



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



*Diseño de una práctica de compresión cilíndrica en  
materiales metálicos para el Laboratorio de Procesos de  
Fabricación I*

VECCHIONE E. JESUS D  
GARCIA N. JOSUE J

Naguanagua, 14 de mayo de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



*Diseño de una práctica de compresión cilíndrica en  
materiales metálicos para el Laboratorio de Procesos de  
Fabricación I*

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

**Tutor académico:**  
Sandra Cabello. *Ing.*

**Autores:**  
VECCHIONE E. JESUS D  
GARCIA N. JOSUE J

Naguanagua, 14 de mayo de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



*Diseño de una práctica de compresión cilíndrica en  
materiales metálicos para el Laboratorio de Procesos de  
Fabricación I*

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

VECCHIONE E. JESUS D  
GARCIA N. JOSUE J

Naguanagua, 14 de mayo de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“Diseño de una práctica de compresión cilíndrica en materiales metálicos para el Laboratorio de Procesos de Fabricación I”**, presentada por los bachilleres: **Jesús David Vecchione Echenagucia y Josué Javier García Navarrete**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **17.778.179** y **18.188.577**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

---

Prof. Tutor, *Ing. Sandra cabello*  
*Presidente del jurado*

---

Prof. Juan Carlos Pereira, *Ing.*  
*Miembro del jurado*

---

Prof. Luis Sidorovas, *Ing.*  
*Miembro del jurado*

En Naguanagua a los 14 días del mes de mayo de 2009

# *Agradecimientos*

---

---

A Dios por brindarme una vida llena de salud, fortaleza, sabiduría y perseverancia, para la culminación de la carrera y la elaboración de este mi trabajo de grado.

A la Universidad de Carabobo y a la Facultad de Ingeniería por brindarme la oportunidad de desarrollar mi futuro.

Al Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación y todo el personal que allí labora, por prestar su colaboración durante la realización de este trabajo.

A la Profesora y Tutora, Sandra Cabello, por su tiempo y dedicación incondicional, por brindarnos todos sus conocimientos y experiencia que dieron forma a este Trabajo de Grado.

Al Laboratorio de Química y a todo el personal del área, por brindarnos toda su colaboración.

A mi amigo y compañero de tesis Josué, por acompañarme con su dedicación y esmero durante la realización de este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros que formaron parte de esto por darme su grano de enseñanza.

A todas las personas que de alguna manera me acompañaron durante todo el periodo de la carrera, y me ayudaron a crecer en esta etapa.

# *Agradecimientos*

---

---

Si hay alguien a quien debo agradecer antes que a todos es a Dios, señor tú has sido mi fuerza en todo momento, cada paso que di en mi formación académica lo pude dar porque tú estabas allí, todo lo que soy y seré te lo debo a ti, gracias Dios.

Agradezco a mis padres Evelyn y José, por haber sido el instrumento de Dios para darme la vida, ustedes son la mejor inspiración que he podido tener para haber alcanzado esta meta, se que nunca me faltaran y nunca dejaran de amarme, los amo.

A mi otra madre Antonieta, a mí querida hermana Lucy, a mi súper hermano Manuelito, y a toda mi familia ustedes siempre han estado a mi lado, siempre me han dado sus mejores consejos, ustedes son la mejor familia que jamás se pudiera tener, gracias por estar conmigo en todo momento, los amo.

A mi gran amigo Vecchione, gracias hermano por haber estado allí formando parte de este gran sueño de ser ingenieros, sin ti no lo hubiese logrado. Agradezco a tu familia por habernos atendido en todos estos meses, gracias por haberme recibido como uno más de su familia.

A mi gran amiga Sheila Daniela, siempre estuviste en las malas y en las buenas, gracias a Dios por haberte conocido. Al grupo cristiano de la facultad de ingeniería; muchachos son los mejores, gracias.

A la Prof. Sandra Cabello, por haber sido guía de este gran proyecto, gracias por la oportunidad que nos dio ser sus tesisas, gracias por su paciencia y deseo de ayudarnos a terminar este gran sueño, Dios la Bendiga.

