

18
zei.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EVALUACION DE TESIS
FAC. DE QUIMICA

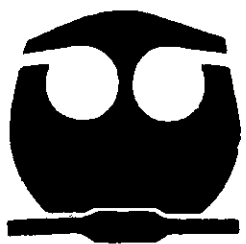
INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE FRICCION Y LA
GEOMETRIA DE LA PROBETA EN EL ENSAYO DE
COMPRESION EN ACERO INOXIDABLE 316

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

RUBEN SALDIVAR GUERRERO



MEXICO, D. F.

200137

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

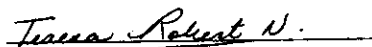
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Prof. Noguez Amaya Ma. Eugenia.
Vocal: Prof. Salas Banuet Guillermo F
Secretario: Prof. Robert Nuñez Teresita del N.J.
1º Suplente: Prof. Aramburo Pérez Gerardo
2º Suplente: Prof. García Galán Sergio.

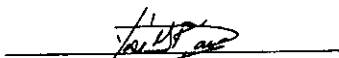
Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de ensayos mecánicos del edificio "D", Facultad de Química, UNAM.



M. en Ing. Teresita del N.J. Robert Nuñez

Asesor del Tema.


I.Q.M. J. Guadalupe Ramírez Vieyra

Supervisor Técnico



Rubén Saldivar Guerrero

Sustentante

AGRADECIMIENTOS

A ti Señor por ser mi ayuda y fortaleza en cada día de mi vida.

A mi Papá:

Como una muestra de cariño y por el esfuerzo y apoyo incondicional que me has brindado para lograr una de las metas mas grandes de mi vida.

A mi Abuelita:

Por ser como una madre para mí, quién me enseñó el amor y cariño hacia los demás y por sus consejos y enseñanzas que quedaron grabados en mi corazón.

A Micky:

Por todos los momentos que hemos compartidos juntos a lo largo de nuestra vida, y por ser un gran hermano y amigo.

A mi hermanito:

Por ser la alegría de la casa.

En especial agradezco ampliamente la paciencia y ayuda de mi maestra Teresita Robert N. para la elaboración de esta tesis.

A José G. Rodriguez V. por ayudarme a realizar las pruebas de este trabajo.

A mis profesores y compañeros que a lo largo de la carrera me brindaron su amistad y apoyo, en especial el Dr. Miguel Martínez M.

A mi novia, ahora mi esposa Vero, por su incomparable apoyo y ayuda incondicional.

INDICE

RESUMEN.	pág.
	1.
OBJETIVOS.	2.
CAPÍTULO 1	
- INTRODUCCIÓN	3.
CAPÍTULO 2	
- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	5.
<i>Compresión de Anillos</i>	7.
<i>Curvas Esfuerzo-deformación</i>	8.
<i>Diagramas para Carga y Descarga Sucesivas</i>	14.
<i>Prueba de Compresión</i>	16.
<i>Comparación del ensayo de tracción y el ensayo de compresión</i>	18.
<i>Influencia del Coeficiente de Fricción y la Geometría de las Probetas</i>	18.
CAPÍTULO 3	
- DESARROLLO EXPERIMENTAL	25.
<i>Material</i>	25.
<i>Tratamiento Térmico</i>	28.
<i>Experimentación</i>	28.
CAPÍTULO 4	
- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30.
<i>Curvas Esfuerzo-Deformación</i>	30.
<i>Coeficiente de Fricción</i>	40.

CAPÍTULO 5	
- CONCLUSIONES	43.
ANEXO A	44.
ANEXO B	45.
ANEXO C	47.
BIBLIOGRAFÍA	50.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia el comportamiento del acero inoxidable 316 en el ensayo de compresión, bajo distintas condiciones geométricas de la probeta, y utilizando distintos acabados superficiales, tanto en los cilindros como en las placas compresoras. Dicho estudio se llevó a cabo con la finalidad de proponer las condiciones adecuadas para la prueba de compresión, que reproduzcan la curva esfuerzo-deformación de una prueba de tracción y de esta forma obtener la misma información mecánica que el ensayo tensil nos da. Sabiendo que la prueba de compresión no está normalizada, sugerir así, la forma correcta de realizar esta prueba, la cual aparentemente es menos complicada de realizar. Para obtener dichas condiciones, se llevaron a cabo diversas pruebas en las que se utilizaron las relaciones altura/diámetro (H/D), de 1.0, 1.5, 2.0, y 2.5; además las probetas y las placas fueron pulidas con lijas 120, 240, 600, y 1200, para proporcionar diferente fricción entre la probeta y la herramienta. Se realizó también la prueba de tracción para poder compararla con la de compresión. De la comparación de los datos experimentales se obtiene lo siguiente:

1. Solo se puede reproducir la curva esfuerzo-deformación de compresión, similar a la de tracción, hasta el punto de fluencia del material; más allá de éste punto los valores de esfuerzo compresivo se elevan demasiado.
2. La forma geométrica de la probeta en compresión, que mejor reproduce la curva esfuerzo-deformación de tracción, es la relación H/D de 2.0, a cualquier acabado superficial utilizado en éste estudio; sin embargo al tomar en cuenta la rigidez de la máquina en los resultados, no se observa ninguna variación dentro de las diferentes relaciones H/D utilizadas.
3. Las curvas esfuerzo-deformación prácticamente no varían para una misma relación H/D , utilizando distintos acabados superficiales; por el contrario, la variación para un mismo acabado superficial, variando la relación H/D , es clara por lo que se pudieron obtener relaciones matemáticas que nos predicen la variación que existe tanto para el módulo de elasticidad (E), así como para el coeficiente de endurecimiento (n), en función de H/D .

OBJETIVOS.

1. Obtener las condiciones adecuadas en el ensayo de compresión, que puedan reproducir el comportamiento ante el esfuerzo de tracción para acero inoxidable AISI 316.
2. Determinar, en base a los resultados obtenidos, relaciones matemáticas que sean validas para predecir el comportamiento de propiedades mecánicas y su relación con las dos variables utilizadas, fricción y relación Altura/Diámetro.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Los materiales metálicos, siempre han sido para el hombre una valiosa herramienta en el desarrollo tecnológico e industrial desde su descubrimiento; con éste tipo de materiales se construye la mayor parte de la maquinaria y herramientas, constituye parte fundamental en la construcción, en la orfebrería, etc; sin embargo para obtener un material metálico útil, se requiere de una serie de procesos importantes para su obtención, desde la búsqueda del mineral, su extracción y refinación, por citar los más importantes. Pero una vez obtenido éste metal, aún no es útil puesto que se necesita darle la forma adecuada que resuelva la necesidad que en su momento se tiene, para lo cual se requiere de los procesos de conformado mecánico que darán al material las formas y dimensiones requeridas.

En éste paso, las fuerzas involucradas para su manufactura son muy importantes, debido a que de éstas depende la carga que será aplicada al material para su terminado final. Dentro de las fuerzas involucradas además de la fuerza necesaria para hacer fluir el material, existe la fuerza de fricción entre las superficies de contacto pieza- herramienta.

Debido a la presencia de la fricción la eficiencia en la maquinaria disminuye bastante. Por ésta razón es importante estudiar la influencia de la fricción en el esfuerzo de fluencia de los materiales. Los métodos para determinar el coeficiente de fricción deben reproducir, los mas posible, las condiciones reales de operación de un sistema. La prueba de compresión de anillos, la cual se utiliza en este trabajo, satisface estos requerimientos y los valores obtenidos son aplicables a procesos de conformado mecánico tales como forja y estampado.

El presente trabajo de investigación forma parte de un proyecto creado para determinar el efecto que tiene la fricción, así como la variación geométrica de la probeta en el ensayo de compresión, tratando así de encontrar una normatividad de esta prueba, la cual aparentemente es mas fácil de realizar; sin embargo, en este trabajo veremos que resulta más difícil el ensayo de compresión que el de tracción debido a la rigidez de la máquina que se presenta en ésta prueba. El material que se utiliza para este estudio es acero inoxidable de la serie AISI 316.

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las características fundamentales de un material dúctil, desde el punto de vista de conformado mecánico, es la relación entre el grado de deformación (strain) y la carga por unidad de área (stress). [1]

Contrariamente al ensayo de tracción, en el cual la resistencia a la tracción es prácticamente independiente de la longitud de la probeta, la forma de la curva esfuerzo-deformación en compresión es altamente influenciada por la fricción entre el terminado superficial de la probeta y las placas compresivas.[1]. Las figuras 1a y 1b muestran los diagramas esfuerzo-deformación de probetas cilíndricas a varias relaciones altura/diámetro (H/D) iniciales, (de acuerdo a Cook and Larke), comprimidas entre herramientas relativamente ásperas y muy lisas. [2]

En éstas gráficas observamos que la curva esfuerzo-deformación se desplaza hacia arriba cuanto más ásperas son las superficies de contacto, esto nos indica que existe un gasto mayor de energía al tratar de deslizar las probetas en las placas compresivas, dicho gasto energético es debido a la presencia de una fuerza paralela a las superficies en contacto que se oponen al movimiento relativo de los cuerpos, (probeta y placas compresivas). Esta fuerza se conoce como fuerza de fricción o rozamiento. [3]

La fuerza de fricción es igual a la fuerza normal aplicada al cuerpo, pero que varía por una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de fricción (μ). Una forma de caracterizar la fricción es precisamente con el coeficiente μ , al cual podemos definirlo de acuerdo a la primera ley de Leonardo da Vinci [4], como:

$$\mu = \frac{F/A}{P/A} = \tau/\sigma \quad \text{Ec. 2.1}$$

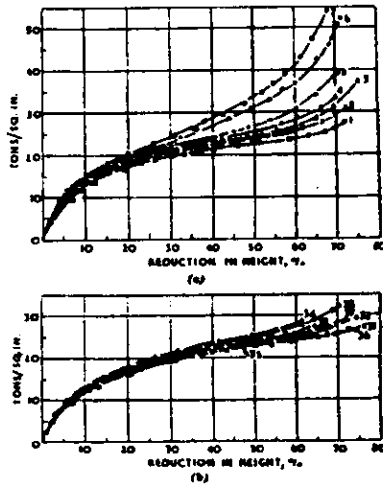


Figura 1. (a) Curvas de compresión para cilindros de cobre, teniendo un diámetro de 0.5 in.; y varias alturas, comprimidas entre herramientas ásperas. (b) Curvas de compresión para cilindros de cobre, comprimidas entre herramientas lisas.[2]

donde:

F = Es la fuerza necesaria para mover al cuerpo.

P = Es la fuerza normal.

A = Es el área aparente.

τ = Es el esfuerzo cortante interfacial.

σ = Es el esfuerzo normal, presión.

μ = Es la fricción promedio

Otra forma de caracterizar a la fricción es mediante el factor de esfuerzo cortante interfacial o factor m. Este factor representa una fracción de la tensión de fluencia de corte, k, el cual se utiliza especialmente en procesos de conformado de metales y está definido por:

$$m = \tau / k \quad \text{Ec. 2.2}$$

El factor m, es también muy utilizado en procesos de conformado en caliente los cuales involucran altas deformaciones.

Existen varios métodos para la determinación del coeficiente de fricción tales como: Plano inclinado, la prueba cabrestante y el deslizamiento horizontal de un material sobre otro. Dentro de éste último grupo de pruebas, se tiene la compresión uniaxial de una muestra entre placas paralelas, tal como compresión de anillos. Este método para la determinación del coeficiente de fricción es el que será utilizado en éste trabajo y es descrito a continuación.

