen varias limitaciones especiales del ensayo de compresión. [11],

1. La dificultad de aplicar una carga verdaderamente concéntrica o axial.
2. La presencia de un esfuerzo de flexión al aplicar la carga y el efecto de irregularidades accidentales al colocar la probeta entre los discos compresoras.
3. La fricción entre los puentes de la máquina de ensaye, los discos de apoyo y las superficies de los extremos de la probeta debido a la expansión lateral de ésta.
4. Las áreas de las secciones planas de las probetas ensayadas deben corresponder a la capacidad de la maquina para poder obtener mediciones de deformaciones de precisión adecuada.
5. Los extremos de las probetas de compresión deben de ser maquinadas en tornos, las caras de los extremos deben permanecer planas y en ángulo recto con el eje para no producir concentraciones de esfuerzos.
6. Se recomienda que los extremos de las caras de la probeta y los bloques o placas de apoyo se limpien con acetona o cualquier otro solvente para evitar la presencia de aceite o impurezas que puedan influir en la restricción debida a la fricción de las superficies extremas.

1.3.2. Probetas de compresión

Pueden ser cilíndricas o de diferentes formas.

1.3.2.1. Cilíndricas. Generalmente son las más utilizadas, se produce fricción entre la probeta y las placas compresoras. Las probetas no deben presentar longitudes extremadamente grandes con relación al diámetro porque se presentaría una flexión, produciendo una distribución no uniforme del esfuerzo sobre la sección recta.

La norma ASTM-E9-89a [11] divide a las probetas de acuerdo a su longitud, Fig. 1.8:

- Probetas de longitud cortas. Se usan con metales antifricción.
- Probetas de longitud medianas. Para uso general.
- Probetas de longitud larga. Son usadas para determinar el módulo de elasticidad.

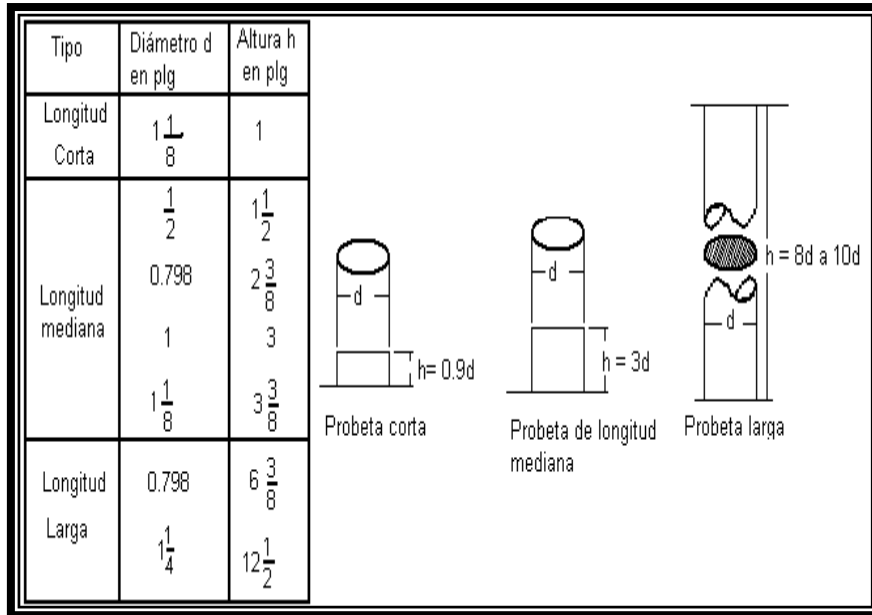


Fig. 1.8. Dimensiones de las probetas sugeridas por la norma ASTM E-9. [11]

En los materiales dúctiles ensayados en compresión, como el acero de bajo carbono, aluminio y algunas de sus aleaciones, la relación altura/diámetro (H/D) es de una o más veces, rara vez se produce rotura y los cilindros comprimidos presentan una expansión lateral que toma la forma de un disco al término de la prueba, Figura 1.9. A medida que la longitud de la probeta disminuye se incrementa el área sobre la cual se está aplicando la fuerza y el efecto de la fricción en los extremos aumenta; estos aspectos elevan considerablemente el esfuerzo requerido para deformarla.

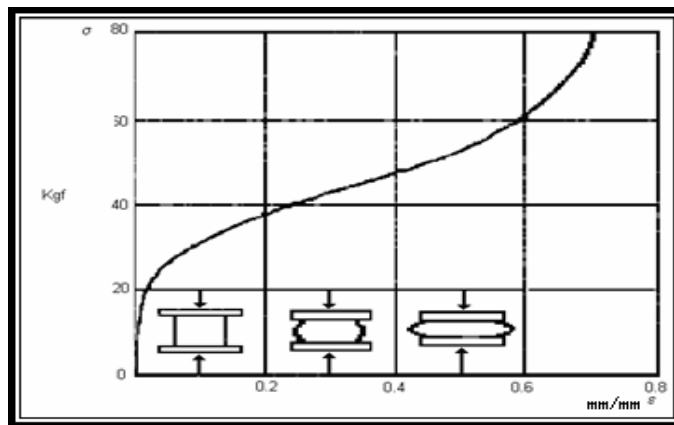


Fig. 1.9. Incremento del esfuerzo de fluencia y expansión del diámetro (abarrilamiento) del cilindro .Gere y Timoshenko, 1984 [3].

En la Fig. 1.10 se muestran algunas curvas esfuerzo-deformación obtenidas en compresión. [12].

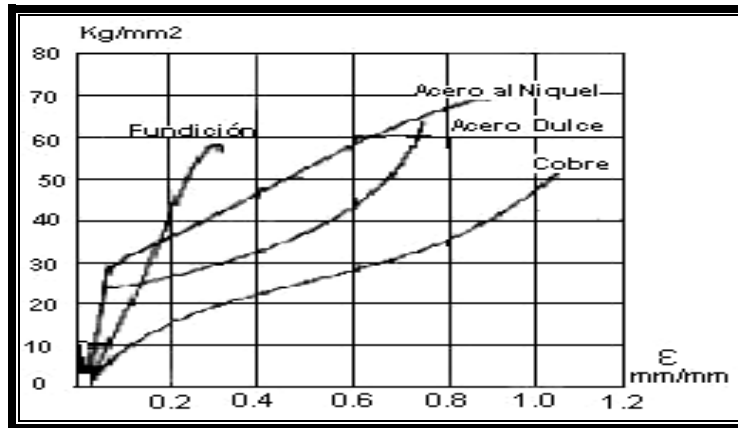


Fig. 1.10. Curvas esfuerzos-deformación en compresión para diferentes materiales. En Saldívar G., 1998 [12].

La Figura 1.11 muestra diferentes tipos de fracturas que se presentan en diferentes materiales. Los materiales frágiles rompen a lo largo de un plano diagonal y presentan una fractura en forma de cono (probetas cilíndricas) o pirámide (probetas cuadradas), como se muestra en la que también se denomina fractura en forma de reloj de arena, Fig. 1.11 (a). Al someter probetas cilíndricas a un ensayo de compresión con una relación de altura del doble con respecto al diámetro, se observa que los materiales frágiles como la fundición gris rompen prácticamente sin deformarse, se presenta la falla a lo largo de los planos inclinados, Fig. 1.11 (b). El concreto exhibe una fractura de tipo cónico, Fig. 1.11 (c). La madera presenta diferentes tipos de fractura, Fig. 1.11 (d-g) y las aleaciones de aluminio se deforman considerablemente pero se fracturan, generalmente ocurre en un plano inclinado, Fig. 1.11 (h).

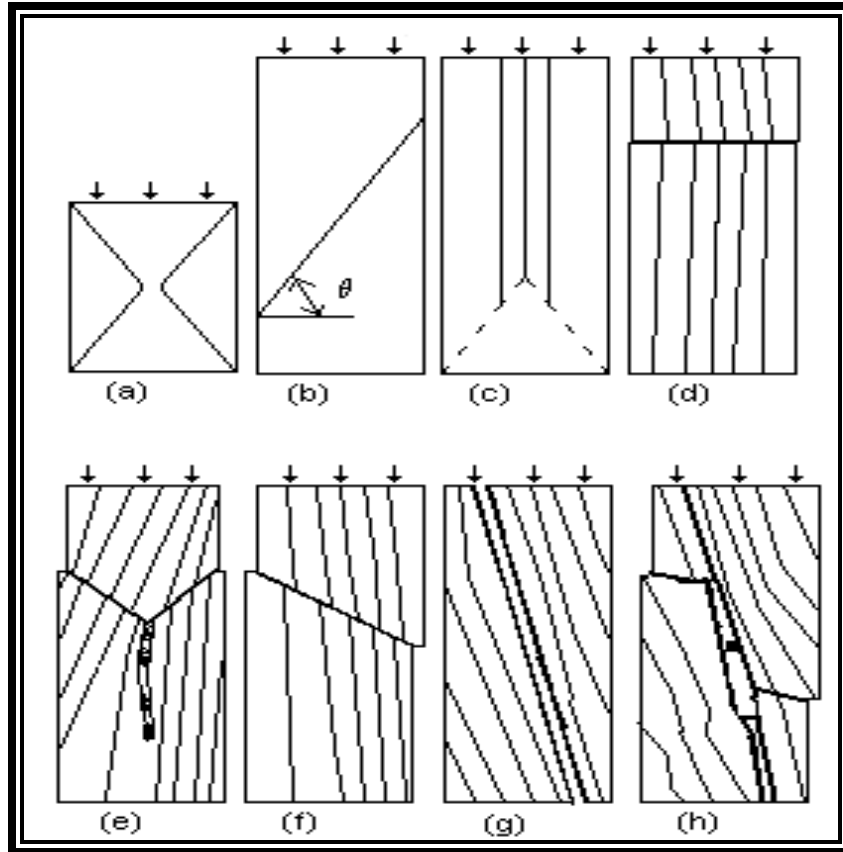


Fig. 1.11. a) Cono de corte reloj de arena.(cuba de mortero) b) Plano de corte (hierro fundido). c) Cono de corte con agrietamiento (concreto). d) Rotura aproximadamente horizontal. e) grieta cuneiforme (rajadura radial o tangencial. f) Rotura en ángulo agudo con la horizontal. g) Rajadura. h) Corte de rajadura paralelo a la fibra o en dirección del esfuerzo aplicado (el aluminio presenta este tipo de fractura. (La madera presenta las fracturas d - g). Davis, 1966 [2].

1.3.2.2. Otras geometrías. Existen probetas de diferente forma, de acuerdo a las necesidades:

a) Mayer y Mehl, [13] Proponen en alinear perfectamente tres probetas del mismo material y medir la deformación en la del medio, garantizando así que el cono neutro formado no influirá en los resultados obtenidos y se obtendrán deformaciones uniaxiales. En la Fig. 1.12. Sin embargo, el ensayo deja de ser válido cuando dicho cono penetra en la probeta central. La limitante de este método es la dificultad para obtener tres probetas idénticas y alinearlas perfectamente, por lo cual este método no es utilizado.

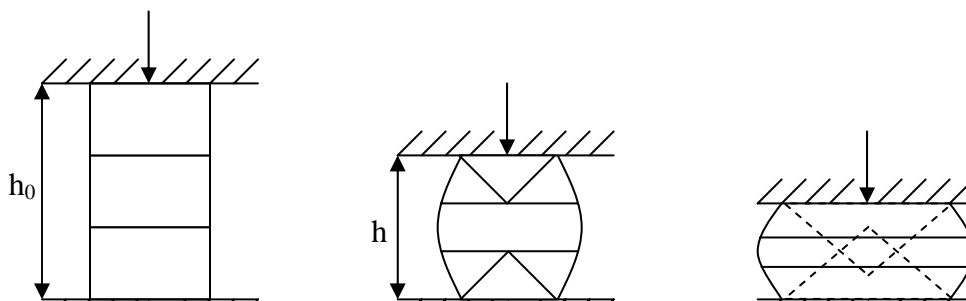


Figura 1.12. Etapas de deformaciones según Mayer y Mehl. [13]

b). Siebel y Pomp (1928) [14] calcularon el valor del esfuerzo para una probeta cilíndrica comprimida entre dos conos de ángulo α , donde

$$\alpha = \text{ángulo de contacto} = \text{arc tang } \mu$$

En general, los resultados son satisfactorios para reducciones hasta el 40%, pero para valores mayores surgen problemas por la heterogeneidad en la deformación introducida por la matriz cónica. Influye en los resultados la relación H/D de la muestra.

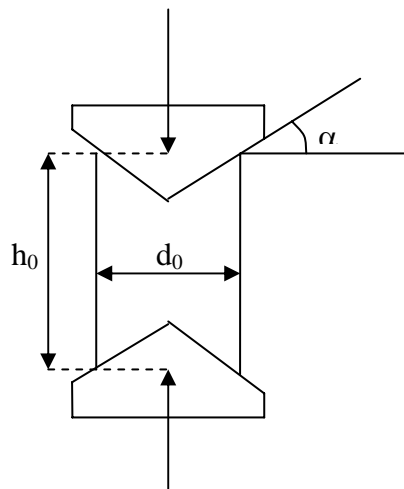


Fig. 1.13. Probeta propuesta por Siebel y Pomp. [14]

c) Rastegaev [15] propone utilizar probetas cilíndricas con una depresión en las superficies planas para colocar lubricante. Las muestras mantienen la forma cilíndrica hasta altas deformaciones.