A la Universidad de Carabobo, por haberme abierto las puertas y darme la oportunidad de formarme como un profesional, a todos los profesores y personal que allí labora.

Josué Javier García Navarrete

# *Dedicatoria*

---

---

A mis Padres, María y Raúl, por ser quienes me brindaron todo el apoyo y la orientación necesaria para desarrollarme como persona y profesionalmente.

A mis Hermanos, Claudia y Raúl Ricardo, por estar siempre conmigo ayudándome y aconsejándome para ir por buen camino.

A mi Sobrina y Aijada María Claudia, quien me inspira ser un ejemplo a seguir y por contagiarme con su alegría.

Finalmente, a todos ellos, familiares y amigos, que me acompañaron durante este largo camino y que estuvieron junto a mí, brindándome su apoyo para llegar a donde estoy.

A mi perseverancia y dedicación para obtener el título de Ingeniero...

# *Dedicatoria*

---

---

A mis amados padres por ser los autores de mi vida, por enseñarme a seguir mis sueños y por darme siempre lo mejor, porque nunca dejaron de creer en mí y me ensaaron cual era el camino correcto, esto es para ustedes.

A mis hermanos, por ser parte de mi vida, por haber estado conmigo en esta gran carrera y ser también fuente de inspiración en todo momento, ustedes son los mejores, esto también es de ustedes.

A todos mis familiares, parientes, hermanos y amigos, porque siempre me acompañaron en todo los pasos que di, porque nunca dejaron de creer en mí, y porque personas como ustedes solo pueden ser un regalo de Dios, a todos también les dedico todo esto, siempre les estaré agradecido.

Dios todo esto también es para ti, porque mi vida está en tus manos y eres parte de este gran sueño.

# Resumen

---

---

El ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar el comportamiento mecánico de un material o su deformación ante esfuerzos de compresión progresivos en una probeta normalizada. En este trabajo se presenta el diseño de una práctica de compresión cilíndrica, para lo cual se realizó previamente un análisis de la influencia de la fricción, la velocidad y la relación de esbeltez, como parámetros de base para el desarrollo y diseño de la práctica. Para estudiar estos parámetros se realizaron 27 ensayos que agrupan las distintas combinaciones posibles que puede haber entre las tres variables estudiadas, donde se usó velocidades de 2, 6 y 10 mm/min, con relaciones de esbeltez  $L/D$  de 0.8, 2 y 3, según lo que recomiendan las normas, y lubricantes como aceite de almendra, bisulfuro de molibdeno y aceite castor. Para validar los resultados se hicieron tres repeticiones dando un total de 81 ensayos de compresión cilíndrica. Se realizaron 15 ensayos con relaciones de esbeltez de 0.8, 1.5, 2, 2.5 y 3, para determinar el coeficiente de fricción que presentaba cada lubricante, con el fin de corregir su efecto en el ensayo. Para tener una base de comparación con el ensayo de compresión, se realizaron 3 ensayos de tracción que posteriormente fueron corregidos por medio del método de Bridgman. Se concluye que de los tres parámetros estudiados la lubricación y la relación de esbeltez son los que más afectaron al comportamiento real del cobre, observándose variaciones en la zona elástica y plástica. En base a éste estudio se diseñó la práctica, con el propósito de contribuir a la formación académica del estudiante, la cual le permitirá obtener el comportamiento esfuerzo-deformación de un material en un amplio intervalo de deformación, evaluando efectos que pudieran generarse durante la realización del ensayo como: la fricción, abarrilamiento, pandeo y otros.

**Palabras claves:** ensayo de compresión, fricción, velocidad, esbeltez, etc.

# Nomenclatura

---

$\bar{\sigma}$  : Esfuerzo verdadero (MPa).

$\bar{\epsilon}$  : Deformación verdadera (mm/mm).

F: Carga (N).

E: Módulo de Young (MPa).

L/D: Relación de esbeltez (mm/mm).

$\mu$ : Coeficiente de fricción.