COMPRESION DE ANILLOS

La compresión de anillos es comúnmente usada para determinar el coeficiente de fricción en la prueba de compresión. En ésta prueba la variación en el diámetro interno, al disminuir la altura, es función de la fricción existente entre las placas compresoras y la muestra; ésta característica nos permite asignar un valor numérico a dicha variación. Con ayuda de las cartas de calibración publicadas por varios autores,[1 y 4], se obtiene el coeficiente ó factor de fricción de una muestra problema localizando en dichas cartas el porcentaje de variación del diámetro interno y el porcentaje de deformación, ambos obtenidos experimentalmente, y leyendo el valor de fricción en la curva de la carta que coincida con la curva problema.

La primera carta de calibración, para anillos de relación 6:3:2, (diámetro exterior:diámetro interior:altura), la determinaron experimentalmente Male y Cockroft; graficando el porcentaje de variación del diámetro interno en función de la reducción de altura para varios valores de coeficiente de fricción. Los valores extremos son $\mu = 0.57$ (fricción adherente), y $\mu = 0.0$ (fricción deslizante), ver anexo A.

Otro método para calibrar la prueba de anillos de compresión es el representado por Avitzur, quien plantea matemáticamente un patrón de deformación admisible cinemáticamente, esto es, que satisface el requerimiento de constancia de volumen y las condiciones geométricas de la frontera. También deriva la existencia de un radio neutro que limita las regiones de flujo radial hacia adentro y hacia afuera de la muestra. Hawkyard y Jonhson verificaron el trabajo hecho por Avitzur empleando el método de análisis de esfuerzos.[4]

CURVAS ESFUERZO-DEFORMACION

En la mecánica de los sólidos es de primordial importancia el comportamiento de materiales reales en condiciones de carga. Los experimentos, principalmente ensayos a tensión o a compresión, proporcionan la información básica acerca de éste comportamiento. En ellos, el comportamiento en conjunto, o macroscópico, de especímenes se utiliza para formular leyes empíricas o fenomenológicas. Tales formulaciones se denominan leyes constitutivas o relaciones constitutivas.

De acuerdo a lo anterior, es evidente que para propósitos generales es más importante conocer la deformación relativa de una barra en tensión o compresión, que el alargamiento total sufrido en su longitud de medición. De igual modo, el esfuerzo es un parámetro más significativo que la fuerza, puesto que el efecto de una fuerza aplicada P en un material depende principalmente del área transversal del elemento al que se aplica. Como consecuencia, en el estudio experimental de las propiedades mecánicas de los materiales se acostumbra construir gráficas de la relación entre esfuerzo y deformación en una prueba particular. Para fines prácticos tales diagramas se suponen independientes del tamaño de la probeta y de su longitud de medición; sin embargo no siempre ocurre así, por lo que es necesario saber cómo influye la geometría de la probeta en la curva esfuerzo-deformación. En tales diagramas se utiliza el eje de ordenadas para el esfuerzo y el de las abscisas para la deformación.

Los diagramas esfuerzo-deformación que se determinan en forma experimental varían mucho según los distintos materiales. Aún para el mismo material difieren según la temperatura a que se efectúe el ensaye, la velocidad de la prueba y cierto número de otras variables. Sin embargo, por lo general dos tipos de diagramas resultan de los experimentos a temperaturas constantes que se realizan en materiales que no presentan dependencia del tiempo. Un tipo, característico del acero dulce y algunos otros materiales, se muestran en la figura 2a, [5]. A diversos materiales como el acero de herramientas, el concreto y el cobre corresponden las formas generales de las dos curvas

superiores, aunque son muy diferentes los valores extremos de deformación que éstos materiales pueden resistir.

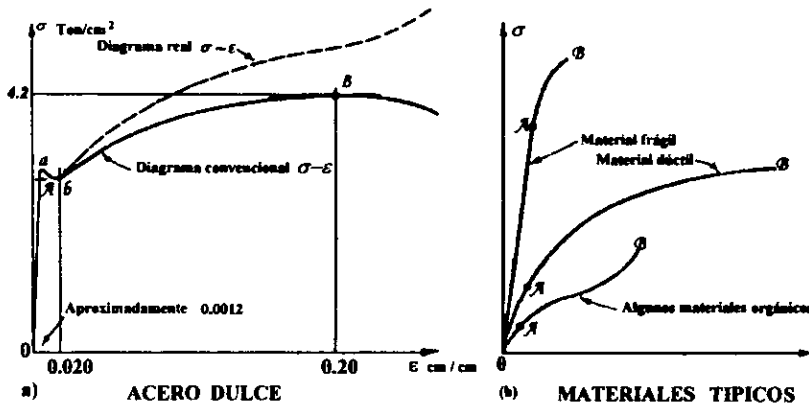


Figura 2.

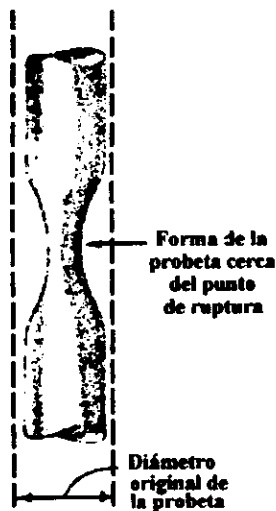
Numéricamente hablando, cada material tiene su propia gráfica. El punto final de una gráfica esfuerzo-deformación corresponde a la falla completa (ruptura) de una probeta. Los materiales capaces de resistir grandes deformaciones se llaman materiales dúctiles. Contrariamente a los materiales frágiles, los cuales soportan deformaciones pequeñas.

Por lo general los esfuerzos se calculan con base en el área transversal original de una probeta; frecuentemente tales valores de esfuerzo se llaman esfuerzos convencionales o de ingeniería. La forma de calcular dichos esfuerzos, siempre y cuando la fuerza aplicada sea perpendicular al área transversal, es la siguiente:

$$\sigma = P / A_0 \tag{Ec. 2.3}$$

Por otra parte se sabe que en un material siempre ocurre contracción al ser sometido a tracción. Este efecto llamado estricción, es particularmente notable en el caso del acero dulce, especialmente cerca del punto de ruptura, fig 3. Los materiales frágiles no presentan tal efecto a temperaturas ordinarias, aunque también se contraen un poco transversalmente en un ensayo a la

tensión y se expanden en uno a la compresión. Dividiendo la fuerza aplicada entre el área transversal real correspondiente al instante en el que se aplica, se obtiene el llamado esfuerzo real. Una gráfica del esfuerzo real en función de la deformación recibe el nombre de diagrama real esfuerzo-deformación, fig. 2a, [5]



Contracción típica de una probeta de acero dulce cerca del punto de ruptura.

Figura 3

Se deben observar varios aspectos importantes en relación con los diagramas esfuerzo-deformación. Uno de los más importantes pertenece al punto A, de la fig. 2. Dicho punto está sobre una recta que parte del origen y sigue estrechamente la trayectoria de la gráfica esfuerzo-deformación. El punto A se denomina límite de proporcionalidad del material. La pendiente de la recta O hasta A es el módulo elástico E. Para esfuerzo uniaxial, cuando todos los esfuerzos, salvo uno el normal, son nulos, E es una constante de proporcionalidad que relaciona éste esfuerzo normal con su deformación lineal. De acuerdo a:

$$\sigma_{(x)} = E \epsilon_{(x)}$$

Ec. 2.4

Donde:

$\sigma_{(x)}$ = Esfuerzo normal

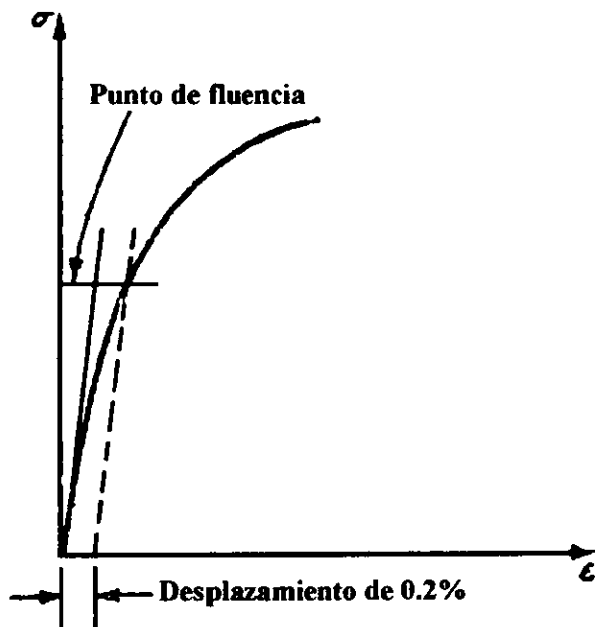
E = Módulo de elasticidad

$\epsilon_{(x)}$ = Deformación del material

Matemáticamente E es la pendiente de una recta en un diagrama esfuerzo-deformación. Las unidades usuales son Kg/cm² ó Ton/cm². Físicamente E representa la rigidez del material a una carga impuesta. [6]

Para todos los materiales reales, al menos a cierta distancia desde el origen y con un grado suficiente de exactitud, los valores experimentales de esfuerzo Vs. deformación están esencialmente sobre una línea recta. Esto se verifica casi sin reservas en el caso del vidrio. Es válido para el acero dulce hasta cierto punto, tal como el punto A de la fig. 2a. Se cumple casi exactamente cerca del punto de falla de muchos aceros de aleación de alto grado. En cambio, la parte recta de la gráfica difícilmente existe en el caso del concreto, el cobre recocido o el hierro colado. No obstante, hasta cierto punto, se puede decir que la relación entre esfuerzo-deformación es lineal para todos los materiales. Esta idealización y generalización es la base de la ley de Hooke. Por tanto, dicha ley se aplica sólo hasta el límite de proporcionalidad del material. [6]

Los puntos máximos en los diagramas para tracción (tal como B en la figura 2a y 2b), corresponden a la última resistencia de un material. El esfuerzo correspondiente a la meseta ab, de la gráfica en la figura 2a, se denomina punto de fluencia del material. En este punto una gran deformación se produce a esfuerzo constante, este fenómeno se da únicamente en materiales dúctiles.

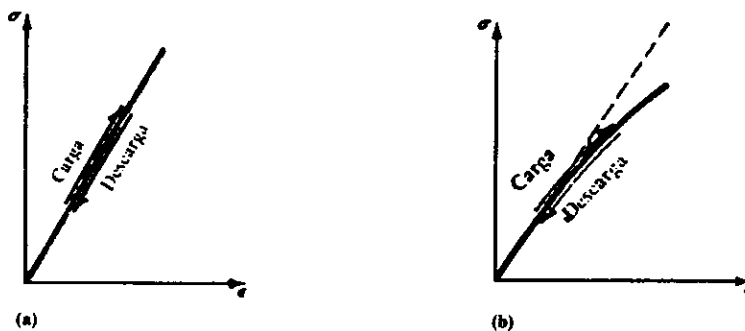


Método del desplazamiento para determinar el punto de fluencia de un material.