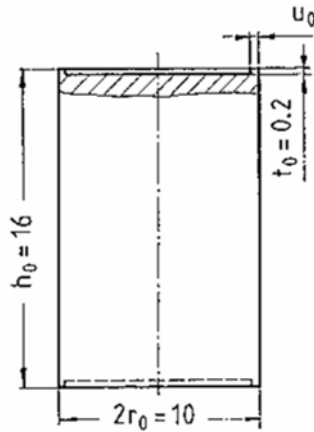


Fig. 1.13. Esquema de una probeta Rastegaev. [12]

d) Yerkovich y Giurneri [15]. Las probetas no son cilíndricas y la fricción no juega un papel importante ya que las caras planas no sufren una deformación considerable. No obstante, la preparación de las muestras y la evaluación de los resultados obtenidos son muy difíciles para considerarlas en aplicaciones prácticas. Fig. 1.14.

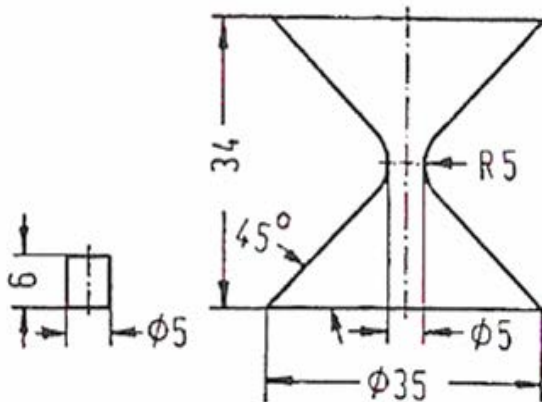


Fig. 1.14. Esquema de las probetas Yerkovich y Giurneri. [15]

1.4. COMPARACIÓN ENTRE EL ENSAYO DE TRACCIÓN Y EL DE COMPRESIÓN

En el ensayo de tracción no existe una fricción entre las mordazas y la pieza a ensayar [5] mientras que en el ensayo de compresión hay una fuerte influencia por la fricción que se presenta entre la superficie de la probeta y las placas compresivas. En estos ensayos, los diagramas difieren considerablemente según el sentido en que se aplique la fuerza; el esfuerzo de tracción y compresión se pueden registrar en un diagrama común, como se muestra en la Figura 1.15, sólo que en diferentes cuadrantes.

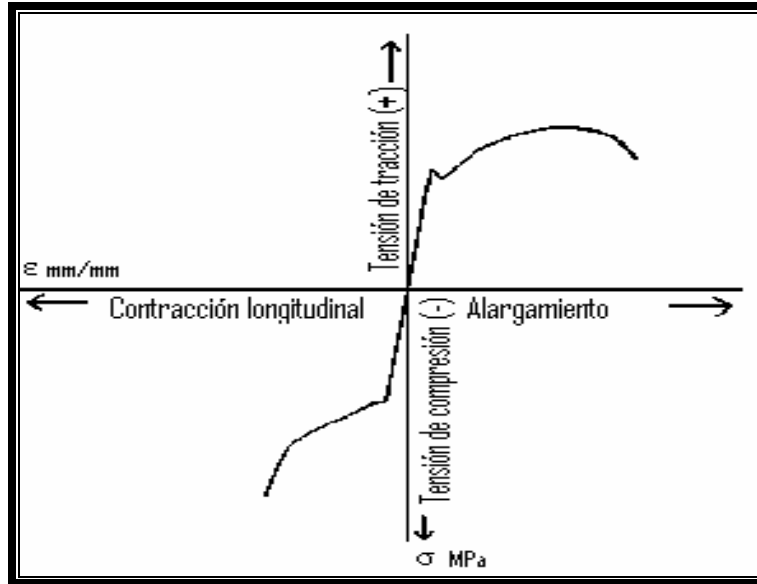


Fig. 1.15. Diagrama esfuerzo-deformación. Hans Studemann. 1979. [5]

Estos diagramas presentan una variación considerable después del punto de fluencia del material. Para el caso de compresión, la curva se eleva ya que, además del endurecimiento por deformación que sufre el material, se requiere de una fuerza extra porque está aumentando el área de contacto con las placas de compresión, mientras que en el caso de tracción el área va disminuyendo, esto se puede observar con claridad en la Fig. 1.16. En la Tabla 1.2 se comparan las ecuaciones que proporcionan las propiedades características de los ensayos de compresión y de tracción.

TABLA 1.2 Comparación de ensayos de tracción y compresión.

ENSAYO DE COMPRESIÓN	ENSAYO DE TRACCIÓN
Resistencia a la compresión $\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A_o} [N/mm^2]$	Resistencia a tracción $\sigma_T = \frac{F_{\max}}{A_o} [N/mm^2]$
Límite de aplastamiento $\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A_o} [N/mm^2]$	Límite de fluencia $\sigma_T = \frac{F_F}{A_o} [N/mm^2]$
Contracción longitudinal $\varepsilon_c = \frac{h_o - h}{h_o}$	Deformación tensil $\varepsilon_T = \frac{L - L_o}{L_o}$

Los subíndices (C, T) describen el ensayo correspondiente, F = fluencia, O = inicial, h = espesor, L = longitud, A = área. Studemann. 1979 [5].

Es de resaltar la gran deformación plástica que se puede obtener en el caso de compresión mientras que en tracción la deformación es muy poca. En la Fig. 1.16 se muestran curvas σ -

ϵ de tracción y compresión de aluminio, considerando valores absolutos de esfuerzo y deformación. La probeta de compresión tuvo una relación de aspecto $H/D = 2$ [18].

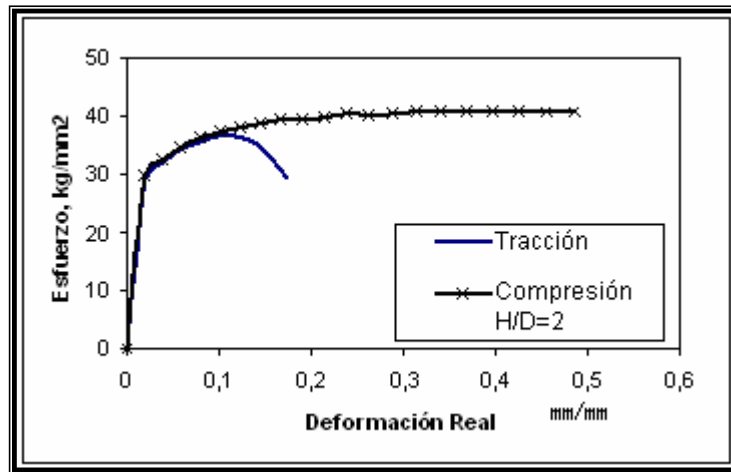


Fig. 1.16. Diferencia entre tensión y compresión de aluminio. [18]

1.5. MÓDULO DE YOUNG O MÓDULO ELÁSTICO

En la norma ASTM E-111-82 [9] se define al módulo de Young y se recomiendan consideraciones a tomar para garantizar la confiabilidad de los valores obtenidos. La definición del Módulo de Young se expresa como “la relación del esfuerzo tensil o compresivo con la deformación correspondiente debajo del límite de proporcionalidad del material” y al Módulo Tangente como la pendiente de la curva esfuerzo-deformación a un valor especificado de esfuerzo o deformación.”

El módulo de Young es útil en el diseño de una estructura para calcular la rigidez del material que sigue la ley de Hooke, cuando se somete a una carga uniaxial (esto es, la deformación es proporcional a la fuerza aplicada) [1-7], [9].

La norma [9] menciona que la determinación precisa del Módulo de Young requiere considerar a las numerosas variables que pueden afectar el valor obtenido como:

- orientación de los granos con respecto a la dirección del esfuerzo, tamaño de grano, esfuerzos residuales, historia previa de deformación, dimensiones y excentricidad,
- condiciones de la prueba como alineación de la muestra, rapidez de prueba, temperatura, variaciones de temperatura, condiciones del equipo de prueba, relación de error en carga al rango de los valores de carga y relación de error en la medición de la extensión al rango en los valores de extensión usados en la determinación,
- Interpretación de los datos.
- La longitud calibrada deberá determinarse con una exactitud consistente con la precisión esperada de la determinación del módulo y del extensómetro utilizado.

En la Nota 1 de la misma norma se comenta que, la precisión de la determinación del módulo depende de la exactitud de la medición de la deformación. Esta última se puede mejorar incrementando la longitud calibrada. Se pueden presentar problemas en mantener las tolerancias de la muestra y la uniformidad de la temperatura.

En la sección del Procedimiento, se indica que las mediciones deberán hacerse desde una precarga lo suficientemente alta para minimizar los efectos de curvatura de las muestras, alineación inicial de las mordazas, etc., que introducen errores significativos en los valores del extensómetro cuando se aplica una pequeña carga a la muestra a probar.

Para materiales linealmente elásticos, la pendiente de la porción recta de la curva esfuerzo-deformación deberá establecerse entre la precarga y el límite proporcional, la cual define al Módulo de Young. En la Fig. 1.17 la línea P-p corresponde a un valor de esfuerzo menor al límite proporcional y la línea R-r al esfuerzo de precarga.

Recomendaciones [9]:

- Medir el área transversal promedio en los extremos de la longitud calibrada y, al menos, en un punto intermedio.
- La alineación de la probeta debe ser lo mas axial posible.
- La rapidez de la prueba deberá ser lo suficientemente baja para que los efectos térmicos de la expansión o contracción adiabática sean despreciables,
- La determinación de la carga y extensión deberá ser lo mas exacta posible
- La velocidad deberá ser lo suficientemente alta para que la deformación por creep sea despreciable.
- Se recomienda efectuar un mínimo de tres corridas por cada muestra.
- La temperatura promedio sobre la longitud calibrada de la muestra no deberá desviarse del valor indicado de prueba en más de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

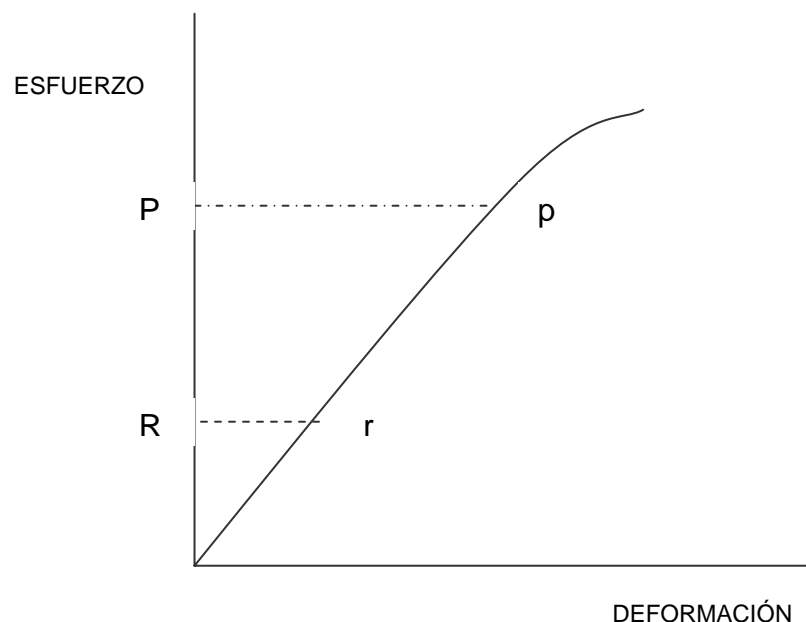


Fig. 1.17 Determinación del Módulo de Young entre la precarga P y un valor menor al límite proporcional.

1.5.1. Cálculo del Módulo De Young.

La determinación del Módulo de Young se realiza graficando los datos de esfuerzo y deformación y determinando la pendiente de la recta a partir de los datos de incremento de fuerza y del incremento de extensión correspondiente entre dos puntos de la línea lo más apartado posible y utilizando la ecuación 1.9:

$$E = \frac{\left(\frac{\Delta F}{A_0}\right)}{\left(\frac{\Delta c}{L_0}\right)} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta e} \quad (1.9)$$

ΔF = Incremento de fuerza,

A_0 = Área transversal inicial,

Δc = extensión o disminución de la longitud,

L_0 = Longitud original.

σ = Esfuerzo

e = Deformación.

Las unidades comúnmente usadas para el Módulo elástico son: Kg/cm^2 , ton/cm^2 , Pascales (N/m^2 o Pa) y libras/pulgada² (Psi). Físicamente E representa la rigidez del material a una carga impuesta

Si el esfuerzo aplicado es cortante entonces recibe el nombre de modulo de elasticidad tangencial o cortante y se representa como G.

En la Tabla 1.2 se muestran valores de módulo de elasticidad para diferentes materiales.