$\bar{P}$  : Presión media (MPa).

e: Deformación nominal (mm/mm).

S: Esfuerzo nominal (MPa).

K: Constante de rigidez.

$\epsilon_f$ : Deformación verdadera a la ruptura (mm/mm).

$\epsilon_u$ : Deformación a la carga máxima (mm/mm).

$\sigma_f$ : Esfuerzo verdadero a la ruptura (MPa).

$\sigma_u$ : Esfuerzo a la carga máxima (MPa).

Dev: Desviación estándar.

Prom: Promedio.

$R^2$  : Grado de correlación.

abs: Absorbancia de un material.

ppm: Unidad de concentración de una muestra.

d: Desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos (mm).

h: Longitud de la probeta de compresión (mm).

n: Exponente de endurecimiento por deformación.

$\tau$  : Tensión tangencial.

k: Valor de fluencia por cizalladura.

$\sigma_n$ : Tensión normal.

# Índice general

---

---

Índice general	i
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	viii
Introducción	ix
<b>CAPÍTULO 1 Planteamiento del problema</b> .....	1
1.1 Situación problemática .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Justificación .....	3
1.4 Alcance.....	4
1.5 Limitaciones.....	5
1.6 Antecedentes.....	5
<b>CAPÍTULO 2 Marco teórico</b> .....	9
2.1 Introducción al comportamiento mecánico de los materiales .....	9
2.2 Ensayo de Tracción Uniaxial .....	11
2.2.1 Introducción. ....	11
2.2.2 Propiedades a la tracción.....	12
2.3 Ensayo de compresión uniaxial .....	14
2.3.1 Introducción .....	14
2.3.2 Modos de deformación en los ensayos de compresión .....	15
2.3.3 Propiedades en la compresión.....	18

2.3.4 Ensayo de compresión para fracturas dúctiles .....	20
2.3.5 Tipos de fractura .....	22
2.4 Modelos según curvas esfuerzo vs deformación real.....	24
2.4.1 Ludwik.....	24
2.4.2 Hollomon.....	24
2.4.3 Swift .....	25
2.5 Medida del coeficiente de rozamiento .....	25
2.6 Procedimiento para determinar el coeficiente de fricción en un ensayo de compresión cilíndrica.....	27
2.7 Ajuste de curvas .....	28
2.7.1 Coeficiente de correlación .....	28
2.8 Cobre y sus aleaciones .....	29
2.9 Consideraciones para el ensayo de compresión.....	30
2.9.1 Probetas de ensayo .....	30
2.9.2 Lubricación .....	30
2.9.3 Velocidad de deformación .....	31
<b>CAPÍTULO 3 Marco metodológico .....</b>	<b>32</b>
3.1 Selección del material a estudiar.....	32
3.2 Mecanizado de las probetas a estudiar.....	33
3.3 Análisis de la composición química del material a ensayar.....	35
3.4 Ensayos de tracción .....	37
3.5 Ensayos de compresión cilíndrica .....	41
3.6 Determinación del factor de fricción de los distintos lubricantes a usar....	43
3.7 Procesamiento de los resultados obtenidos .....	47
3.8 Parametrización de la curva esfuerzo-deformación .....	51
3.9 Diseño de la práctica de compresión cilíndrica .....	55
<b>CAPÍTULO 4 Resultados.....</b>	<b>57</b>
4.1 Análisis de la composición química .....	57
4.2 Ensayos de tracción .....	58
4.3 Resultados experimentales .....	61
4.3.1 Efecto de la lubricación.....	61
4.3.2 Efecto de la velocidad.....	68
4.3.3 Efecto de la relación de esbeltez .....	74
4.4 Parametrización de las curvas esfuerzo vs deformación .....	79
<b>CAPÍTULO 5 Análisis de resultados .....</b>	<b>85</b>
<b>CAPÍTULO 6 Conclusiones.....</b>	<b>91</b>
<b>CAPÍTULO 7 Recomendaciones .....</b>	<b>94</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>96</b>