Figura 4

Un estudio de los diagramas esfuerzo-deformación muestra que el punto de fluencia esta tan cerca del límite de proporcionalidad que para la mayoría de los casos ambos pueden considerarse uno solo. Sin embargo, es mucho más fácil localizar el primero. Para materiales que no tienen un punto de fluencia bien definido, éste se determina convencionalmente utilizando el llamado método del desplazamiento. Esto se ilustra en la fig. 4, donde una recta desplaza una distancia arbitraria correspondiente al 0.2% de deformación, se traza paralela a la porción rectilínea de la gráfica inicial esfuerzo-deformación. El punto C se toma como el punto de fluencia del material, con un desplazamiento de 0.2%. [5]

Finalmente debe darse la definición técnica de la elasticidad de un material. Esto significa que un material es capaz de recuperar por completo sus dimensiones originales al suprimir las fuerzas que se aplican, es decir, que el cuerpo recobra completamente su forma original, [6]. Por tanto, el comportamiento elástico implica la ausencia de cualquier deformación permanente. Algunos materiales elásticos presentan una relación esencialmente lineal entre esfuerzo y deformación fig. 5(a), y se llaman materiales linealmente elásticos. Otros materiales elásticos, fig. 5(b), presentan curvatura en su diagrama esfuerzo-deformación. Estos reciben el nombre de materiales no linealmente elásticos. En el caso de los materiales linealmente elásticos, el límite de elasticidad corresponde al límite de proporcionalidad.



Materiales elásticos: (a) Lineal, (b) no lineal.

Figura 5

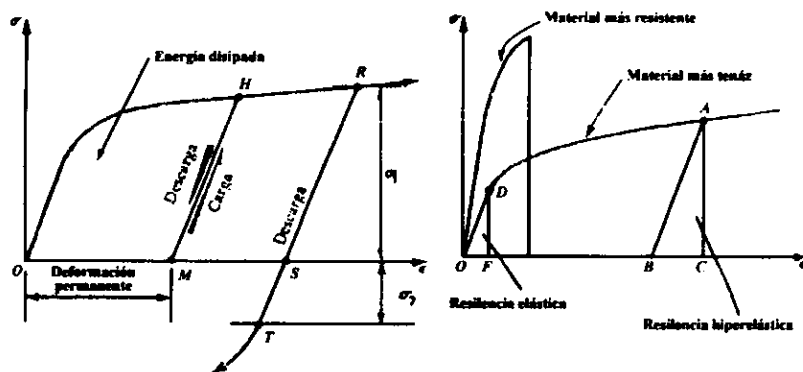
DIAGRAMAS PARA CARGA Y DESCARGA SUCESIVAS

Los materiales inelásticos y plásticos presentan un fenómeno importante si su carga no se aumenta monótonamente. Durante un proceso de liberación de carga, (caracterizado por una recta como la HM de la figura 6a.), el resultado es una descarga linealmente elástica, según el módulo de elasticidad del material original, aunque se observa una deformación permanente. Al cargarlo de nuevo, el material se comporta otra vez en forma linealmente elástica y puede llegar de nuevo al punto H. Mas allá de éste punto, si el material se vuelve a cargar, se produce la continuación de la curva original. Al ser descargado en R, el material sigue de nuevo una línea recta hasta S, condición de carga cero, y luego prosigue hasta T si se carga en sentido contrario. Hay que notar que la ordenada absoluta de T es menor que la de R. Este efecto típico fue observado por primera vez por Bauschinger y lleva su nombre.[6] De acuerdo con la ecuación $dU/dV = U_0 = \sigma_x \epsilon_x$ en el caso de un material linealmente elástico en un estado de esfuerzo uniaxial, la energía de deformación por unidad de volumen U_0 , es:

$$U_0 = \sigma_x^2 / 2E \quad \text{Ec. 2.5}$$

Sustituyendo en esta ecuación el valor del esfuerzo en el límite de proporcionalidad se tiene un índice de la capacidad del material para almacenar o absorber energía sin deformación permanente. La cantidad que así se determina recibe el nombre de módulo de resiliencia y se utiliza en la selección de materiales para aplicaciones en que tenga que haber absorción de energía por parte de elementos mecánicos. Por ejemplo, el acero con un límite de proporcionalidad de 450 Kg/cm^2 y un E de $1.34 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$, tiene un módulo de resiliencia de:

$$(450)^2 / 2(1.34 \times 10^5) = 0.76 \text{ Kg cm/cm}^3 \quad \text{Ec. 2.6}$$



Algunas propiedades típicas de los materiales.

Figura 6.

Por razonamientos análogos a los anteriores, el área bajo una gráfica completa esfuerzo-deformación, fig. 6b, da una medida de la capacidad del material para resistir una carga de energía hasta que sobrevenga su ruptura; dicha capacidad recibe el nombre de tenacidad. Cuanto mayor sea el área total bajo la curva esfuerzo-deformación, tanto mayor será la tenacidad del material. En el intervalo inelástico, solo es recuperable una pequeña parte de la energía que absorbe el material. La mayor parte de la energía se disipa en la deformación permanente del mismo, la energía que se puede recuperar cuando una probeta se esfuerza hasta un punto como el A o el D, fig. 6b, está representada por los triángulos ABC y DOF, respectivamente. La recta AB del triángulo ABC es paralela a la línea elástica OD. Las áreas limitadas por los triángulos respectivos, como se aplica en la figura, representan la resiliencia elástica y la resiliencia hiperelástica del material. [5]

PRUEBA DE COMPRESIÓN

La prueba de compresión se utiliza principalmente para ensayar materiales quebradizos tales como piedras, hormigón y fundición; aunque también es muy utilizada para metales no ferrosos. Para piedras y hormigón se utilizan corrientemente probetas cúbicas, y para metales de forma cilíndrica; al comprimir las entre las superficies planas de la máquina de ensayos se supone corrientemente que la fuerza compresora se distribuye uniformemente sobre la sección. La distribución real de fatigas es mucho más complicada, aunque las superficies estén en contacto perfecto. Debido al rozamiento entre las superficies de contacto: la probeta y el cabezal de la máquina, el material bajo compresión no se expande homogéneamente. Consecuencia de ello es que en las probetas cilíndricas de metales se presenta un abarrillamiento. Por lo que para obtener la verdadera resistencia a la compresión del material, debe eliminarse o reducirse al mínimo la influencia del rozamiento entre las superficies de contacto.

Una forma de eliminar el efecto de la fuerza de rozamiento (fricción), consiste en el empleo de probetas prismáticas cuya altura en la dirección de la compresión es varias veces mayor que las dimensiones laterales. La parte central del prisma está sometida a compresión uniforme. En la figura 7 es ilustrado un método interesante de producir compresión uniforme en probetas cilíndricas, usado por el Kaiser Wilhelm institute. [6]

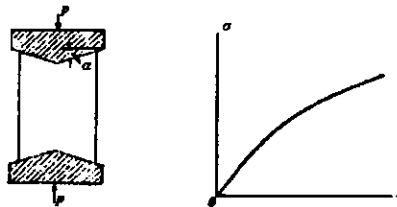


Figura 7

En esta prueba la influencia del rozamiento se compensa con el efecto cuña y resulta una compresión uniforme.

Los ensayos de compresión con materiales dúctiles muestran que la forma del diagrama depende ampliamente de las dimensiones de la probeta. A medida que disminuye la altura de la muestra debido a la compresión, el efecto del rozamiento en las cabezas es más y más importante y el diagrama esfuerzo-deformación se endereza. La figura 8 muestra los resultados de ensayos a compresión con cilindros de cobre para diversas relaciones diámetro/altura (D/H) de la probeta, [1]. En los ensayos a compresión de materiales dúctiles, como por ejemplo, cobre, aluminio y algunas de sus aleaciones, rara vez se produce rotura; la compresión viene acompañada de una expansión lateral y el cilindro comprimido toma, por último, la forma de un disco. [6]

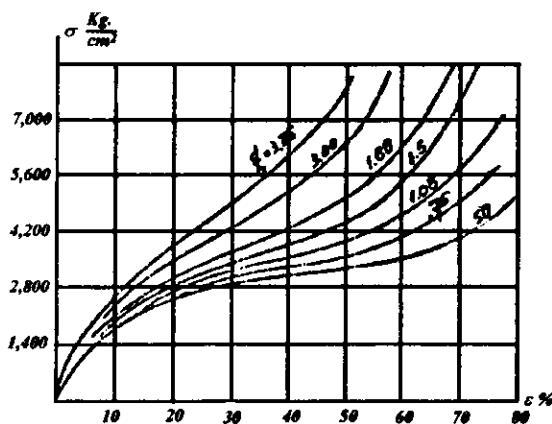


Figura 8

COMPARACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN Y EL ENSAYO DE COMPRESIÓN

Para la mayoría de los materiales, los diagramas esfuerzo-deformación que se obtienen mediante compresión son razonablemente iguales a los que se obtienen en tensión. Sin embargo, para algunos materiales los diagramas difieren considerablemente, según el sentido de la fuerza que se aplique. Por ejemplo el hierro colado y el concreto son muy débiles a tensión pero no a compresión, por lo que son muy usados en la construcción. [5]. Por otra parte estos diagramas presentan una variación considerable después del punto de fluencia del material. Para el caso de compresión la curva se eleva ya que requiere de una fuerza extra para hacer fluir el material que hace contacto con las placas de compresión, esta fuerza varía en función de el acabado superficial entre la probeta y las placas compresoras, o lo que es lo mismo, depende de la fricción existente, situación que no prevalece en la prueba de tracción; sin embargo, en la región elástica las propiedades mecánicas que se obtienen son iguales ya que el modulo de elasticidad y el punto de fluencia para un mismo material no varía, ya sea que se comprima o se someta a tensión.

INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN Y LA GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS

Desde aproximadamente a principios de siglo se ha estudiado el comportamiento del esfuerzo en función de la deformación de un material en un ensayo de compresión uniaxial haciendo variar la relación H_0/D_0 (altura inicial/diámetro inicial), y la aspereza de las placas compresivas. Pese a que se han obtenido grandes avances al respecto, no se ha hecho un estudio claro entre la relación que pueden tener las propiedades mecánicas, tales como modulo de Young, resistencia a la compresión, punto de fluencia, etc. Se hará una revisión de investigaciones previas resaltando los puntos mas importantes encontrados por diversos autores.

Un primer escrito publicado por N.H. Polakowski, data de 1949, [1]. En el cual encontramos las deducciones hechas por Rummel and Meyer and Nehl, quienes asumen que si la compresión de piezas dúctiles fueran hechas entre placas del mismo material y diámetro, éstas se podrían extender con la pieza de trabajo eliminando de ésta forma el efecto de fricción y aún mas, el efecto de abarillamiento, teniendo deformación uniaxial. La forma de realizar este tipo de ensayo se muestra esquemáticamente en la figura 9.

Algunos inconvenientes y restricciones son que el efecto de no abarillamiento se mantiene hasta que la zona en forma cónica deformada adyacentemente a la superficie de la herramienta alcanza el contacto en la cara C, fig. 9. Subsecuentemente el cono podría penetrar a la pieza de trabajo haciendo el efecto de cuña. De ésta forma la máxima deformación que se puede obtener es 39.5% sin abarillamiento para piezas de 15 y 20mm de altura, debido a que a una relación H_0/D_0 mayor a 2.5 es extremadamente inestable al tratar de comprimir tres piezas del mismo diámetro.

Otros inconvenientes que tiene éste método es que realmente no sucede como se muestra en la figura 9; en realidad las superficies de la pieza de trabajo forman concavidades que hacen que el esfuerzo aplicado no sea homogéneo en todo el cuerpo del cilindro, fig. 10.