TABLA 1.2. Módulos de elasticidad.

MATERIAL	MODULO DE YOUNG, GPa
Acero	200 ¹
Aluminio 1100 H-14	70 ¹
Cobre	110 ²
Vidrio	80 ³
Madera de abeto	12.5 ¹
Concreto *	25 ¹

* Ruptura de fatiga a los 28 días. 1) Beer & Johnston, 1982 [16], 2) Dieter, 1988.[4] 3) Guy G. A.1980 [17].

Cuando los materiales no presentan un punto de fluencia bien definido, Fig. 1.18 se traza una recta que se extiende a una distancia correspondiente al 0.2% de deformación, que es paralela a la porción rectilínea de la grafica esfuerzo-deformación. La intersección de la línea con la curva esfuerzo-deformación se considera entonces como el punto de fluencia

del material, Fig. 1.18. A este método se le conoce como método de desplazamiento (Offset yield strength).

El endurecimiento por deformación de la mayoría de los metales, en condiciones normales, origina un incremento en la resistencia del material a futuras deformaciones. [5]

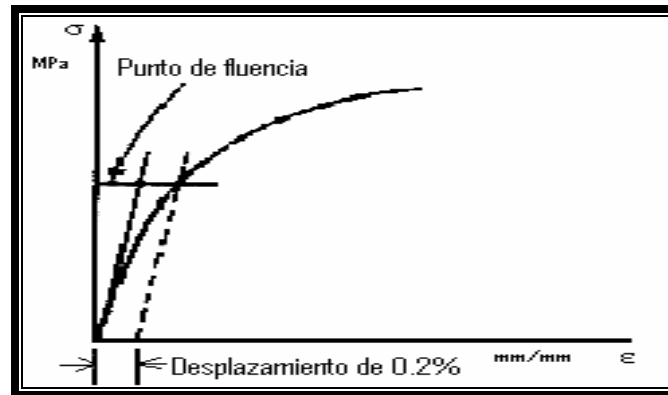


Fig 1.18. Método de desplazamiento para determinar el punto de fluencia de un material. Tesis Saldívar Guerrero, 1998. [5]

1.5.2. Rigidez de la máquina de prueba.

Tanto en tracción como en compresión es necesario considerar la rigidez de la máquina (machine stiffness) utilizada, ya que la lectura obtenida a partir del desplazamiento de las mordazas involucra el cambio de altura de la probeta más el desplazamiento elástico del marco de la máquina, más el de las mordazas o placas para compresión, etc. [4], [16]. El valor de la rigidez, K , se establece con la Ec. (1.10)

$$K = \left(\frac{V}{\dot{P}} - \frac{L_0}{A_0 E} \right)^{-1} \quad (1.10)$$

donde:

\dot{P} = Rapidez de aplicación de la carga.

L_0 = Longitud calibrada de la muestra.

V = Rapidez de desplazamiento del cabezal de la máquina.

A_0 = Área transversal de la muestra.

E = Módulo de Young de la muestra.

Dado que es mucho más común tener un extensómetro longitudinal para las pruebas tensiles que un diametral para las compresivas, es importante determinar la influencia de la rigidez de la máquina de prueba en los valores de deformación obtenidos.

En [18] y [19] se muestra la deducción de la Ecuación 1.11, donde se calcula un Módulo de Young, ($E_{\text{calculado}}$), a partir del módulo obtenido experimentalmente sin extensómetro, (E_{aparente}) y el valor del Módulo real (E) determinado con extensómetro.

$$E_{\text{calculado}} = E_{\text{aparente}} \left(\frac{A_0 E}{L_0 K} + 1 \right) \quad (1.11)$$

CAPÍTULO 2

DISEÑO EXPERIMENTAL

Un experimento es el estudio en el que se manipula una o más variables independientes (supuestas causas o antecedentes) para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, (supuesto efecto consecuente) dentro de una situación de control para el investigador. [19-21]

La utilización de un diseño experimental se hace con el fin de establecer la planeación del trabajo cuidando los detalles del experimento que nos permitirán obtener la mayor información posible.

2.1. Tipo de diseños [19-21]

Existen varios diseños experimentales, entre ellos se encuentran:

- Aleatoriedad completa
- Bloques aleatorios
- Cuadrado grecolatino
- Cuadrado latino
- Diseño de prueba-posprueba con un solo grupo
- Diseño de posprueba únicamente con un solo grupo de control
- Diseño de serie cronológica múltiple
- Diseño factorial.

La selección del diseño depende de las necesidades del investigador, y las características de la información disponible, ya que el diseño experimental seleccionado debe considerar la combinación de todas las variables, circunstancias o características del experimento para la recolección segura y necesaria de la información que nos ayude a conocer todas las condiciones o comportamiento de lo que se está estudiando o se quiere conocer. Así como la manipulación de propiedades o condiciones de trabajo en la experimentación.

2.2. Diseño factorial

El diseño factorial es un método de selección de tratamientos, (combinaciones factor-nivel), que se incluirán en un experimento. Al existir combinación en todos los componentes factor-nivel, se denomina como experimento factorial completo. Este tipo de diseño nos permite trabajar con una o varias condiciones, y la manipulación de una o más variables independientes (A, B), con las cuales se formarán grupos que contendrán todas las posibles combinaciones que surgen al cruzar los niveles (+1, -1) de las variables independientes con otras variables, donde cada una de las variables puede tener diferentes estímulos, que permitirán conocer el número de grupos formados como se muestra en la Tabla 2.1:

TABLA 2.1. Diseño de dos variables de experimentación con dos niveles de valores.

Variable	Nivel	
A	+1	-1
B	+1	-1

La combinación de los parámetros variables y los niveles de experimentación de cada variable dará el diseño experimental [21], que se presenta en la Tabla 2.2. Este diseño implica que se deberán hacer cuatro experimentos con las combinaciones indicadas en la Tabla 2.1.

TABLA 2.2. Número de experimentos a realizar considerando dos variables con dos niveles cada una.

Experimento	A	B
1	+1	+1
2	+1	-1
3	-1	-1
4	-1	+1

En la Tabla 2.3 se presentan los diseños factoriales más comunes.

TABLA 2.3. DISEÑOS FACTORIALES DE DIFERENTE ORDEN.

Tipos de diseños factoriales	Grupos formados
2 * 2	4
2 * 3	6
3 * 3	9
3 * 4	12
3 * 2 * 2	12
3 * 3 * 2	18
3 * 3 * 4	36

Nota: El orden del diseño factorial se fija con respecto a las necesidades de la investigación en cuestión.

En la Fig. 2.1 se muestra una representación de uno de los diseños anteriores que permitirá tener las siguientes combinaciones:

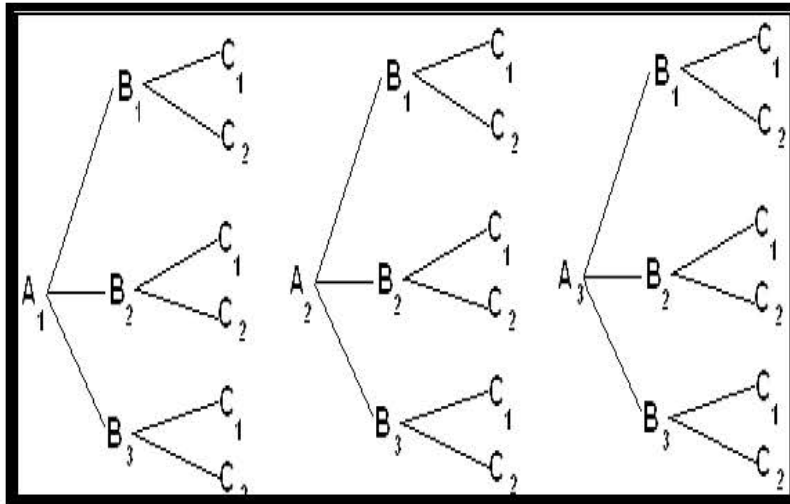


Fig 2.1. Diseño factorial del orden de $3 \times 3 \times 2 = 18$. Sampieri, 2003 [19].

Este diseño no evalúa cada variable independiente y sus efectos sobre la dependiente por separado o conjuntamente, por tal motivo se deben usar algunos métodos estadísticos que evalúen el diseño de experimentos empleado, como el diseño factorial. Los métodos más usados en estadística son:

- Análisis de varianza factorial (ANOVA).
- Análisis de covarianza con variable dependiente medida en intervalos (ANCOVA).
- La ji cuadrada para múltiples grupos.

Este tipo de diseños son aplicables cuando se desea determinar la influencia específica de cada uno de los parámetros de experimentación y la combinación de los mismos en las variables objeto de la experimentación.

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTACIÓN

El objetivo de este trabajo es determinar si hay influencia o no del número y del nivel de precargas en el módulo de Young aparente del acero 1112. Se le denomina aparente porque, como no se utiliza extensómetro, se considera también la influencia de la deformación elástica del sistema de prueba. También se investiga el grado en que la relación de aspecto de las probetas (H/D) incide en el valor de dicho módulo.

Para obtener el valor real del módulo de Young, se efectuará una prueba de tracción del acero 1112 con un extensómetro axial que indica exclusivamente la deformación efectuada en la probeta al aplicar la fuerza. Este extensómetro no se puede instalar en una probeta de compresión por el sistema de sujeción que tiene; que en una prueba compresiva se rompería.

Para determinar de forma confiable la influencia de las dos variables mencionadas (geometría de las probetas y precargas) en el módulo de Young aparente, se utilizó un diseño experimental.

3.1 MATERIAL

3.1.1 COMPOSICIÓN

Las probetas cilíndricas para el ensayo de compresión, así como las probetas de tracción fueron elaboradas con acero clasificación C-1112 de acuerdo a la norma AISI-SAE, el cual tiene la siguiente composición, Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Norma AISI-SAE del acero 1112.

% C	% Mn	% P	% S	% Si
0.10-0.16	1.00 - 1.30	< 0.045	0.08-0.13	----

Se analizó la composición del material de llegada en un espectrómetro de emisión por chispa puntual, las concentraciones por elemento que se obtuvieron son las siguientes, Tabla 3.2:

Tabla 3.3. Composición del material, acero C-1112.

% C	%Mn	%P	%S	%Si
0.1581	1.140	0.0936	0.12	0.0199

Comparando las Tablas 3.2 y 3.3 se observa que el contenido de fósforo es mucho mayor que el estipulado en la norma.

3.1.2 METALOGRAFÍA

Se realizó un estudio metalográfico de una muestra del acero a estudiar sobre papel lijas de diferentes texturas (240, 320, 400, 600), y se pulió con alúmina (Al_2O_3) de diferentes tamaños de partícula (1.0, 0.5, 0.3 μm), hasta lograr una superficie pulida tipo espejo, se ataco con Nital #2 durante 30 segundos. Posteriormente se analizó en el microscopio y se tomaron evidencias fotográficas.

La Figura 3.1 es la vista longitudinal de la barra utilizada. Se observan inclusiones alargadas y alineadas en la dirección de laminación pero los granos no presentan esa característica, por lo que se puede deducir que la varilla fue laminada en caliente o deformada en frío con un tratamiento térmico posterior.

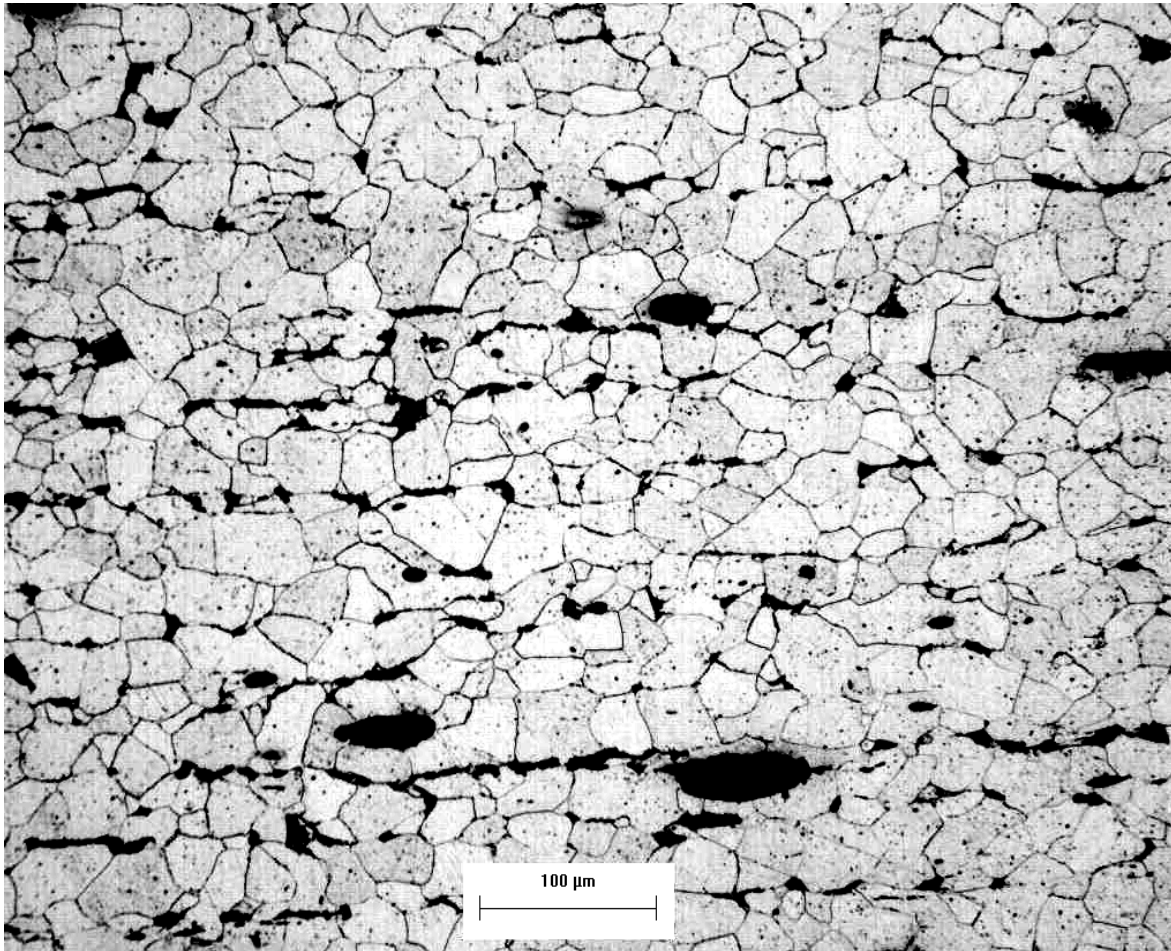


Figura 3.1. Vista longitudinal del acero 1112, 200X, Nital 2.