<b>Glosario de términos</b> .....	99
<b>Apéndice</b> .....	102

# Índice de figuras

---

---

<b>Figura 2.1.</b> Probetas típicas (a) ensayo de tracción, (b) probetas dentadas para ensayos de tracción, y (c) para pruebas de dureza. (ASM Internacional, 2000) .....	10
<b>Figura 2.2.</b> a) Determinación del límite elástico convencional al 0.2% de deformación en el hierro fundido gris y b) esfuerzo de cedencia superior e inferior que describe el comportamiento mecánico de un acero al carbono. (Askeland, 1998) .....	12
<b>Figura 2.3.</b> Curva típica de tracción hasta la fractura, punto F. La resistencia a la tracción TS está indicada en el punto M. (Callister, 1995).....	13
<b>Figura 2.4.</b> Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura. (Callister, 1995) ..	14
<b>Figura 2.5.</b> Modos de deformación bajo compresión. (a) Pandeo, cuando $L/D > 5$ . (b) Distorsión, cuando $L/D > 2.5$ . (c) Doble abarillamiento, cuando $L/D > 2.0$ y existe fricción entre las superficies de contacto. (d) Abarillamiento, cuando $L/D < 2.0$ y existe fricción entre las superficies de contacto. (e) Compresión homogénea, cuando $L/D < 2.0$ y no existe fricción entre las superficies de contacto. (f) Compresión inestable, debido procesos de ablandamiento del material. (ASM Internacional, 2000).....	17
<b>Figura 2.6.</b> Diagrama esquemático de la curva de tracción mostrando el fenómeno de recuperación de la deformación elástica y del endurecimiento por deformación. (Dieter, 1988).....	19
<b>Figura 2.7.</b> Cambio progresivo de la deformación en la superficie abarillada en el ensayo de compresión. (a) Deformaciones en la superficie abarillada. (b) Variaciones de las deformaciones en el ensayo de compresión sin fricción (Compresión homogénea) y con niveles más altos de fricción progresivos y con relaciones $L/D$ más pequeñas. (ASM Internacional, 2000).....	21
<b>Figura 2.8.</b> Ensayo de compresión sobre una aleación de aluminio 2024-T35. A la izquierda, una probeta sin deformar; al centro, compresión con fricción	

(agrietada); a la derecha, compresión sin fricción (no está agrietada). (ASM Internacional, 2000).....	22
<b>Figura 2.9.</b> Dos vistas de la probeta de una aleación de aluminio 7075-T6 comprimida un 72%, mostrando el efecto concha de naranja. Son evidentes las varias macro-fracturas en la superficie corrugada. (ASM Internacional, 2000) .....	23
<b>Figura 2.10.</b> Grietas de corte en una probeta comprimida un 72% de un acero AISI-SAE 4340. (ASM Internacional, 2000).....	23
<b>Figura 2.11.</b> Representación de los puntos experimentales que se generan con el ensayo. ....	28
<b>Figura 3.1.</b> Dimensiones de probetas de tracción para especímenes pequeños.....	34
<b>Figura 3.2.</b> Probetas de cobre a distintas relaciones de esbeltez.....	35
<b>Figura 3.3.</b> Esquema del proceso de absorción atómica. ....	35
<b>Figura 3.4.</b> Curva de abs vs ppm del cobre. ....	36
<b>Figura 3.5.</b> Curva maestra para la determinación del esfuerzo a la fractura corregido por efecto de la estricción localizada mediante la corrección de Bridgman. (Cabello y Torres, 2004).....	39
<b>Figura 3.6.</b> Curva de traccion esfuerzo-deformacion corregida. ....	40
<b>Figura 3.7.</b> Ensayo de compresión. ....	42
<b>Figura 3.8.</b> Algunos criterios para detención de ensayos de compresión. a) Pandeo, b) Distorsión y c) Abarrilamiento. ....	42
<b>Figura 3.9.</b> Esquema de codificación de los ensayos. ....	43
<b>Figura 3.10.</b> Curvas de $\bar{P}$ vs $e$ bajo distintas relaciones de esbeltez para el aceite de almendras. ....	45
<b>Figura 3.11.</b> Linealización de la curva $\bar{P}$ vs $D/L$ .....	47
<b>Figura 3.12.</b> Curva Fuerza vs Desplazamiento (F vs d).....	48
<b>Figura 3.13.</b> Curva Esfuerzo-Deformación efectiva ( $\bar{\sigma}$ vs $\bar{\epsilon}$ ). ....	48
<b>Figura 3.14.</b> Comportamientos de esfuerzo-deformación para una tasa de deformación constante (lado izquierdo), en comparación con la curva obtenida de forma experimental (lado derecho). a) Material elástico lineal con endurecimiento plástico no lineal (elasto-plástico), b) Material linealmente elástico y con endurecimiento lineal en la zona plástica, c) Material linealmente elástico y perfectamente plástico y d) Material rígido con endurecimiento lineal en la zona plástica. ....	52
<b>Figura 3.15.</b> Esquema ilustrativo del método de iteración utilizado. ....	53
<b>Figura 4.1.</b> Curva de linealidad del cobre. ....	58
<b>Figura 4.2.</b> Curva esfuerzo-deformacion a traccion. ....	58
<b>Figura 4.3.</b> Curva esfuerzo-deformacion a traccion corregida por estricción. ....	60
<b>Figura 4.4.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real sin corregir el efecto de la fricción, para $L/D= 0.8$ , Velocidad 2 mm/min. ....	62
<b>Figura 4.5.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real corrigiendo el efecto de la fricción, para $L/D= 0.8$ , Velocidad 2 mm/min. ....	62