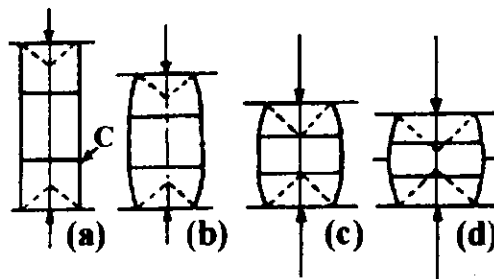


Figura 9. Pasos de deformación de tres probetas superpuestas, según Meyer y Nehl. [9]

Sin embargo las observaciones hechas por Meyer y Nehl son que el limite de elasticidad en compresión de cobre se eleva conforme aumenta la relación H_o/D_o . [9]

Por otra parte Siebel, [10], deduce una fórmula basada en consideraciones simplificadas las cuales relacionan el esfuerzo real compresivo S , el esfuerzo de fluencia S_o , a la relación D_o/H_o , al ángulo de fricción ϕ y al ángulo de base α de la probeta mostrada en la figura 11:

$$S = S_o [1 + D_o/3H_o \tan (\phi - \alpha)] \quad \text{Ec. 2.7}$$

Si $\phi = \alpha$, la porción derecha de la expresión en paréntesis es cero y $S = S_o$, éste método es frecuentemente recomendado por ser muy seguro; además los datos son aceptados, pero algunas veces los resultados son engañosos.

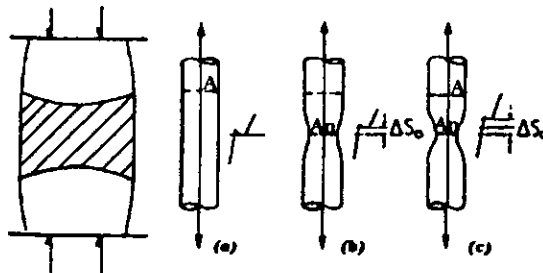


Figura 10. A la izquierda, tres muestras con aproximadamente 35% de deformación. A la derecha, el efecto de estricción en la prueba de tracción. (10).

La técnica del ensayo es muy complicada debido a que se necesita de un maquinado especial así como de complicados conos como placas compresivas para disminuir al máximo la fricción entre las herramientas y pieza de trabajo; además la altura real de la pieza de trabajo no puede ser satisfactoriamente determinada debido a la conicidad de la probeta, Siebel asume que $h = (h_o + h_i) / 2$, en donde existe un pequeño error, el cual se incrementa con la compresión. Para

guardar el error dentro de un límite razonable fue necesario maquinar la periferia de la probeta después de 35 - 38% de deformación para regresar a la relación inicial de H_0/D_0 .

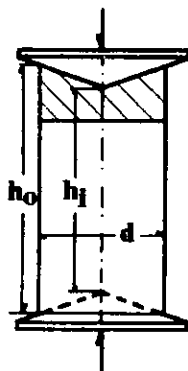


Figura 11. Probeta con terminación en forma de cono. [10]

En este ensayo se observó que la fricción en la superficie cónica decrece hacia arriba del vértice, por lo que podría ser usado para obtener una mejor aproximación al estudio en cuestión; sin embargo este método difícilmente es recomendado debido a las complicaciones que pueden surgir en la práctica.

El uso de conos con un ángulo constante tendrá serias consecuencias. Aunque la forma externa sería aproximadamente cilíndrica, la deformación no puede ser considerada homogénea debido a que el ángulo necesario para eliminar el efecto de la fricción es muy grande y la punta del cono actúa como una cuña penetrante en la pieza de trabajo, fig. 12. La forma no cilíndrica e irregular en la pieza comprimida es causada por el equilibrio inestable entre los esfuerzos axial y radial, la resistencia del material a deformarse y la fricción variante en la superficie del cono.

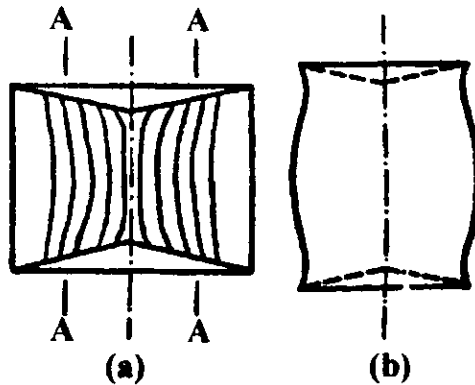


Figura 12. Efecto de cuña en una probeta con terminados en forma cónica. [10]

Taylor y Quinney, determinaron la curva de esfuerzo de fluencia para cobre con aproximadamente 89% de deformación comprimiendo un cilindro con relación inicial $H_0/D_0 = 1.0$. La carga fue aplicada en pequeños incrementos, removiendo la probeta y engrasando sus caras después de cada carga. Después de 40% de reducción, la probeta fue maquinada para reducir el diámetro y disminuir el efecto de fricción. Esto se repitió tres veces. Ellos encontraron que el esfuerzo de fluencia se incremento a un máximo de 60,000 lb/in², para un 78% de deformación, manteniéndose prácticamente constante en el resto de compresión. [1]

Los resultados obtenidos por Taylor y Quinney son claros y convincentes, aunque no dan una explicación lógica a sus resultados, el motivo del alto incremento en el esfuerzo se debe al endurecimiento por deformación del material y por el maquinado de la probeta. Este es un método muy laborioso y poco aplicable debido a que es necesario maquinar muchas veces en una misma probeta para el mismo ensayo.

Cook y Larke, [2], desarrollaron un método experimental basado en los ensayos y consideraciones de Sachs. Ellos observaron que cuando un número de cilindros de igual diámetro pero de varias alturas, son comprimidos, las curvas apropiadas de esfuerzo-deformación convergen hacia un limite mas bajo si la relación H_0/D_0 se incrementa. El método

es indirecto, puesto que los resultados finales son obtenidos por extrapolación de las curvas experimentales. La falla de esta prueba es que los valores finales son considerablemente mas bajos que aquellos obtenidos por cualquier otro método, solamente los resultados para cobre son comparables.

Si un conjunto de curvas esfuerzo-deformación (cuatro curvas), de diferente relación Ho/Do, determinadas en ensayos de compresión plana, fuesen cortadas por series de verticales representando deformaciones y esfuerzos correspondientes a los puntos de intersección (fig. 13), y se graficasen nuevamente en función de Ho/Do, las curvas de deformación constante pueden ser construidas como se muestra en la figura 14. Estas gráficas representarían los esfuerzos necesarios para producir deformaciones dadas en una infinidad de relaciones Ho/Do., tal extrapolación es algunas veces arbitraria, especialmente en el rango de alta deformación.

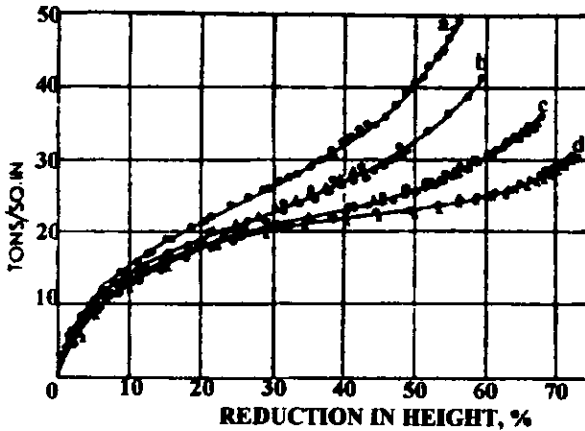


Figura 13. Curvas de compresión a varios valores de d/h . a) 3.0, b) 2.0, c) 1.0 y d) 0.5. [2]

Uno de los objetivos de éste trabajo es precisamente determinar si hay alguna dependencia entre las propiedades mecánicas y la relación H/D del material; aunque en és caso vamos a utilizar únicamente acero inoxidable 316, por lo que los resultados pueden ser totalmente diferentes a los obtenidos por Cook y Larke, [1]

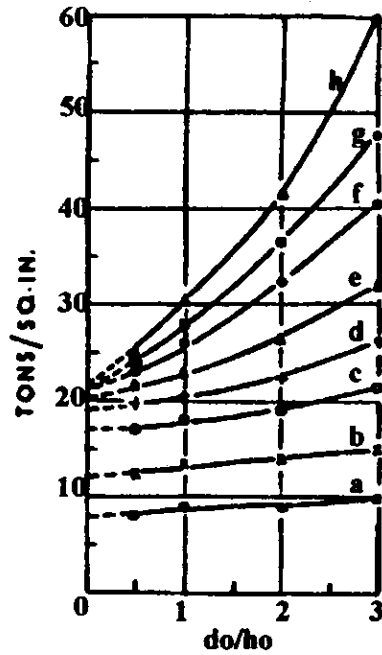


Figura 14. Relación entre d/h y el esfuerzo para varios valores de % reducción de altura: a) 5%, b) 10%, c) 20%, d) 30%, e) 40%, f) 50%, g) 55% y h) 60%. [2]

CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta parte se llevan a cabo una serie de pruebas de compresión variando la geometría de las probetas y el acabado superficial de las mismas, además de realizar para el mismo material el ensayo de tracción con el cual se compararan las de compresión. Para poder cuantificar de alguna forma la fricción que prevalece entre las placas compresivas y la probeta de compresión se utiliza el método de compresión de anillos para determinar el coeficiente de fricción. Las pruebas mencionadas anteriormente se realizan bajo las siguientes condiciones:

MATERIAL.

Las probetas cilíndricas y los anillos de compresión, así como las probetas de tracción fueron hechas de acero inoxidable 316, el cual tiene la siguiente composición química nominal:

% C	= 0.0
% Si	= 1.0
% Mn	= 2.0
% Cr	= 16.0 - 18.0
% Ni	= 10.0 - 14.0
% Mo	= 1.75 - 2.5

a) Cilindros de compresión.

Para el ensayo de compresión se prepararon cilindros con cuatro diferentes alturas, manteniendo el diámetro constante, con lo que se varía la relación altura/diámetro. Las dimensiones de las probetas se muestran en la tabla 1.

Tipo de probeta	Diámetro D (mm)	Altura H (mm)	Relación H/D	Número de probetas
Cilíndrica	12.55	12.55	1	8
Cilíndrica	12.55	18.8	1.5	8
Cilíndrica	12.55	25.1	2	8
Cilíndrica	12.55	31.7	2.5	8

TABLA 1

Todas las probetas fueron pulidas con distintas lijas para darle un acabado superficial diferente, el tipo de lijas y el acabado superficial se muestran en la tabla 2.

Relación H/D	Superficie Áspera	Superficie Regular	Superficie Fina	Superficie muy Fina
1	Lija No. 120	Lija No. 240	Lija No. 600	Lija No. 1200
1.5	Lija No. 120	Lija No. 240	Lija No. 600	Lija No. 1200
2	Lija No. 120	Lija No. 240	Lija No. 600	Lija No. 1200
2.5	Lija No. 120	Lija No. 240	Lija No. 600	Lija No. 1200

TABLA 2

Se elaboraron 32 probetas cilíndricas como resultado de cuatro diferentes relaciones altura/diámetro y cuatro distintos acabados superficiales; además de que todos los ensayos fueron hechos por duplicado para garantizar resultados confiables y reproducibles.

b) Placas

Al igual que los cilindros, se pulieron también las placas compresoras de acero para herramientas tipo O1 dándole el mismo acabado superficial de áspera, regular, fina y muy fina, preparándose por lo tanto cuatro diferentes pares de placas correspondientes a las superficies antes mencionadas.

c) Anillos de compresión.