En la Figura 3.2 se presenta la vista transversal de la varilla, las inclusiones se ven redondeadas, y los granos muestran una estructura poligonal característica de la ferrita, ambas de tamaños similares. Esto confirma que la deformación producida durante la fabricación de la varilla fue en caliente o en frío con un tratamiento térmico posterior.

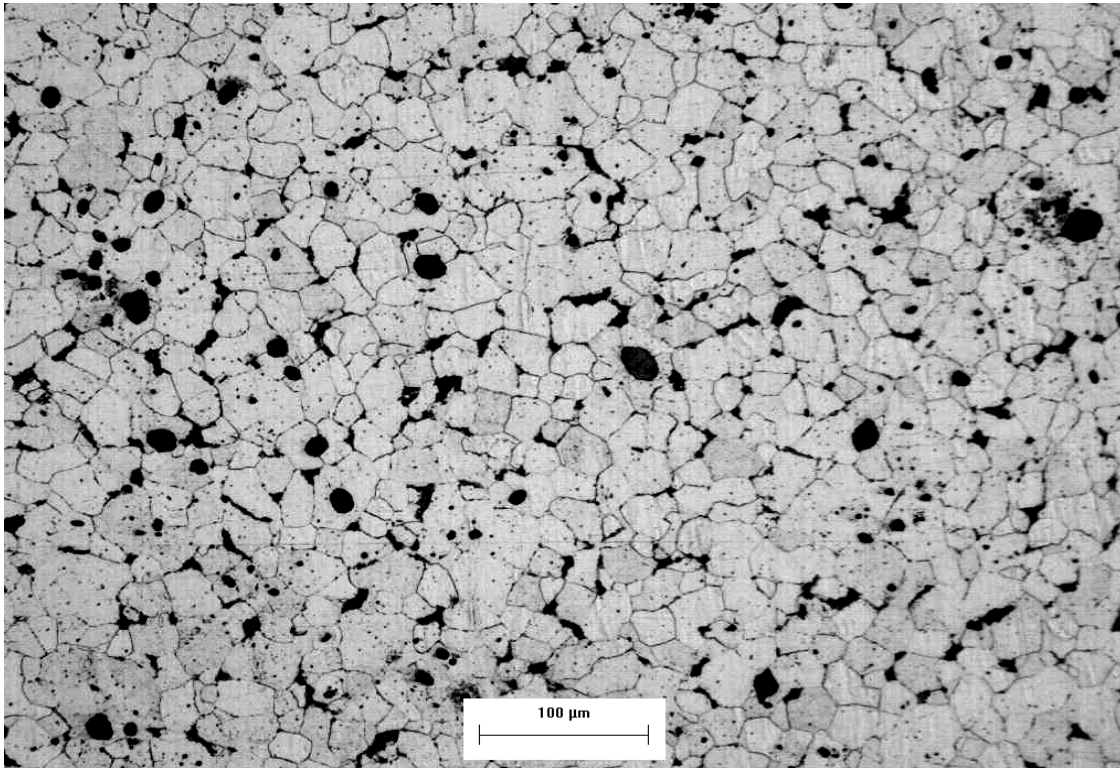


Fig. 3.2. Vista transversal del acero 1112 100x, Nital 2. Se observan impurezas en los límites de grano

3.2. PROBETAS DE COMPRESIÓN Y TRACCIÓN

3.2.1. Cilindros de compresión

Para la realización del ensayo de compresión se prepararon 48 cilindros con cuatro diferentes alturas, manteniendo el diámetro constante, lo que se varió la relación de altura/diámetro (H/D).

Todos los ensayos fueron hechos por triplicado para garantizar resultados confiables y reproducibles. Las superficies de las probetas de mantuvieron sin cambio alguno.

Las dimensiones de las probetas propuestas y las obtenidas se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Probetas de compresión.

<i>Tipo de probeta</i>	<i>Diámetro D (mm)</i>	<i>Altura H (mm)</i>	<i>Relación H/D</i>	<i>H/D Real</i>	<i>Número de probetas</i>
Cilíndrica	15.84	7.92	0.5	0.48	12
Cilíndrica	15.84	15.84	1.0	0.97	12
Cilíndrica	15.84	23.76	1.5	0.44	12
Cilíndrica	15.84	31.68	2.0	1.91	12

3.2.2 Probeta de tracción

La probeta de tracción se elaboró con el mismo acero 1112 de los cilindros, con las siguientes dimensiones¹:

Longitud total de la probeta	= 208 mm
Longitud calibrada	= 51 mm
Diámetro	= 15.84 mm

Se colocó el extensómetro en la zona calibrada de la probeta para medir el incremento instantáneo de longitud durante la prueba, y se retiró antes de que se presentara la fractura.

3.3. DEFORMACIÓN

3.3.1 Equipo de deformación

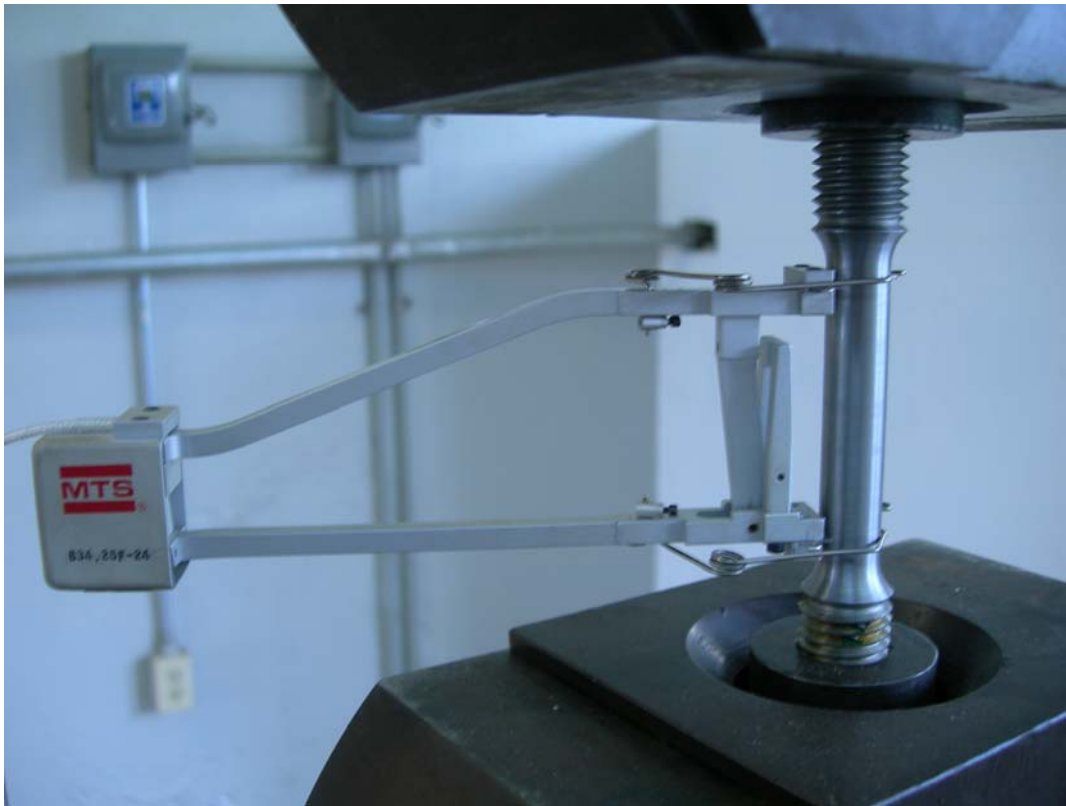


Fig. 3.3. Ensayo de tracción.

¹ Esta probeta no se fabricó conforme a la norma ASTM E8 – 93.



Fig. 3.4. Compresión de cilindro.

Para la realización de los ensayos se usó una máquina servo hidráulica marca MTS 810 con sistema de adquisición de datos, las condiciones de experimentación fueron las siguientes:

Velocidad de trabajo	= 1 mm / min
Velocidad de captación de datos	= 1 dato / 0.5 segundos
Temperatura ambiente.	

La fricción no se pudo evitar pero se controló manteniendo una rugosidad constante.

3.3.2 Placas compresoras

Se utilizaron placas compresoras de acero para herramientas tipo O1, con acabado superficial de lija 600, semejante a la de los cilindros.

3.4 DESARROLLO

Se realizó la prueba de tracción y se determinaron el módulo de Young real y el límite elástico. Posteriormente se comprimieron, hasta la zona plástica, probetas cilíndricas de cada una de las relaciones de aspecto para determinar el límite elástico en las condiciones testigo y, a partir de esas gráficas, determinar el cambio en espesor correspondiente a 20, 40, 60 y 80% de la zona elástica del material.

Se aplicaron cinco ciclos de carga y descarga en cada nivel de precargas indicado, tratando de encontrar alguna tendencia a mejorar la precisión en función del número de precarga pero no se obtuvieron resultados consistentes. Por tanto, no se incluyó esto en el análisis de los resultados.

Con los datos obtenidos de los ensayos de tracción y Fuerza vs. Reducción de altura, obtenidos directamente de la máquina MTS, se calcularon los esfuerzos y deformaciones ingenieriles y reales.

3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se trabajó bajo un diseño experimental del tipo factorial del orden de 4 * 4 con tres réplicas. Las variables de entrada son: la relación de aspecto H/D (0.5, 1.0, 1.5 y 2) y la aplicación de precargas en diferentes porcentajes del límite elástico del material (20, 40, 60 y 80), como se muestra en la Tabla 3.1. El primer subíndice indica la relación H/D, el segundo el porcentaje de precarga y el tercero el número de repetición de cada muestra.

Tabla 3.1 Diseño experimental.

Precarga H/D	20	40	60	80
2.0	Y ₁₁₁ Y ₁₁₂ Y ₁₁₃	Y ₁₂₁ Y ₁₂₂ Y ₁₂₃	Y ₁₃₁ Y ₁₃₂ Y ₁₃₃	Y ₁₄₁ Y ₁₄₂ Y ₁₄₃
1.5	Y ₂₁₁ Y ₂₁₂ Y ₂₁₃	Y ₂₂₁ Y ₂₂₂ Y ₂₂₃	Y ₂₃₁ Y ₂₃₂ Y ₂₃₃	Y ₂₄₁ Y ₂₄₂ Y ₂₄₃
1.0	Y ₃₁₁ Y ₃₁₂ Y ₃₁₃	Y ₃₂₁ Y ₃₂₂ Y ₃₂₃	Y ₃₃₁ Y ₃₃₂ Y ₃₃₃	Y ₃₄₁ Y ₃₄₂ Y ₃₄₃
0.5	Y ₄₁₁ Y ₄₁₂ Y ₄₁₃	Y ₄₂₁ Y ₄₂₂ Y ₄₂₃	Y ₄₃₁ Y ₄₃₂ Y ₄₃₃	Y ₄₄₁ Y ₄₄₂ Y ₄₄₃

Y es la probeta de acero, los subíndices indican el nivel de la relación H/D, el nivel del porcentaje de precarga y el número de réplica de cada condición de experimento.

Este diseño indica que se requieren 48 experimentos, cada uno en las condiciones indicadas.