Los anillos de compresión se prepararon con la finalidad de determinar el coeficiente de fricción en la interfase placa-probeta, por lo que el acabado superficial de éstos es el que proporcionan las distintas lijas utilizadas para los cilindros y las placas. La relación utilizada para la elaboración de los anillos fue 6 : 3 : 2 ; por lo cual se utilizó la curva de calibración de Male y Cockroft, quienes utilizan la misma relación de anillos, (Anexo A). Se prepararon ocho anillos con las siguientes dimensiones:

Diámetro exterior	12.17 mm
Diámetro interior	6.3 mm
Altura	4.23 mm

d) Probeta de tracción

La probeta de tracción fue hecha conforme a la norma ASTM E8 - 93, la cual tiene las siguientes características:

Dimensiones de la probeta de tracción:

Redondo	= 8.89 mm
Longitud calibrada	= 35.56 mm \pm 0.13 mm
Diámetro	= 8.89 mm \pm 0.18 mm
Radio de la zona de transición	= 9.53 mm
Longitud de la sección reducida	= 44.45 mm

TRATAMIENTO TÉRMICO

Debido al maquinado que se realiza en el material, es posible que exista concentración de esfuerzos o precipitación de segundas fases en su estructura, por lo que todas las piezas maquinadas fueron sometidas a un tratamiento térmico para disolver las posibles fases precipitadas, sobre todo carburos, y para relevar esfuerzos en el material. Este tratamiento térmico consistió en calentar el acero a una temperatura de 905°C manteniéndolo así por 15 minutos, enfriándolo súbitamente en agua. La alta temperatura que se utiliza es debido a que la serie de aceros inoxidable austeníticos tienen alta resistencia a la liberación de esfuerzos residuales, así como a la relevación de los mismos, además que a temperaturas entre 480 y 815 °C hay precipitación de carburo de cromo en los límites de grano y no hay una relevación de esfuerzos al 100%. Aunque el material es acero inoxidable, no significa que no exista desgaste por corrosión a altas temperaturas, por lo que el tratamiento térmico se realizó en un horno de tubo con atmósfera de Argón a un flujo aproximado de 1 lt/min. para evitar dicho desgaste al máximo.

EXPERIMENTACIÓN.

a) Condiciones de trabajo.

Para realizar los ensayos mecánicos tanto de tracción, compresión de anillos y de cilindros, fue necesario utilizar una máquina hidráulica con las siguientes especificaciones y condiciones:

Máquina universal MTS MOD. 810

Velocidad de trabajo = 20 mm / min.

Temperatura ambiente.

b) Desarrollo.

1. Se eligieron cuatro distintas relaciones de altura/diámetro, buscando cubrir un rango entre 1.0 y 2.5; las cuales fueron 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5

2. Lo mismo se hizo para el terminado superficial, para lo cual se tomaron cuatro distintos acabados, dados por el desgaste de las lijas No. 120, 240, 600 y 1200, con la finalidad de tomar distinto coeficiente de fricción entre la interfase de los cilindros y las placas compresoras.

3. Teniendo las probetas preparadas se procedió a realizar los ensayos mecánicos ya mencionados en la máquina hidráulica citada anteriormente.

Terminada la experimentación se llevó a cabo la lectura de todas las curvas carga Vs. reducción de altura, obtenida directamente de la máquina de ensayos mecánicos, con lo que se obtuvieron los siguientes resultados.

CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN.

Como se dijo anteriormente, de las pruebas de compresión y tracción se obtienen curvas carga Vs. reducción de altura, las cuales deben ser transformadas a esfuerzo Vs. deformación reales. Para determinar dichas curvas, primero se calcula el esfuerzo y la deformación ingenieriles de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$\sigma_{ing} = F / A_0 \quad 4.1$$

$$e = \Delta l / l_0 \quad 4.2$$

Donde:

σ_{ing} = Esfuerzo ingenieril

F = Carga aplicada.

A_0 = El área inicial de la probeta tanto de compresión como de tracción.

e = Deformación ingenieril

Δl = La diferencia de altura.

l_0 = La altura inicial en la probeta de compresión o la distancia calibrada en la probeta de tracción.

Los valores de carga F y Δl son leídos directamente de las curvas carga Vs. reducción de altura, para compresión, y carga Vs. elongación, para tracción.

Posteriormente se determinan los valores de esfuerzo y deformación reales, utilizando las siguientes relaciones:

$$\sigma_{real} = \sigma_{ing} (1 - e) \quad 4.3$$

$$\epsilon = \ln (1 - e) \quad 4.4$$

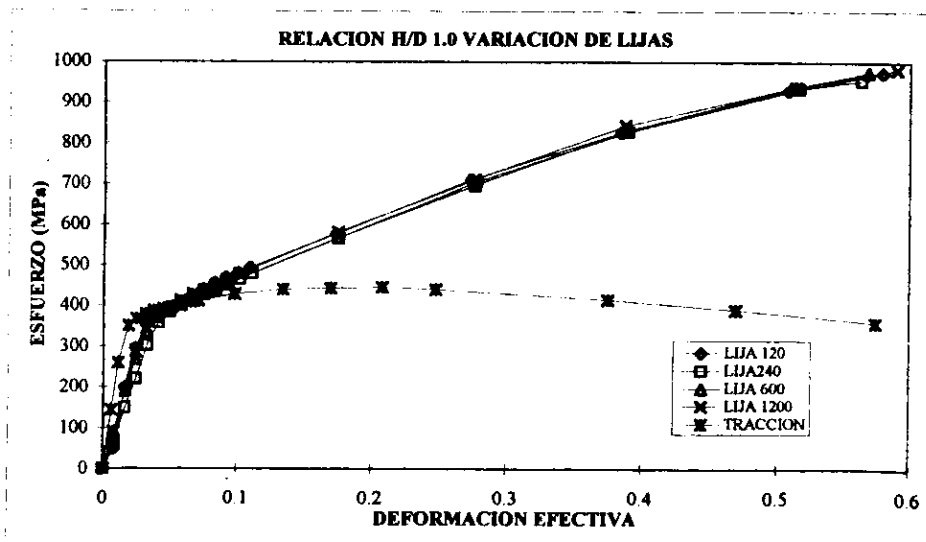
Donde:

σ_{real} = Esfuerzo real.

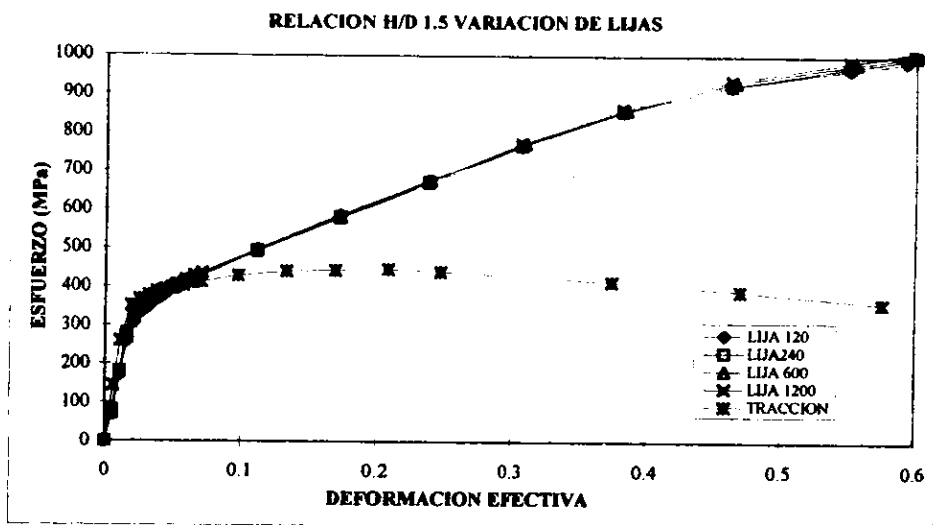
ϵ = Deformación real.

En el anexo B se muestra de una manera más detallada los cálculos realizados para la determinación de las curvas esfuerzo-deformación, tomando como ejemplo la relación de H/D de 1.0 con un acabado superficial de lija 120.

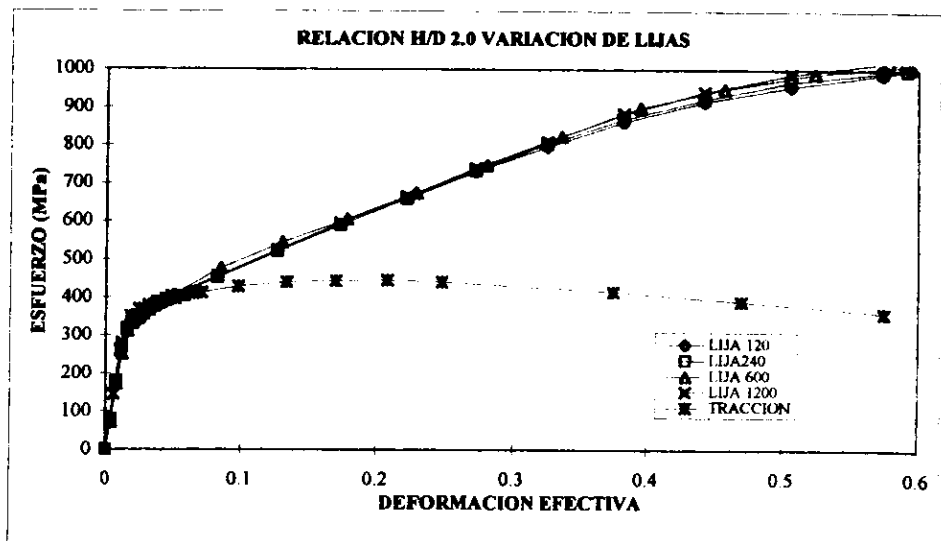
A partir de las gráficas obtenidas se construye un conjunto de éstas en donde son agrupadas de acuerdo a una variable en común, por ejemplo, en las gráficas 4.1 a la 4.4, se mantiene constante la relación altura/diámetro (H/D), que va desde 1.0 hasta 2.5, haciendo variar el acabado superficial en cada una de ellas, e incluyendo la curva de esfuerzo-deformación para tracción.



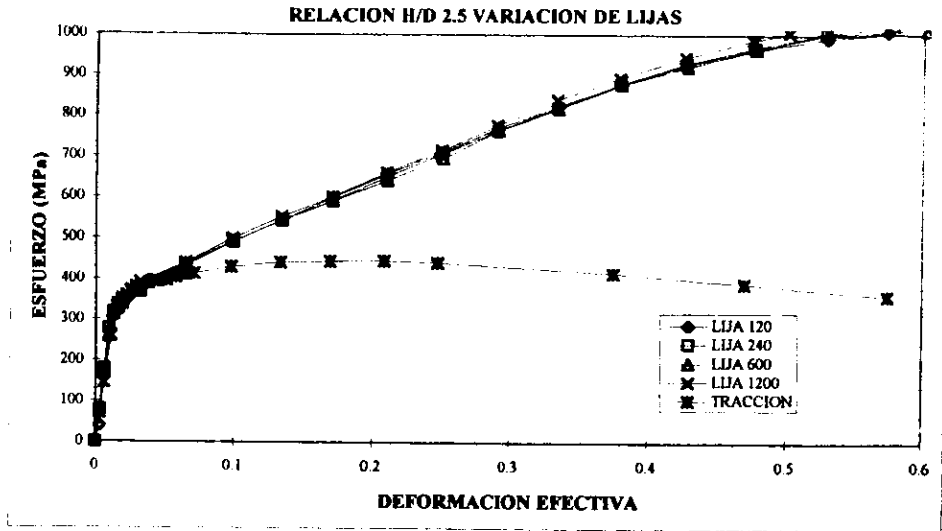
GRÁFICA 4.1



GRÁFICA 4.2



GRÁFICA 4.3



GRÁFICA 4.4

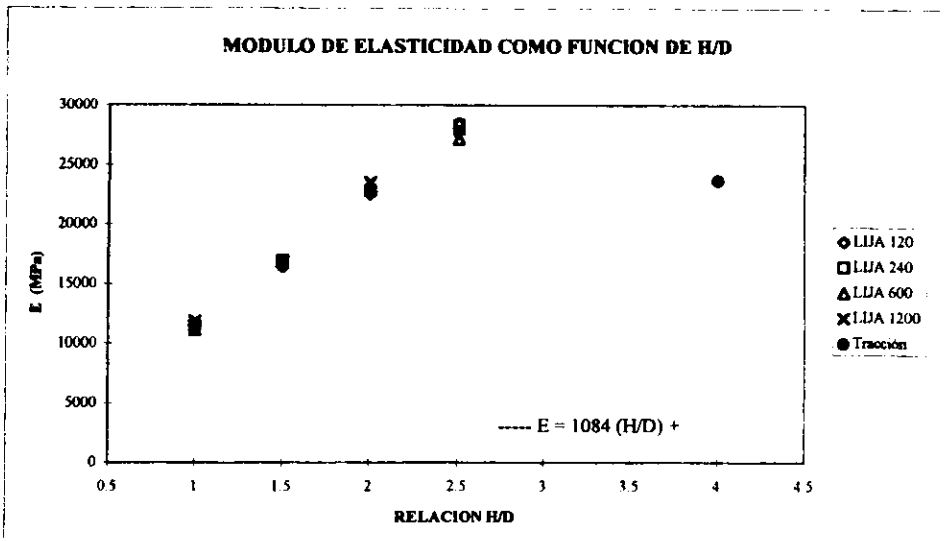
En estas gráficas observamos que la diferencia de las curvas de compresión a diferentes acabados superficiales es casi nula, lo que nos indica que el rango de fricción utilizado es muy corto y no afecta el resultado en las gráficas de esfuerzo-deformación para esta prueba. Por otra parte es notorio la similitud que tiene la prueba de compresión frente a la de tracción, al respecto se encuentra que las relaciones de 2.0 y 2.5 son las que más concuerdan con dicha prueba, dentro de la zona elástica, por lo que podríamos recomendar éste rango geométrico para trabajar en compresión teniendo cierta seguridad de que los resultados que se obtuvieran serían similares a los obtenidos en tracción. Sin embargo, para tener una visión más clara del comportamiento en ésta zona, y su similitud en ambos ensayos, se obtuvo numéricamente el valor del módulo de elasticidad y del punto de fluencia; graficándolos en función de la relación H/D, gráfica 4.5 y 4.6.

La gráfica 4.5 presenta de una forma más clara la variación que se observa del módulo de elasticidad frente a la relación H/D. Como se observa, éste se incrementa conforme aumenta la relación de altura/diámetro, y su comportamiento es lineal, esto nos indica que el material se vuelve más rígido conforme la altura de la probeta se incrementa, manteniendo el diámetro

constante; y además que su valor numérico solo es similar para una relación $H/D = 2.0$, no incluyendo la de 2.5, como se había observado en las curvas de esfuerzo-deformación. La ecuación de esta variación es como sigue:

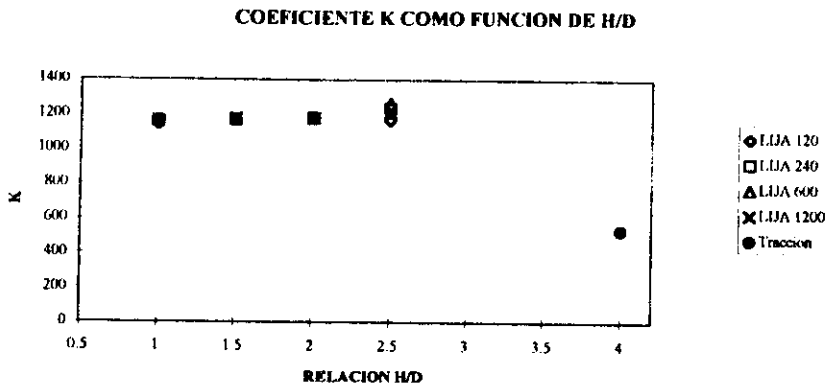
$$E = 1084 (H/D) + 558 \quad [\text{MPa}] \quad 4.5$$

Sin embargo sabemos que el módulo de Young es una constante del material por lo que su variación en función de la geometría de la probeta contradice a la teoría de mecánica del medio continuo. Al comparar los valores determinados experimentalmente con el reportado en la literatura, 199 000 Mpa [8], se observa una gran dependencia; la razón de esto es la rigidez de la máquina de prueba, la cual se explica en el anexo C.



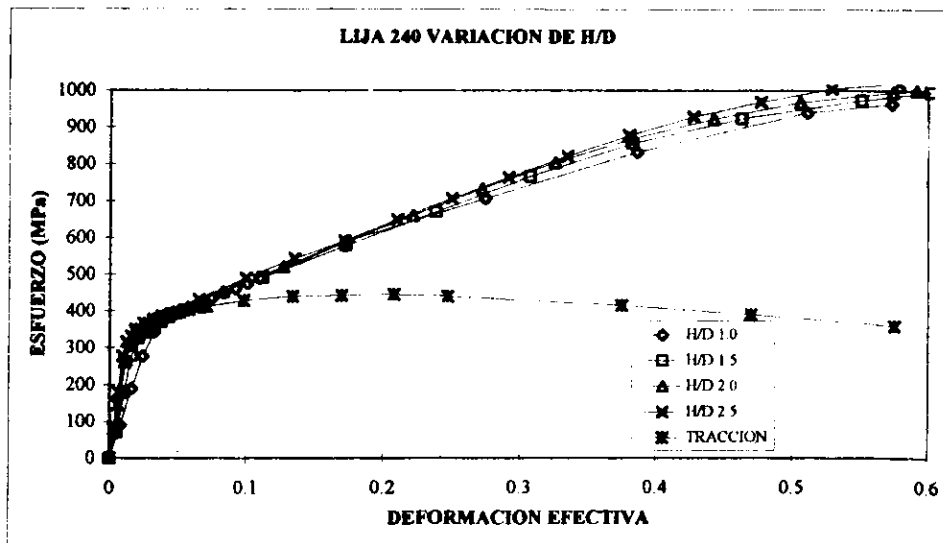
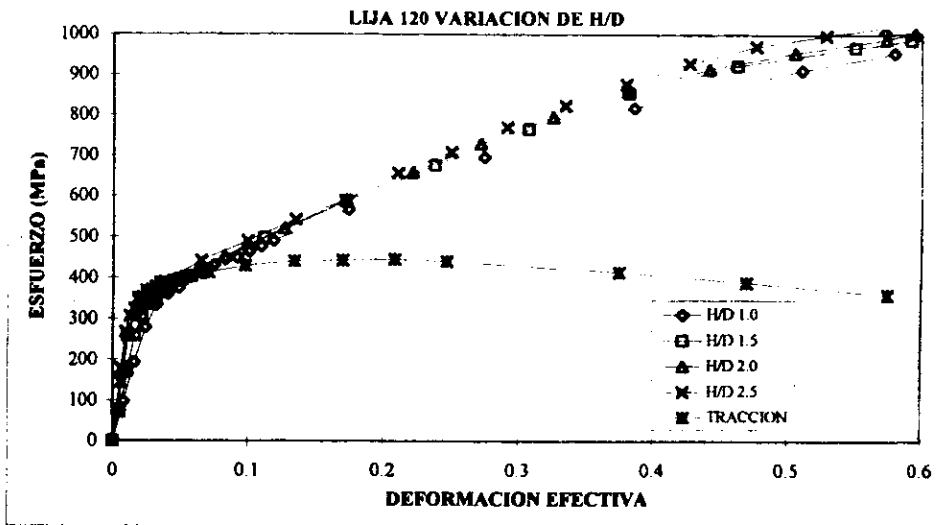
GRÁFICA 4.5

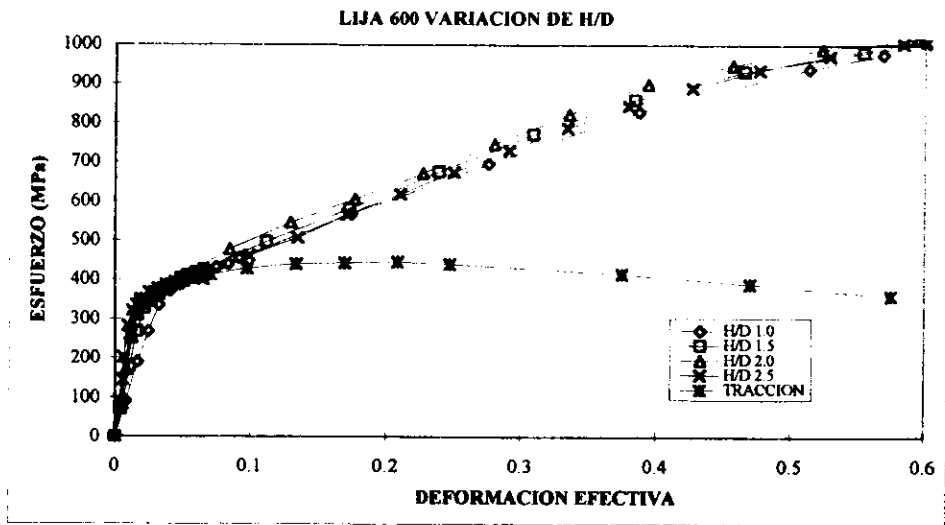
Por otra parte en la gráfica 4.6, se muestra el comportamiento del punto de fluencia ante la variación de H/D, en donde se observa que ésta propiedad mecánica no tiene una variación considerable, tomando en cuenta que el valor reportado en la literatura oscila en un rango de 15 Mpa. siendo de 295 a 310 Mpa para una barra de acero 316 con un diámetro de ½ in. y trabajada en frío.[7]



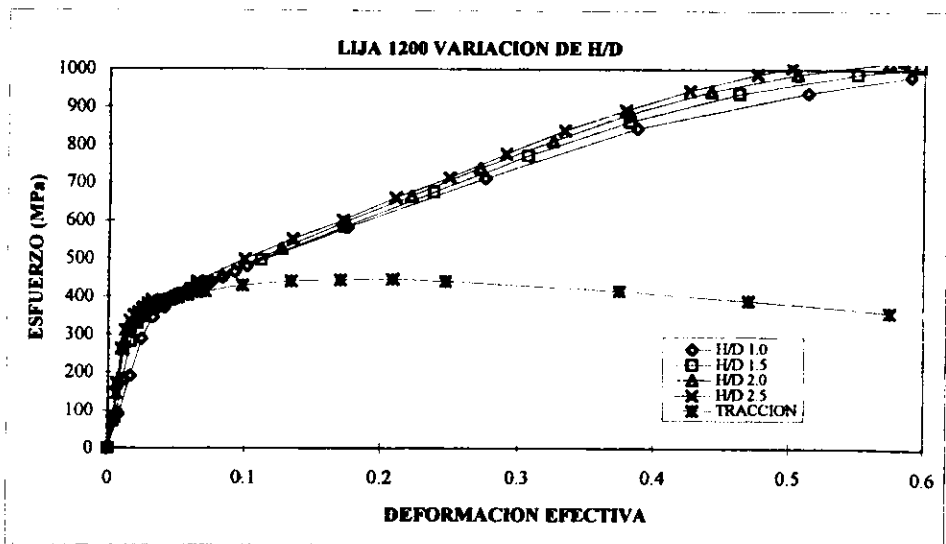
GRÁFICA 4.6

La otra variable con la que fueron agrupadas las curvas esfuerzo-deformación, fue el acabado superficial, representado por las lijas 120, 240, 600, y 1200; con lo que se construyeron las gráficas 4.7 a 4.10, manteniendo el tipo de lija constante, variando la relación H/D. En éstos gráficos, se aprecia cierta variación que tienen las curvas obtenidas por compresión ante la relación H/D; quedando siempre la curva de tracción por debajo de las de compresión, esto quiere decir que la influencia de la fricción es bastante en la prueba de compresión, por lo que el esfuerzo aumenta considerablemente, y que no es posible sustituir completamente la prueba de tracción por la de compresión.