La norma ASTM E-9 establece tres relaciones H/D: 0.8, 3 y 8-10. Considerando a esta última como la adecuada para determinar el módulo elástico. No obstante, una relación tan grande favorece el pandeo por lo que la carga a aplicar debe ser muy pequeña. Una gran limitación para utilizar esta relación es la cantidad de material requerido. En este trabajo se seleccionaron las relaciones de aspecto de la Tabla 3.1 debido a que ya han sido reportadas en la literatura. [12,18]

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se realizó la prueba de tracción utilizando un extensómetro axial, lo que asegura que los valores de Fuerza y ΔL consideren exclusivamente la deformación del acero 1112. A partir de esos datos y con las ecuaciones (1.1–1.4) se obtuvieron las graficas de esfuerzo-deformación ingenieril y real, Figura 4.1.

La deformación plástica producida fue poca, debido a la fractura de la probeta ensayada, no obstante, se determinó que el esfuerzo de fluencia es 515 MPa.

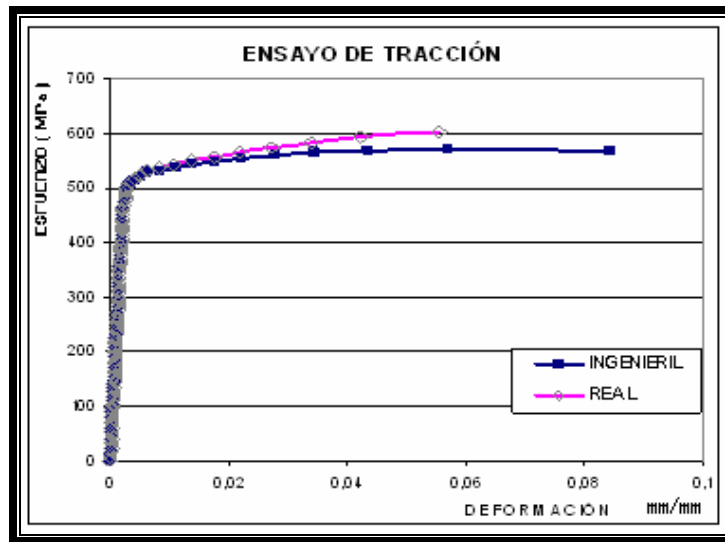


Fig. 4.1. Curvas Esfuerzo-Deformación para la tracción ingenieril y real del acero 1112. (Longitud total de la probeta = 208 mm. Longitud calibrada = 51 mm, Diámetro = 15.84 mm).

En la Figura 4.2 se muestran los valores de esfuerzo y deformación ingenieriles. La pendiente de la gráfica, Ec. (1.9), indica el modulo de Young del acero empleado. Se realizó una regresión lineal, de acuerdo con la norma ASTM E-11-82, con la cual se obtuvo el valor de 212.7 GPa, ligeramente superior al reportado en la Tabla 1.2.

De los ensayos de compresión de cilindros testigo, con deformación plástica, se calcularon las curvas esfuerzo-deformación ingenieriles y reales, Figs. 4.3 y 4.4, utilizando las Ecuaciones (1.1-1.4). Los valores negativos indican compresión.

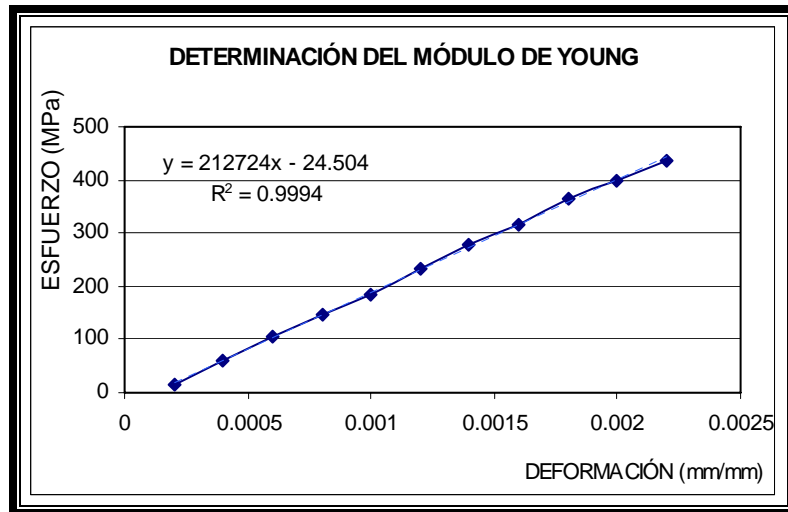


Fig. 4.2. Determinación del módulo de Young en prueba de tracción con extensómetro

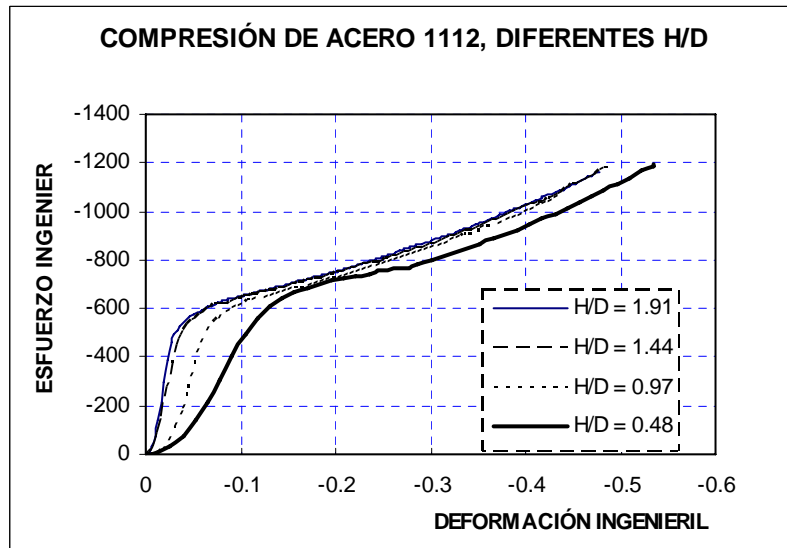


Fig. 4.3. Curvas esfuerzo-deformación ingenieriles del acero 1112 de diferentes relaciones H/D.

En las curvas 4.3 y 4.4 la zona elástica es igual, pero la zona plástica es totalmente diferente. Nótese que las escalas de esfuerzos tienen diferentes rangos.

En las curvas ingenieriles, los esfuerzos en la zona plástica muestran un incremento muy grande; debido a que la fuerza aplicada se divide entre el valor del área inicial, por lo que resulta evidente que el esfuerzo calculado de este modo no refleja la realidad.

Las deformaciones reales, al considerar el área instantánea (que se incrementa al reducir la altura) realmente representan el comportamiento del material en tracción.

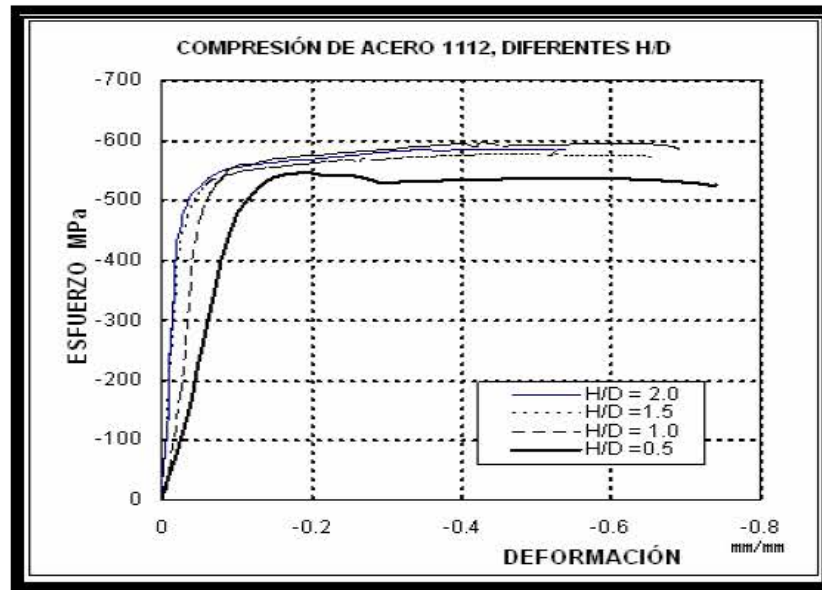


Fig. 4.4. Curvas esfuerzo-deformación reales del acero 1112 de diferentes relaciones H/D.

Las curvas de relación $H/D = 2.0$ y 1.5 son semejantes y casi se sobreponen, Fig. 4.4, indicando que el comportamiento en esas relaciones es semejante; lo que nos permite determinar la altura más adecuada de las probetas en este tipo de ensayo y concuerda con la bibliografía [12], [18]. Las otras relaciones de alturas ($H/D = 0.5, 1.0$), presentan diferencias entre sí y con las dos mencionadas anteriormente, por lo que no se pueden considerar como representativas del comportamiento del material. Pero, en nuestro caso nos permitirán determinar la influencia de la altura en el módulo elástico.

Los módulos de Young aparentes, obtenidos a partir de los datos de la zona elástica de las Figuras 4.3 y 4.4, se muestran en la Tabla 4.1. Se observa que el incremento en el módulo elástico aparente está en función de la relación de altura de las probetas ensayadas. El módulo elástico verdadero del material en estudio es de $212\,724\text{ MPa}$ y es una constante; por lo que al compararlo con los módulos aparentes obtenidos se evidencia que distan mucho del valor real. Con el diseño de experimentos propuesto se busca encontrar una relación que contenga la influencia tanto de la geometría de la probeta como de la precarga y de los valores de los módulos elásticos aparentes.

Tabla 4.1. Módulos de Young aparentes obtenidos sin precargas.

H/D	Módulo de Young, MPa
1.91	23 296.0
1.44	16 893.0
0.97	11 835.0
0.48	5 489.5

A cada probeta se le aplicaron las precargas por seis veces, se esperaba que los valores de los módulos elásticos tendieran hacia un valor constante, específico en cada condición, pero esto no sucedió. En la Tabla 4.2 se muestra un ejemplo de los valores obtenidos para

la primer muestra de relación $H/D = 1$ y 20% de precarga. Obteniéndose un promedio de 7933.65 y una desviación estándar de 699.1041.

Tabla 4.2. Ejemplo de los valores de Módulos elásticos aparentes en seis precargas.

Precarga	1	2	3	4	5	6
E, MPa	7785	7506	7272.6	8820	8800	7418.3

En la Tabla 4.3 se presentan los valores aparentes obtenidos experimentalmente en cada relación H/D y % de predeformación. No se consideró necesario incluir los datos de cada prueba, por lo que se utilizaron los promedios.

Tabla 4.3. Obtención de los Módulos de Young aparentes en pruebas de compresión en acero 1112, por triplicado y aplicando seis precargas, en el porcentaje indicado, por muestra.

MODULOS DE YOUNG APARENTES EXPERIMENTALES														
ALTURA H/D (mm/mm)	PRECARGAS (% de esfuerzo del límite elástica)													
	20 %				40 %			60 %			80 %			
	1	2	3	P	1	2	P	1	2	P	1	2	3	P
0.48	3851	3847	3784	3827.2	5109	5078	5093.55	5086	5154	5120	4952	4412	5603	4989.2
	4309	3900	4212.1	4140.5	5299	5138	5218.5	5456	5136	5295.8	5247	5366	5769	5460.8
	4091	3908	3801	3933.2	5185	5511	5347.95	5466	5460	5463	5291	5348	5795	5478.3
	4017	3867	3880.9	3921.4	5366	4993	5179.4	5292	5462	5377	5210	5268	5807	5428.3
	3969	3798	4016.3	3927.7	5379	5145	5262.1	5293	5380	5336.15	5286	5329	5775	5463.4
	3662	4042	4159.3	3954.1	5239	5049	5143.65	5433	5460	5446.3				
0.97	7785	7212	7881.5	7626.3	9953	10093	10023.05	10449	10611	10530	11211	11226	10438	10958.3
	7432	8082	7973.2	7829.1	10460	9944	10201.8	10087	10912	10499.5	11646	11653	10596	11298.3
	7273	7917	8087.4	7758.9	10256	9359	9807.3	10699	10845	10772	11436	11624	10586	11215.3
	8288	8088	8197.3	8191.2	10287	10259	10273	10972	10714	10843	11436	11553	10439	11142.7
	10573	8091	8060.7	8908.3	10344	10135	10239.5	10986	11035	11010.5	11673	11469	10638	11260.0
	7418	8065	7682.9	7722.0	10356	10158	10257	11155	10863	11009	11706	11734	10513	11317.7
1.44	15414	15817	11940	14390.3	13722	14542	14132	15812	16051	15931.5	16096	15930	16512	16179.3
	11766	10605	11558	11309.7	14968	15240	15104	15918	16383	16150.5	16535	15680	16768	16327.7
	12828	12309	11935	12357.3	15406	15718	15562	15881	16368	16124.5	16627	16430	17032	16696.3
	11739	11581	12543	11954.3	15092	15499	15295.5	15546	16531	16038.5	16732	16025	17198	16651.7
	11511	11349	11518	11459.3	15096	15100	83048	15768	15752	15760	16682	16395	17171	16749.3
	12156	12299	12263	12239.3	15406	14915	15160.5	15618	15695	15656.5	15914	16245	16456	16205.0
1.91	16530	19746	15711	17329.0	18759	19085	18922	20370	20216	20293	20370	20216	20347	20311.0
	16490	14790	16518	15932.7	19184	18850	19017	20394	20365	20379.5	20694	20365	20872	20643.7
	16508	14109	16513	15710.0	19189	18140	18664.5	20653	20387	20520	20653	20387	21190	20743.3
	18494	14178	15044	15905.3	19151	18901	19026	20393	20425	20409	20393	20425	21017	20611.7
	16102	14178	16460	15580.0	19167	18974	19070.5	20468	19928	20198	20468	19928	21287	20561.0
	17282	13610	15737	15543.0	19233	19484	19358.5	21093	20192	20642.5	21093	20192	21197	20827.3

P = Promedio

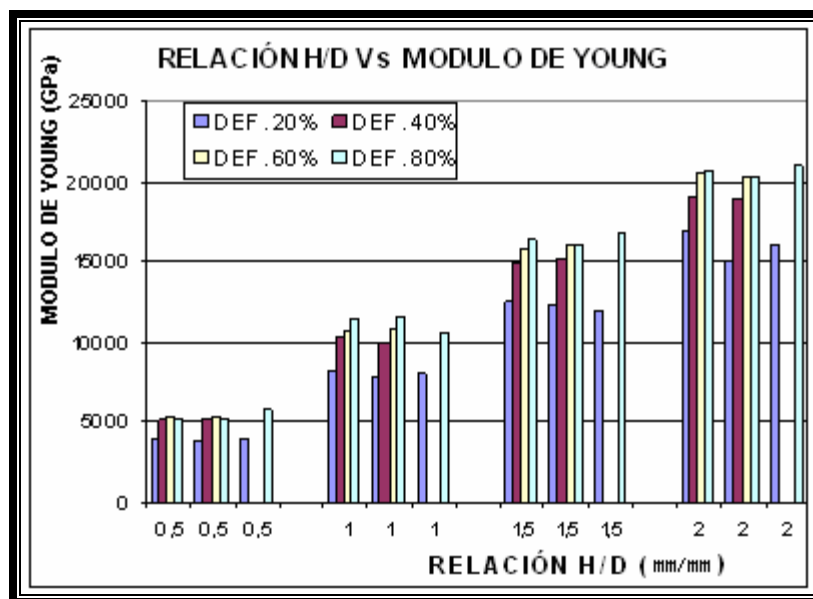
Tabla 4.4. Valores de los Módulos de Young aparente obtenidos en pruebas de compresión de acero 1112, diferentes relaciones de aspecto.

PROMEDIO DE LOS MODULOS DE YOUNG APARENTES EXPERIMENTALES												
PRECARGAS (% de esfuerzo del límite elástica)												
H/D	20			40			60			80		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.48	3982.9	3893.6	3975.6	5262.6	5152.4	5207.5	5337.5	5341.9	5339.7	5197.3	5144.7	5750.0
0.97	8128.2	7909.2	7980.5	10276.0	9991.2	10133.6	10724.7	10830.0	10777.3	11518.0	11543.2	10535.0
1.44	12569.0	12326.7	11959.5	14948.3	15169.0	15068.6	15757.2	16130.0	15943.6	16431.0	16117.5	16856.2
1.91	16901.0	15101.8	15997.2	19113.8	18905.7	19007.7	20561.8	20252.2	20407.0	20611.8	20252.2	20985.0

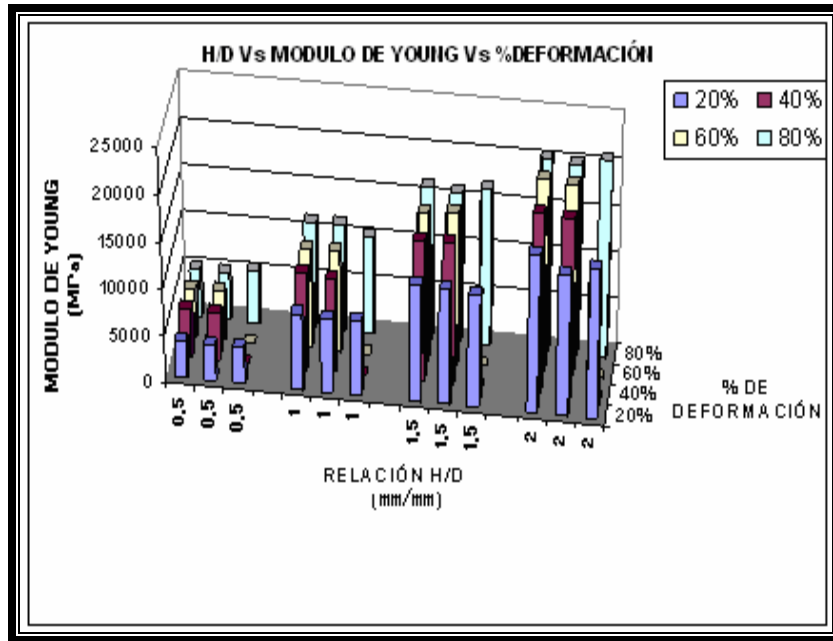
Tabla 4.5. Promedio de los Módulos elásticos aparentes, MPa, obtenidos en las pruebas de compresión

H/D \ % PRECARGA	0.48	0.97	1.44	1.91
0	5489.5	11835.0	16893.0	23286.0
20	4638.0	8767.3	13433.0	18182.2
40	5364.4	10467.7	15648.4	20159.3
60	5472.6	11250.6	16640.4	21388.7
80	5697.9	11738.8	17100.9	22164.2

Se presentan los resultados en las Figuras 4.4 y 4.5, donde el módulo de Young aparente aumenta al aumentar la relación H/D.



Grafica 4.4. H/D con relación al efecto en el modulo de Young.



Grafica 4.5. Influencia en el modulo de Young al variar H/D y el porcentaje de deformación.

Al presentar los resultados de la Tabla 4.5 en forma gráfica, Figura 4.6, se observa que la influencia del porcentaje de aplicación de la precarga es pequeña en los valores promedio de los módulos de Young aparentes.

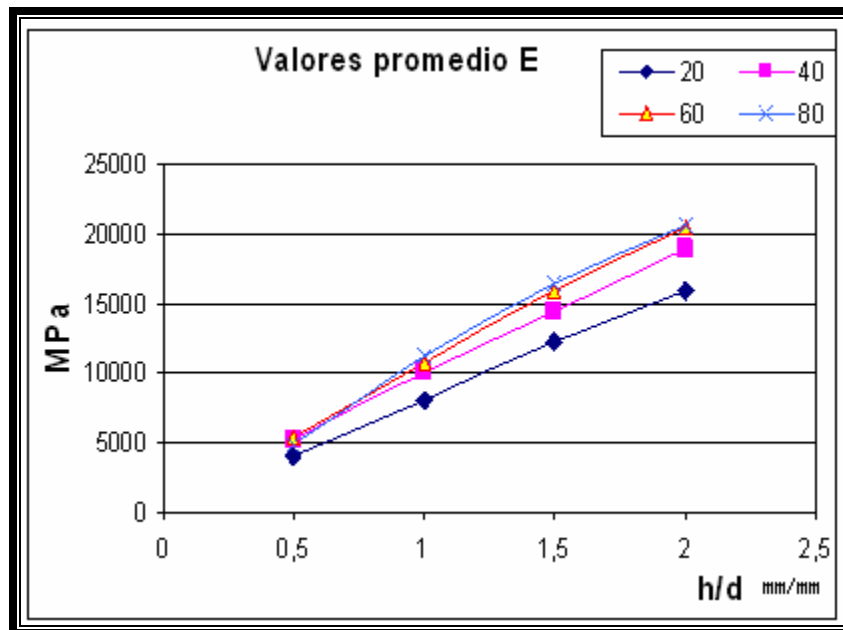


Fig. 4.6. Influencia en los valores promedios del Módulo de Young aparente con relación a H/D

Los datos de la Tabla 4.5 se grafican ahora considerando la Relación de aspecto constante (H/D), en función de la predeformación, Fig. 4.7. Es notorio que es mucho mayor la

influencia de la geometría de la probeta que el porcentaje de predeformación en los Módulos de Young aparentes. La Fig. 4.8 presenta los mismos datos de la 4.7 pero incluye los valores de los módulos elásticos aparentes obtenidos sin aplicar precargas.

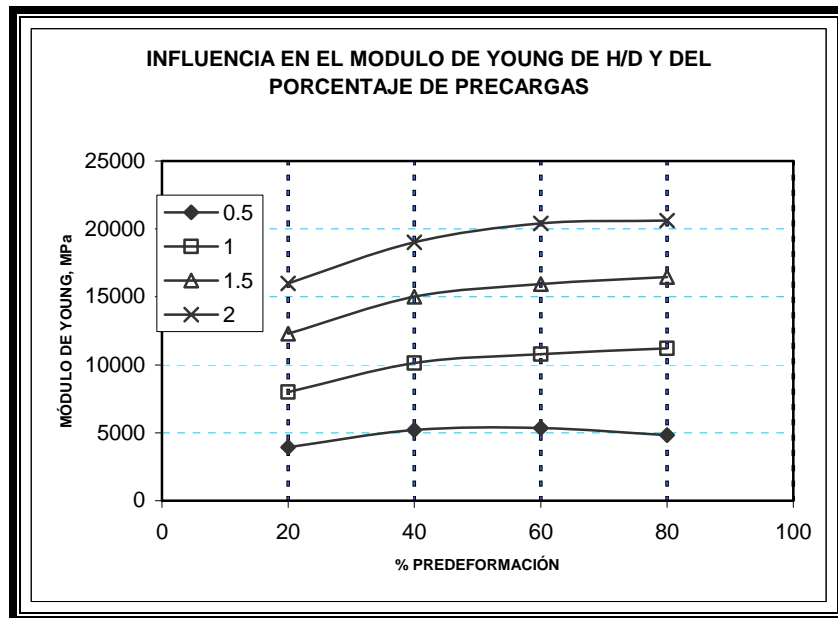


Fig. 4.7. Influencia de % de precargas y H/D de las probetas en los Módulos elásticos aparentes.

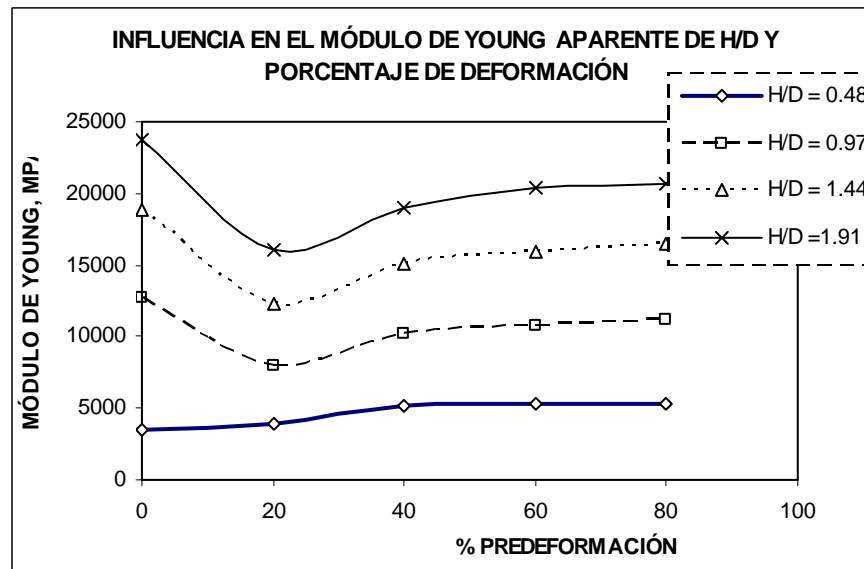


Figura 4.8. Influencia de % de precargas y H/D de las probetas en los Módulos elásticos aparentes, considerando a los valores obtenidos sin precargas.

Tabla 4.5. Ecuaciones de línea de tendencia de la Fig. 4.6.

DEFORMACIÓN	ECUACIÓN	No. Ec.
20 %	$E = 8085.4 \frac{H}{D} + 46.325 \quad R^2 = 0.999$	(4.1)
40%	$E = 9254.6 \frac{H}{D} + 769.45 \quad R^2 = 0.998$	(4.2)
60%	$E = 100074 \frac{H}{D} + 524.88 \quad R^2 = 0.9981$	(4.3)
80%	$E = 10526 \frac{H}{D} + 120.76 \quad R^2 = 0.9912$	(4.4)

En la Tabla 4.5 se muestran las ecuaciones de las líneas de tendencia de la Fig. 4.6 donde se graficó el modulo de Young contra % de deformación (E Vs %deformación). La Tabla 4.6 expresa las ecuaciones de las líneas de tendencia de la Fig. 4.7.