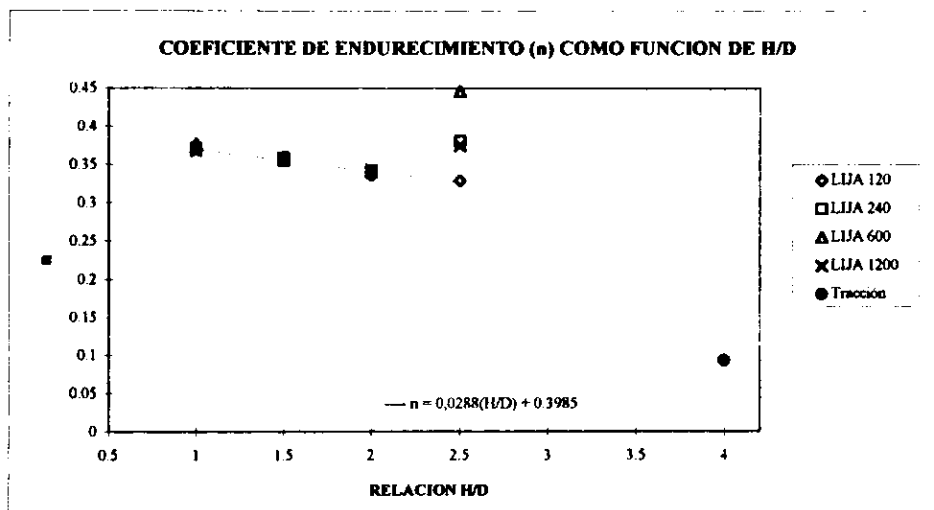
GRÁFICA 4.9



GRÁFICA 4.10

La variación existente entre las curvas de compresión se puede apreciar mejor en las gráficas 4.11 y 4.12, donde se muestra la variación de la zona plástica por medio del coeficiente de endurecimiento (n) y la constante K en función de la relación H/D, de acuerdo a la ecuación de plasticidad:

$$\sigma = K\epsilon^n \quad 4.6$$

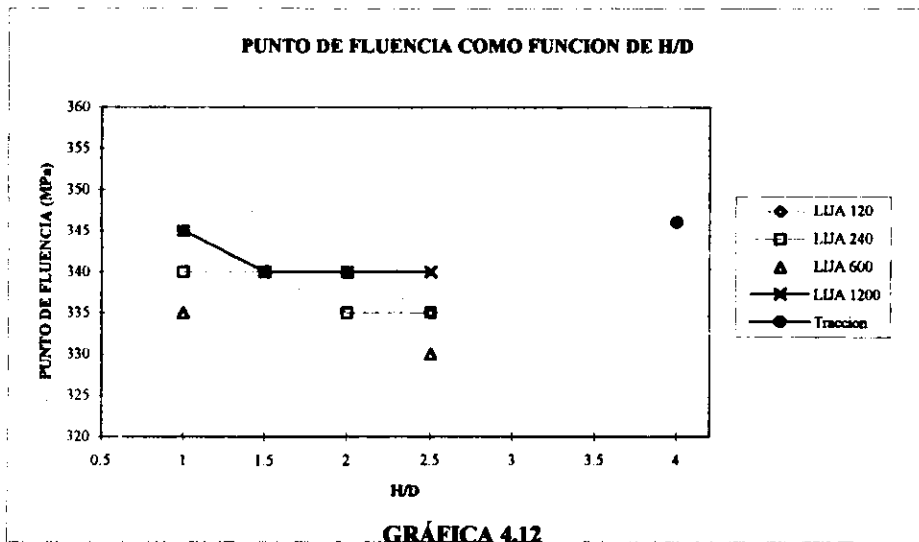


GRÁFICA 4.11

El valor de n tiene una variación lineal hasta una relación de H/D igual a 2.0 para todos los acabados superficiales, excepto para la lija 120, la cual es lineal en todo el rango comprendido, pudiendo obtener una relación matemática que representa éste comportamiento:

$$n = 0.0288 (H/D) + 0.3985 \quad 4.7$$

En el caso de tracción el coeficiente de endurecimiento presenta un valor similar al de compresión para una relación H/D de 2; sin embargo la relación que guarda la probeta de tracción es de $H/D = 4$, lo que nos indica que una prueba de tracción esta muy alejada con respecto a una de compresión en el rango de plasticidad, tal y como se observa al comparar gráficamente ambas curvas de esfuerzo- deformación.



Contrariamente al valor de n , K no presenta variación alguna con respecto a la relación H/D.

COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

Para obtener un valor numérico de la fricción existente entre la probeta y las placas compresoras, se realizaron pruebas de compresión de anillos bajo las mismas condiciones de compresión, para así conseguir el coeficiente de fricción para cada tipo de lija; ya que tanto la variación en el diámetro interno, así como la disminución de altura, son una función de la fricción existente, y mediante cartas de calibración es posible encontrar éste valor numérico.

Se eligió la carta de calibración de MALE AND COCKROFT debido a que consideran constancia de volumen de la muestra y deformación homogénea del anillo, por lo que el radio interno final debe de ser menor al radio interno inicial del mismo.

El porcentaje de reducción de altura es calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Reducción de altura} = (H_f - H_o) / H_o \quad * \quad 100 \quad 4.8$$

Donde:

H_f = Altura final.

H_o = Altura inicial.

Para calcular el porcentaje de variación del diámetro interno:

$$\% D_{int} = (D_{int f} - D_{int o}) / D_{int o} \quad * \quad 100 \quad 4.9$$

Donde:

$D_{int f}$ = Diámetro interno final.

$D_{int o}$ = Diámetro interno inicial.

Por otra parte si el anillo presenta abarrilamiento, es necesario hacer mediciones tanto en la orilla como en el centro de la muestra, y calcular el diámetro interno de acuerdo a la siguiente ecuación. [4]

$$D_{int} = D_{icon} - 2/3 (D_{icon} - D_{imax})$$

4.10

Donde:

D_{icon} = Diámetro interno de contacto

D_{imax} Diámetro interno en la altura media máxima.

Para éste caso, se calculó directamente el porcentaje de diámetro interno debido a que los anillos no presentaron abarrilamiento.

La siguiente tabla muestra los cálculos hechos para obtener el coeficiente de fricción en cada una de las lijas utilizadas.

LIIJA 120

$H_o = 4.30$ mm

$D_{int o} = 6.50$ mm

Deformación	D_{int} (mm)	H (mm)	% D_{int}	% H	μ
Primera	6.05	3.33	-6.92	22.55	0.025
Segunda	5.90	2.95	-9.23	31.40	0.025
Tercera	5.45	2.07	-16.15	51.86	0.030
<i>Promedio</i>					<u>0.0266</u>

LIIJA 240

$H_o = 4.25$ mm

$D_{int o} = 6.50$ mm

Deformación	D_{int} (mm)	H (mm)	% D_{int}	% H	μ
Primera	6.25	3.53	-3.84	16.94	0.02
Segunda	5.9	3.079	-9.23	27.55	0.02
Tercera	5.85	2.75	-10.0	35.29	0.03
Cuarta	5.50	2.60	-15.38	38.82	0.02
<i>Promedio</i>					<u>0.0225</u>

LIIJA 600

$H_o = 4.20 \text{ mm}$

$D_{int_o} = 6.55 \text{ mm}$

Deformación	D_{int} (mm)	H (mm)	% D_{int}	% H	μ
Primera	6.15	3.53	-6.1	15.95	0.018
Segunda	5.9	3.07	-9.9	26.9	0.018
Tercera	5.85	2.74	-10.6	34.68	0.025
Cuarta	5.65	2.54	-13.74	39.52	0.022

Promedio 0.0207

LIIJA 1200

$H_o = 4.25 \text{ mm}$

$D_{int_o} = 6.60 \text{ mm}$

Deformación	D_{int} (mm)	H (mm)	% D_{int}	% H	μ
Primera	6.15	3.53	-6.81	16.94	0.015
Segunda	6.0	3.07	-9.0	27.7	0.018
Tercera	5.65	2.71	-14.39	36.23	0.018
Cuarta	5.6	2.56	-15.15	39.76	0.020

Promedio 0.0177

Como se puede observar, el coeficiente de fricción para todas las lijas oscila entre 0.015 y 0.030; además de que va disminuyendo conforme el numero de lija aumenta, lo cual es congruente debido a que a mayor número de lija mas liso es el acabado y la fricción de la superficie es menor.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES

1. La curva esfuerzo-deformación para tracción sólo es reproducible hasta el punto de fluencia del material, mediante la prueba de compresión, bajo las siguientes condiciones:

- a) Relación H/D (altura / diámetro), igual a 2.0
- b) A cualquier acabado superficial comprendido entre lija 120 y 1200.

Sin embargo si se toma en cuenta la rigidez de la máquina en la obtención de los resultados, se observa que a cualquier relación H/D se obtienen valores similares unicamente para la zona elástica, los cuales se obtienen de una serie de calculos matematicos que resultan mas complicados que los de la prueba de tracción, por lo que no es posible sustituir totalmente la prueba de tracción con la de compresión, mucho menos tratar de normalizarla.

2. El coeficiente de endurecimiento (n), del acero inoxidable 316 presenta un comportamiento lineal hasta la relación H/D (altura / diámetro), igual a 2.0 excepto para la lija 120, en la cual es lineal en todo el rango comprendido de 1.0 hasta 2.5 de H/D; la expresión matemática de n en función de la relación altura / diámetro es la siguiente:

$$n = 0.0288 (H/D) + 0.3985$$

3. Tanto el valor de K, como el punto de fluencia del material, no presentan un cambio considerable con respecto a la variación geométrica de la probeta de compresión.