Tabla 4.6 Ecuaciones de línea de tendencia del grafico 4.7, donde X = % de predeformación

RELACIÓN H/D	ECUACIÓN	
0.5	$E = 0.01X^3 - 2.6116X^2 + 191.4X + 1086.9$	$R^2 = 0.9998$ (4.5)
1.0	$E = 0.0263X^3 - 5.0088X^2 + 333.32X + 3132.8$	$R^2 = 0.9999$ (4.6)
1.5	$E = 0.0282X^3 - 5.5952X^2 + 392.57X + 6446.3$	$R^2 = 0.9997$ (4.7)
2.0	$E = 0.0088X^3 - 3.0771X^2 + 310.35X + 10953$	$R^2 = 0.9999$ (4.8)

Debido a que en la determinación del Módulo de Young existe una influencia de las precargas a las cuales se someten las probetas, se analizaron estadísticamente los datos correspondientes al diseño experimental, obteniéndose la ecuación correspondiente con el programa STATGRAPHICS.

$$E = -2144.03 + 47.7886 * \text{Precarga} + 10664.2 * H/D \quad (4.9)$$

Para los datos experimentales se obtuvo una correlación $R^2 = 99,1021 \%$; lo cual indica la precisión de los valores obtenidos.

Entre los resultados experimentales y la ecuación de regresión o modelo matemático obtenido, tomando en cuenta los grados de libertad de las variables, se obtuvo un 98,964% de coincidencia.

Analizando la Ec. (4.9), se confirma que la precarga tiene muy poca participación en el valor obtenido del modulo de Young aparente y el factor determinante es la relación H/D. Retomando la Ec. (11.1) y renombrándola (4.1), se obtiene la Tabla 4.7 donde se muestran los datos modificados para obtener los Módulos elásticos calculados.

$$E_{\text{calculado}} = E_{\text{aparente}} \left(\frac{A_o E}{L_o K} + 1 \right) \quad (4.10)$$

Tabla 4.7. Determinación de la rigidez del sistema de prueba y de los Módulos de Young calculados con la Ec. 4.10.

Precarga %	H/D	Ao mm2	Lo mm	\dot{P} KN/s	Vel mm/seg	V/\dot{P} mm/N	Lo/(AoE) mm/N	K N/mm	(AoE/LoK)+1 Adimensional	E aparente MPa	E calculado MPa
0	0.48	197.06	7.7	2.92	0.017	5.71E-06	1.83E-07	180886.26	31.25	5489.5	171,549.9
20	0.48	197.06	7.7	2.44	0.017	6.84E-06	1.83E-07	150143.97	37.35	4638.0	173,227.0
40	0.49	197.06	7.8	2.43	0.017	6.85E-06	1.85E-07	150142.64	36.98	5364.4	198,350.4
60	0.48	197.06	7.7	2.43	0.017	6.85E-06	1.83E-07	149891.57	37.46	5472.6	204,994.3
80	0.48	197.06	7.7	2.43	0.017	6.86E-06	1.83E-07	149873.84	37.46	5697.9	213,458.9
0	0.97	197.06	15.3	3.01	0.017	5.53E-06	3.66E-07	193498.72	15.12	11835.0	178,956.6
20	0.96	197.06	15.2	2.43	0.017	6.85E-06	3.62E-07	154154.98	18.94	8767.3	166,043.9
40	0.96	197.06	15.2	2.43	0.017	6.85E-06	3.61E-07	154012.39	18.96	10467.7	198,507.3
60	0.96	197.06	15.2	2.43	0.017	6.85E-06	3.62E-07	154075.05	18.92	11250.6	212,872.9
80	0.96	197.06	15.2	2.43	0.017	6.85E-06	3.61E-07	154024.62	18.96	11738.8	222,595.3
0	1.43	197.06	22.7	2.71	0.017	6.16E-06	5.41E-07	178048.02	11.38	16893.0	192,238.4
20	1.43	197.06	22.7	2.44	0.017	6.83E-06	5.41E-07	158975.73	12.63	13433.0	169,591.9
40	1.43	197.06	22.7	2.43	0.017	6.85E-06	5.41E-07	158500.51	12.66	15648.4	198,107.1
60	1.43	197.06	22.7	2.43	0.017	6.85E-06	5.42E-07	158403.56	12.66	16640.4	210,613.4
80	1.43	197.06	22.7	2.43	0.017	6.85E-06	5.42E-07	158448.29	12.64	17100.9	216,210.4
0	1.91	197.06	30.3	2.53	0.017	6.58E-06	7.22E-07	170747.05	9.11	23286.0	212,064.9
20	1.91	197.06	30.3	2.43	0.017	6.86E-06	7.22E-07	162964.83	9.49	18182.2	172,623.8
40	1.91	197.06	30.3	2.43	0.017	6.85E-06	7.22E-07	163180.37	9.48	20159.3	191,168.8
60	1.91	197.06	30.3	2.43	0.017	6.85E-06	7.22E-07	163085.35	9.49	21388.7	202,962.1
80	1.91	197.06	30.3	2.43	0.017	6.86E-06	7.22E-07	163044.85	9.49	22164.2	210,380.2

La Fig. 4.9 muestra la tendencia de los E calculados en muestras sin predeformación. Se observa que el módulo elástico calculado aumenta al hacerlo la relación H/D, sin considerar las muestras sin predeformación, y que las muestras de 80% del límite elástico calculados son las que presentan los valores más cercanos al módulo de Young real para todas las relaciones H/D.

Para la muestra mas pequeña y 20% de deformación, la diferencia en E respecto al valor real es de 18.57%; mientras que para la probeta de H/D = 1.91 y 80% de predeformación la diferencia es de 1.10%.

La Fig. 4.9 indica la variación de los módulos elásticos calculados en función de la predeformación, para cada relación de aspecto. La curva correspondiente a H/D = 0.48 no sigue la tendencia mostrada por las otras, esta dispersión se atribuye a los pocos datos obtenidos por ser la probeta más pequeña.

Analizando la Figura 4.10 se observa que los módulos corregidos aumentan con el nivel de porcentaje de predeformación y que no hay una tendencia clara en el orden de la geometría de la probeta.

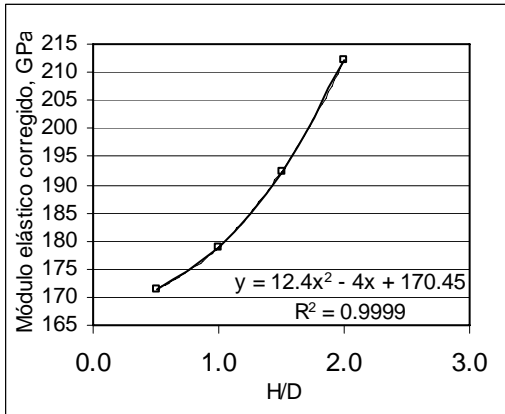


Fig. 4.9. Módulos calculados sin predeformación.

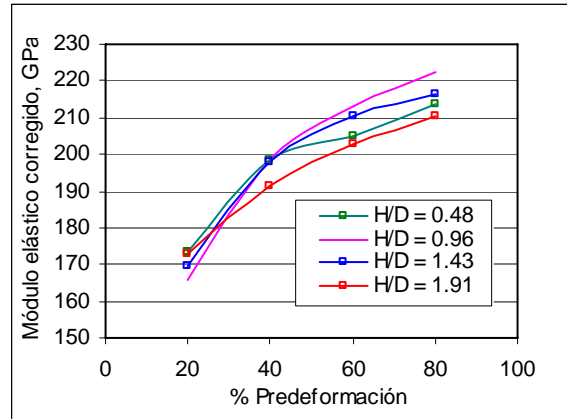


Fig. 4.10. Módulos calculados con predeformación.

Al graficar los valores de los módulos elásticos calculados, Fig. 4.11, se comprueba que hay mucha dispersión en los datos obtenidos a 20% de predeformación. Las curvas de 60 y 80% de predeformación tienen la misma tendencia, indicando que éste es un rango adecuado para la experimentación.

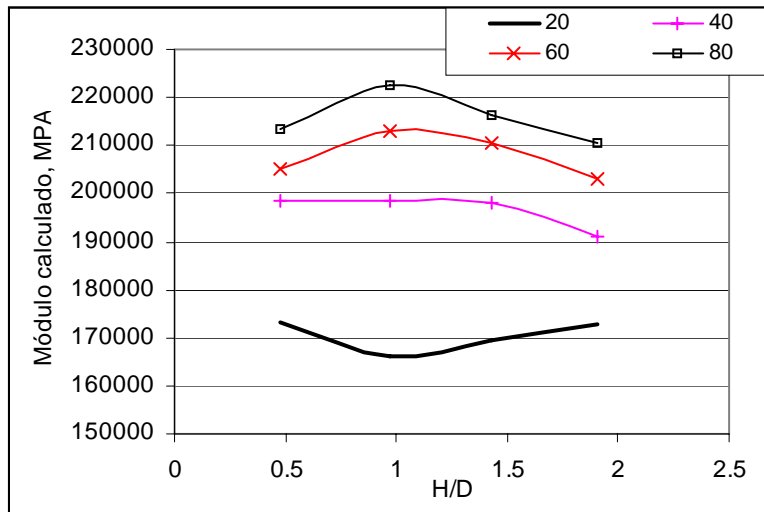


Fig. 4.11. Módulos calculados en función de la relación de aspecto.

En la Fig. 4.12 se grafica los Módulos calculados Vs los módulos aparentes; la línea que muestra la menor pendiente es la de las muestras de H/D = 1.91.

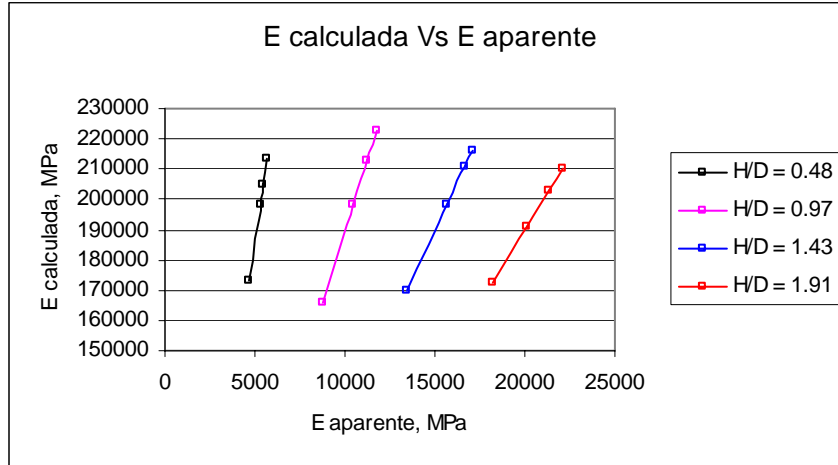


Fig. 4.12. Relación entre los módulos elásticos aparentes y calculados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

- La obtención de un módulo elástico (tanto en tracción como en compresión) sin aplicar un extensómetro, siempre produce valores erróneos debido a la rigidez del sistema de prueba.

PRECARGAS

- La aplicación repetida de las precargas no mostró tendencia hacia una homogeneidad de los resultados en cada ensayo.
- Los valores de los módulos elásticos obtenidos en probetas sin predeformación (deformación hasta ruptura) son mayores que los que sí se predeformaron.
- Las precargas no muestran una influencia decisiva o importante en el módulo de Young aparente.

RELACIÓN DE ASPECTO

- Al aumentar conjuntamente la precarga y la relación H/D se incrementa el valor del módulo de Young aparente. No obstante, es mucho menor que el valor del módulo de Young real.
- La relación de aspecto de las probetas determina el valor aparente de su módulo de Young.
- Al aumentar la relación H/D es mayor la influencia de la predeformación en el Módulo de Young aparente.
- El módulo elástico aparente aumenta al hacerlo la relación H/D de las probetas.

MODELO ESTADÍSTICO

- Los datos obtenidos de acuerdo al diseño experimental propuesto y su posterior manejo estadístico dieron el modelo:

$$E = -2144,03 + 47,7886 * \text{Precarga} + 10664,2 * \text{H/D}$$

- Las precargas tienen poca influencia en los módulos de Young tanto aparentes como corregidos, lo cual se refleja en el modelo matemático obtenido.