ANEXO A

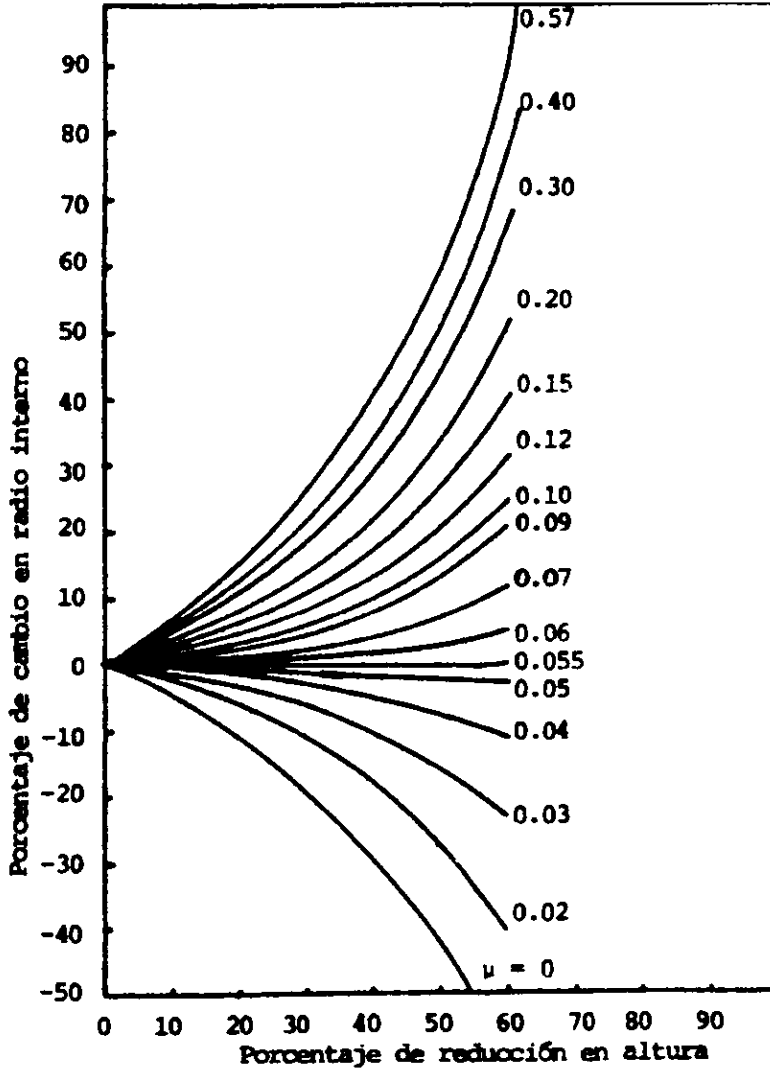


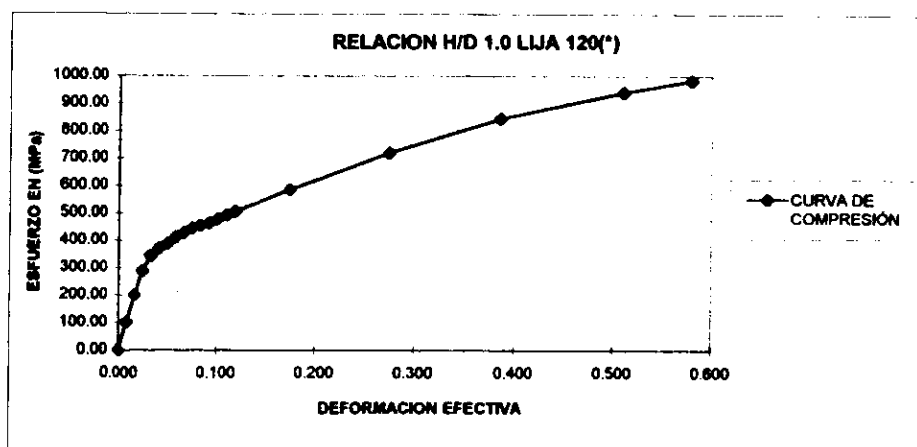
Fig.15 Curva de calibración para anillos 6:3:2, sin abarilamiento. Male y Cockroft (5).

ANEXO B

EJEMPLO DE UNA HOJA DE CALCULO

GRAFICA 1	(°)
RELACION H/D	1
PLACAS	120
DIAMETRO INICIAL	12.5mm
ALTURA INICIAL	12.5mm
ALTURA FINAL	8.15mm

CURVA DE COMPRESIÓN							
X (mm)	Y (mm)	Δl	F (KN)	ϵ Ing.	σ Ing.(MPa)	ϵ real	σ real.(MPa)
0	0.0	0.0	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
1	5.0	0.1	12.50	0.008	101.86	0.008	101.04
2	10.0	0.2	25.00	0.016	203.72	0.016	200.46
3	14.5	0.3	36.25	0.024	295.39	0.024	288.30
4	17.5	0.4	43.75	0.032	356.51	0.033	345.10
5	19.0	0.5	47.50	0.040	387.06	0.041	371.58
6	20.0	0.6	50.00	0.048	407.44	0.049	387.88
7	21.5	0.7	53.75	0.056	437.99	0.058	413.47
8	22.5	0.8	56.25	0.064	458.37	0.066	429.03
9	23.5	0.9	58.75	0.072	478.74	0.075	444.27
10	24.3	1.0	60.75	0.080	495.04	0.083	455.43
11	25.0	1.1	62.50	0.088	509.30	0.092	464.48
12	26.0	1.2	65.00	0.096	529.67	0.101	478.82
13	27.0	1.3	67.50	0.104	550.04	0.110	492.84
14	28.0	1.4	70.00	0.112	570.41	0.119	506.53
20	34.2	2.0	85.50	0.160	696.72	0.174	585.24
30	46.5	3.0	116.25	0.240	947.29	0.274	719.94
40	61.0	4.0	152.50	0.320	1242.68	0.386	845.02
50	77.0	5.0	192.50	0.400	1568.63	0.511	941.18
55	86.2	5.5	215.50	0.440	1756.05	0.580	983.39



Las primeras dos columnas en la tabla de datos anterior, representan lecturas de la gráfica que se obtiene directamente de la máquina de ensayos mecánicos MTS MOD 810. Para convertir estos datos a desplazamiento en el eje X y fuerza en KN del eje Y, se tiene que multiplicar por factores que se obtienen directamente de la máquina y el graficador que se utilice

Ya obtenidos los valores de Δl y F en KN se procede a hacer los cálculos de acuerdo a las ecuaciones 4.1 a 4.4, de esta forma obtenemos la curva esfuerzo-deformación real del ensayo realizado, tal y como se muestra en la página anterior.

ANEXO C

CORRECCIÓN DEL MODULO DE YOUNG

Como se ha podido observar en los resultados obtenidos, el módulo de Young presenta una gran variación con respecto a la relación H/D de las probetas de compresión, por lo que se decidió considerar la influencia de la rigidez de la máquina en los valores de E determinados. Para esto se aplicó la siguiente ecuación, que establece que la rigidez de la máquina K, es función de la relación H/D de las probetas, de la velocidad de aplicación de la carga y del módulo de Young del material que se está ensayando, [12]:

$$K = \left| \frac{V}{P} - \frac{L_0}{A_0 E} \right|^{-1}$$

donde

L_0 = Longitud calibrada de la muestra,

V = Rapidez de desplazamiento del cabezal,

P = Rapidez de aplicación de carga,

A_0 = Área transversal de la muestra,

E = Módulo de Young de la muestra.

De acuerdo a la referencia [13], la corrección que se debe efectuar en la zona elástica debido a la rigidez de la máquina de prueba esta dada por:

$$\Delta L_{\text{real}} = \Delta L_{\text{exp}} - P / K$$

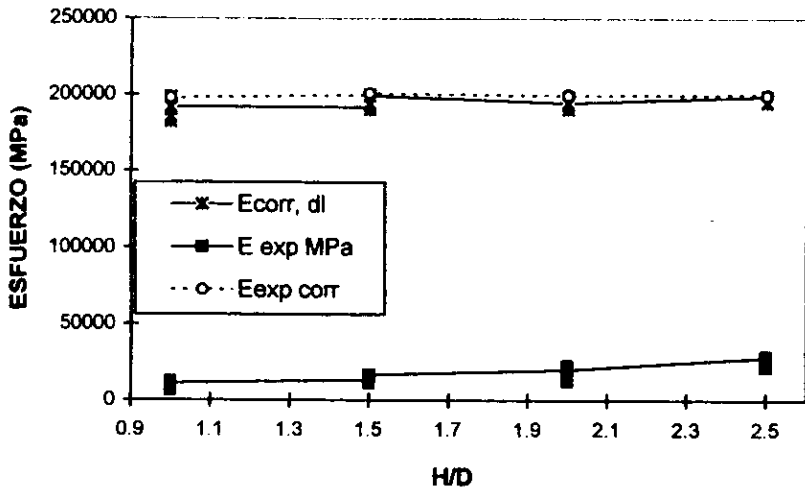
con esta ecuación obtenemos los desplazamientos reales, y tomando los valores de esfuerzo real, calculamos el valor de E_{corr} . Los valores experimentales y corregidos se muestran en la tabla A. En la cual hacemos otra corrección de acuerdo al método de Hamstad [12], que consiste en multiplicar el E_{exp} por el factor:

$$[1 + A_0 E / K L_0]$$

TABLA A MODULOS DE YOUNG EXPERIMENTALES Y CORREGIDOS DEL ACERO INOXIDABLE 316.

PLACAS	D/H	H/D	E_{EXP}	$E_{CORR}, \Delta L$	E_{CORR}
120	1	1	10308	192066	197654
240	1	1	9928	191216	196937
600	1	1	15883	188254	200317
1200	1	1	10670	190790	198071
120	0.67	1.5	12338	191212	199775
240	0.67	1.5	15090	192105	199774
600	0.67	1.5	15883	197734	200317
1200	0.67	1.5	15711	195500	200134
120	0.5	2.0	18351	194745	199910
240	0.5	2.0	20317	196372	200041
600	0.5	2.0	18905	194242	199641
1200	0.5	2.0	20230	194742	199642
120	0.4	2.5	28128	199108	200197
240	0.4	2.5	23631	195363	199561
600	0.4	2.5	27050	196105	199561
1200	0.4	2.5	24141	195952	199667

Se aprecia en los valores experimentales de E que parecen ser función de la relación de altura/diámetro, mientras que los datos corregidos presentan un valor constante, lo cual concuerda con la teoría de elasticidad. Estos datos se encuentran graficados en la siguiente figura.



Módulos de Young corregidos y experimentales en función de la relación H/D para acero inoxidable 316.

BIBLIOGRAFÍA

1. N. H. Polackowski, Dipl. Ing. "The Compression Test in Relation to Cold Rolling", *Journal of the Iron and Steel Institute*, noviembre 1949, pp 250 - 260.
2. M. Cook and E. Larke: *Journal of Intitute of Metals*, 1945, vol 71. pp 371.
3. Jesús Valdéz Martínez. "Fricción". *Comunicaciones técnicas y científicas*.
4. Robert Nuñez Teresita del N.J. "Determinación del Coeficiente de Fricción por el Método de Compresión de Anillos"; Tesis de maestría, U.N.A.M. 1995.
5. Egor P. Popov. "Introducción a la mecánica de sólidos", Editorial Limusa, Mex. 1983. pp 144 - 148.
6. S. Timoshenko. "Resistencia de materiales, segunda parte, Teoría y problemas más complejos". Editorial Espasa-Calpe, Madrid 1975. pp 405 - 408.
7. Philip D. Harvey. "Engineering Propierties of Steel", American Society for Metals Park, Ohio 44073, primera edición 1982. pp 293.
8. *Metals Handbook*, "Propierties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys". Vol. 1, 10ª edición. Materials Park, Oh, 1990. pp 855.
9. H. Meyer and F. Nehl; *Ibid.*, 1925, Vol. 45, pp 1961
10. E. Siebel and A. Pomp; *Ibid.*, 1927, Vol. 9, pp. 157
11. G. I. Tylor and H. Quinney. "Proccedings of the Royal Society". 1934, Series A, Vol. 143, pp. 307

12. A. S. M. Handbook, 9th. edición. Vol. 8, Mechanical Testing, Metals Handbook. A.S.M. 1985.

13. Robert, T., Ramírez, J., Salas, G., Noguez, M. E. y Saldivar, R., "Efecto de la rigidez de la maquina en curvas esfuerzo-deformación de Aluminio y Acero Inoxidable", 1996.