- El incremento en el nivel de la precarga aumenta el valor y la precisión de los módulos elásticos corregidos.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Tremari Gomez R., *Resistencia de Materiales*, Ed. Universidad de Guadalajara, México 1980, pp. 9-16
- 2 Davis, Harmer E., *Ensayo e Inspección de los Materiales de Ingeniería*, Ed. Continental, S.A, México -España 1966, pp. 41-197.
- 3 Gere M. y Timoshenko Stephen P., *Mechanics of Materials*, PWS Publishers, E.U.A, 1984, pp. 1-37.
- 4 Dieter, George E., *Mechanical Metallurgy*, Ed McGraw Hill, London, 1988, pp. 275-295, 304-305
- 5 Studemann, Hans, *Ensayo de Materiales y Control de Defectos de la Industria del Metal*, Ed: Urmo S.A, España, 1979, pp. 89-93
- 6 Hibbeler, Russell C., *Mecánica de Materiales*, Ed: Continental S.A., México 1994, pp. 85-99
- 7 Popov, Igor P., *Mecánica de Materiales*, Ed Limusa, México 1994, pp. 19-69.
- 8 http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/36/htm/sec_9.html, tomado de la red el 20 de mayo de 2006.
- 9 *Standard Test Method for Young 'S Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus*, ASTM Standard, E 111-04.
- 10 *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM Standard, E 8-04.
- 11 *Standard Test Method of Compression Testing of metallic Materials at Room Temperature*, ASTM Standard, E 9-89a.
- 12 Saldívar Guerrero R., *Influencia del coeficiente de fricción y la geometría de la probeta en el ensayo de compresión en acero inoxidable 316*, Tesis, UNAM, Facultad de Química, México 1998.
- 13 Mayer, H. and Mehl, F. en Herman, H., Iurman, L. y Saéns López A. *Curso Panamericano de Metalurgia*, Organización de los Estados Americanos, 1976.
- 14 E. Siebel and A. Pomp, en Herman, H., Iurman, L. y Saéns López A. *Curso Panamericano de Metalurgia*, Organización de los Estados Americanos, 1976.

- 15 Pohlandt, Klaus, *Materials Testing for the Metal Forming Industry*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989.
- 16 Beer, Ferdinand P. y Johnston, E. Russel, *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill International Book Co., 1981.
- 17 Guy, A. G., *Fundamentos de Ciencia de Materiales*, McGraw-Hill, 1980.
- 18 Robert T., Saldivar R., Ramirez J., Salas G., Noguez M.E., “El Módulo de Young en la Compresión Axisimétrica”, *Información Tecnológica*, Vol 9, N° 5 1998, pp. 141-148.
- 19 Metals Handbook Vol 8, *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM International, 2000, pp. 79-92
- 20 Sampieri Hernandez R., Collado Fernandez C., Lucio Baptista P., *Metodología de la Investigación*, Mc Graw Hill Interamericana, México 2003 3^{er} edición, pp. 183-299.
- 21 Mendenhall W. y Sincich. T., *Probabilidad y estadística*, Ed: Prentice-Hall Hispanoamericana. S.A , México 1997, pp. 790-860.
- 22 William M., Richard L. Scheaffer, Dennis D. Wackely, *Mathematical statistics with aplicaciones*, Ed: Iberoamerica, E.U.A 1986, pp. 99-195, 205, 439, 685.
- 23 A. D. Sarkar, *Desgaste de materiales*, Ed Limusa S.A de C:V México 1990, pp. 47-69.

APÉNDICE I

FRICCIÓN

COEFICIENTE DE FRICCIÓN

La fricción es considerada como la resistencia que presenta la superficie rugosa de un cuerpo sólido a moverse sobre la de otro ya sea sólido ó líquido y que se manifiesta por la pérdida de energía mecánica durante el inicio y desarrollo del movimiento relativo entre las dos zonas materiales en contacto. Motivo por el cual, existe una pérdida de energía donde la fricción se transforma en calor. Cuando las rugosidades de los superficies en contacto interactúan se rígilizan, propiciando su fractura y por lo tanto al desgaste prematuro de los mecanismos. [DIRC. DE INTERNET].

La teoría actual de fricción parte de que el contacto ocurre en unos cuantos puntos aislados debido a la naturaleza ondulatoria de la superficie. Las áreas de contacto forman uniones metálicas debido a la deformación plástica o elástica, de manera que la resistencia friccional es la fuerza necesaria para destruir estas uniones como se muestra en la figura 13.

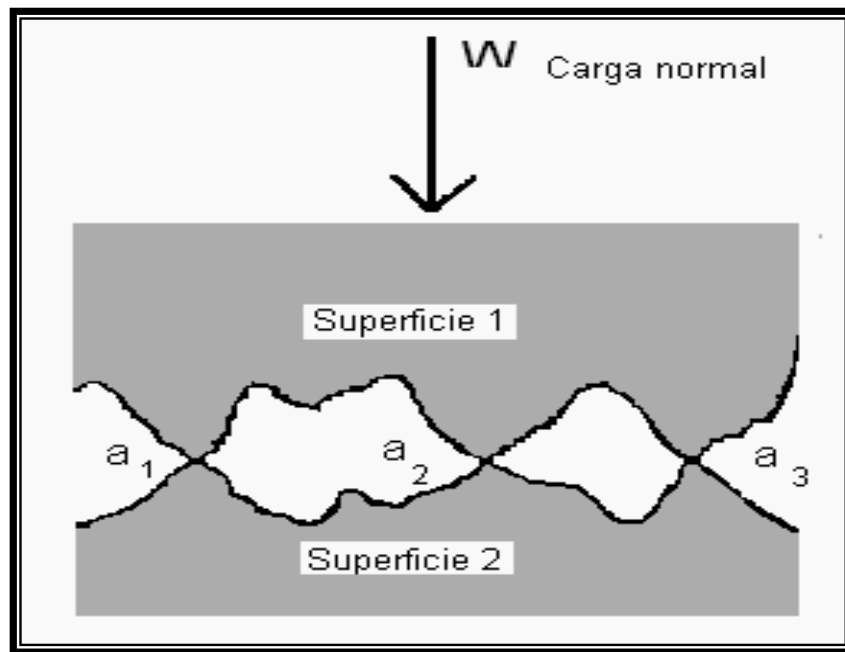


Fig 14. Contacto entre placas en unos cuantos puntos. Sarkar A. D. ,1990. [23]

Debido a que el área aparente en la interfase de los sólidos no es homogénea, solo se tocan en aquellas asperezas que se aproximan en posición favorable donde formen un área de contacto de manera que:

$$A_t = \sum_n^i a_i \quad (1)$$

Cuando el área de contacto es muy pequeña. Esto produce un esfuerzo normal intensificado en la interfase. Así, si la carga normal aplicada a la superficie es W y σ_y es la presión de flujo del elemento más blando de los dos, para el área real de contacto establecida es

$$A_t = \frac{W}{\sigma_y} \quad (2)$$

Bowden y Tabor consideran la resistencia friccional entre dos superficies como la suma de dos componentes; uno cortante y otro de hundimiento,^[8]. Como se muestra en la figura 15.

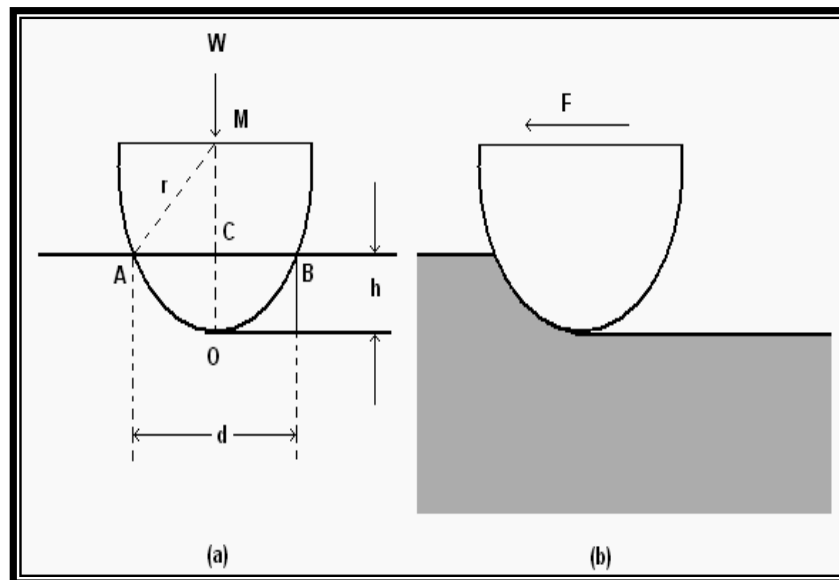


Fig 15. Jinete hemisférico que se desliza sobre una superficie suave bajo la acción de una carga. a) Jinete estacionario; b) Jinete en movimiento, que produce una huella de ranura, Sarkar A. D. ,1990. [23]

Y puesto que la fuerza de fricción esta dada por la suma de los factores de hundimiento y cortante se tiene

$$F = S + P \quad (3)$$

Se sabe que el coeficiente de fricción (μ) es la resistencia a la fricción por unidad de carga, por lo tanto

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{A_t \tau}{A_t \sigma_y} = \frac{\tau}{\sigma_y} \quad (4)$$

Cuando una superficie es colocada sobre otra, es necesario aplicar una fuerza horizontal finita para iniciar el deslizamiento. Esta fuerza horizontal es la fricción estática entre las dos superficies, cuya magnitud depende, entre otras cosas, de la limpieza de la interfase, de modo que la fricción entre dos cuerpos es alta en el vacío. La fuerza necesaria para mantener el deslizamiento debe ser mayor que la fricción cinética entre las dos superficies. La resistencia al deslizamiento bajo tracción tangencial se explicó durante mucho tiempo mediante la hipótesis de la rugosidad que sugiere que las crestas de una superficie descansan sobre los valles de la otra y la resistencia al movimiento es el esfuerzo que deben realizar estas crestas para salir de los valles. La teoría actual de la fricción parte de la premisa básica de que el contacto ocurre en unos cuantos puntos aislados debido a la naturaleza ondulatoria de las superficies. Las áreas de contacto forman uniones metálicas debido a la deformación plástica o elástica, de manera que la resistencia friccional es la fuerza necesaria para destruir estas uniones.

ÁREA DE CONTACTO

Considérese una superficie que descansa sobre otra (figura 4.1), ambas con protuberancias, como es el caso de las superficies ingenieriles. No puede existir un contacto en toda el área aparente de la interfase y los dos sólidos sólo se tocan en aquellas asperezas que se aproximan en posición favorable. En esta forma, las áreas de contacto a_1, a_2 , etc. serán las que formen el área real de contacto de manera que

$$A_r = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n \quad (1)$$

ADHERENCIA DE LAS UNIONES

El desarrollo de una resistencia finita en la interfase por interacción plástica depende principalmente de las propiedades mecánicas del material. Así, si la carga normal aplicada a la superficie 1 (figura 4.1) es W y σ_y es la presión de flujo del elemento más blando de los dos, para un área real de contacto establecida, A_r , es

$$W = A_r \sigma_y \quad (1)$$

o sea,

$$A_r = \frac{W}{\sigma_y} \quad (2)$$

Si se elimina la carga, las superficies se separan al romperse las uniones por el proceso de recuperación elástica del material subyacente. Considérese un indentador esférico y duro de radio r_1 y un módulo de Young E_1 que presiona, bajo una carga W , sobre una superficie blanda de módulo de Young E_2 , haciendo una indentación de profundidad máxima x (figura 4.2o). Sea d

el diámetro cordal de la indentación. Suponga que se retira la carga y como resultado de la recuperación elástica, la superficie más blanda se reforma y tiene un nuevo radio de curvatura r_2 , $r_2 > r_1$, por lo general, se supondrá que el diámetro cordal es e ; mismo que artes.

La cantidad de recuperación elástica se evalúa utilizando un punto de referencia arbitrario sobre la esfera y observando la altura a que éste se ha movido de la superficie original una vez que se retira la carga. Sea h la recuperación elástica, tal como se ha definido; sea y la distancia de la superficie original a la línea horizontal trazada a través del centro de la superficie final de radio r_2 (figura 4.2b). Se deduce que

$h = x - y$ y Ahora, a partir de la figura 4.2a

se tiene que:

$$(2r_1 - x)x = \frac{d}{2}x \frac{d}{2} \quad (3)$$

o sea,

$$2r_1x - x^2 = \frac{d^2}{4} \quad (4)$$

Puesto que x es casi siempre pequeña, las potencias superiores de x se pueden despreciar, de modo que

$$2r_1x = \frac{d^2}{4} \quad \text{ó} \quad x = \frac{d^2}{8r_1} \quad (5)$$

por lo tanto

$$h = (x - y) = \frac{d^2}{8} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \rightarrow h = \frac{d^2}{8} \left(\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \right) \quad (6)$$

ahora definiendo E como

$$\frac{1}{E} = \frac{0.91(E_1 + E_2)}{E_1 E_2} \quad (7)$$

o sea

$$E = \frac{E_1 E_2}{0.91(E_1 + E_2)} \quad (8)$$

definiendo a r como

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \quad \text{es decir} \quad r = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (9)$$

y sustituyendo los valores de E y r en la ecuación

$$d = 2 \left[\frac{3}{4} w \frac{r_1 r_2}{(r_2 - r_1)} \frac{0.91(E_1 + E_2)}{E_1 E_2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

O sea

$$d = \left[5.46 w \left(\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \right) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

Sustituyendo para $(r_1 r_2) / (r_2 - r_1)$

$$d^3 = \left[5.46 w \left(\frac{d^2}{8h} \right) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right] \quad (12)$$

O sea

$$h = \left[0.68 \frac{w}{d} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right] \quad (13)$$

y multiplicando el numerador y el denominador del miembro de la derecha por d

$$h = \left[0.68 d \frac{w}{d^2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right] \quad (14)$$

suponiendo que para una carga w, el diámetro de indentación, d, es constante para cualquier material

$$h = k \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (15)$$