<b>Figura 4.6.</b> Comparación entre curvas esfuerzo vs deformación real, corrigiendo y sin corregir el efecto de la fricción (CF: corrigiendo efecto de fricción, SF: sin corregir efecto de fricción), para $L/D= 0.8$ , Velocidad 2 mm/min.....	63
<b>Figura 4.7.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para $L/D= 0.8$ , Velocidad 6 mm/min. ....	64
<b>Figura 4.8.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para $L/D= 0.8$ , Velocidad 10 mm/min. ....	65
<b>Figura 4.9.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para $L/D= 2$ , Velocidad 2 mm/min. ....	65
<b>Figura 4.10.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para $L/D= 2$ , Velocidad 6 mm/min. ....	66
<b>Figura 4.11.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para $L/D= 2$ , Velocidad 10 mm/min. ....	66
<b>Figura 4.12.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para $L/D= 3$ , Velocidad 2 mm/min. ....	67
<b>Figura 4.13.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para $L/D= 3$ , Velocidad 6 mm/min. ....	67
<b>Figura 4.14.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para $L/D= 3$ , Velocidad 10 mm/min. ....	68
<b>Figura 4.15.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para $L/D= 0.8$ , aceite de almendras.....	69
<b>Figura 4.16.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para $L/D= 2$ , aceite de almendras.....	69
<b>Figura 4.17.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para $L/D= 3$ , aceite de almendras.....	70
<b>Figura 4.18.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para $L/D= 0.8$ , bisulfuro de molibdeno.....	70
<b>Figura 4.19.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para $L/D= 2$ , bisulfuro de molibdeno.....	71

<b>Figura 4.20.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 3, bisulfuro de molibdeno. ....	72
<b>Figura 4.21.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 0.8, aceite de castor. ....	72
<b>Figura 4.22.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10mm/min) para L/D= 2, aceite de castor. ....	73
<b>Figura 4.23.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 3, aceite de castor. ....	73
<b>Figura 4.24.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 2 mm/min, aceite de almendras. ....	74
<b>Figura 4.25.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 6 mm/min, aceite de almendras. ....	75
<b>Figura 4.26.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 10 mm/min, aceite de almendras. ....	75
<b>Figura 4.27.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 2 mm/min, bisulfuro de molibdeno. ....	76
<b>Figura 4.28.</b> Curvas esfuerzo vs deformación Real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 6 mm/min, bisulfuro de molibdeno. ....	76
<b>Figura 4.29.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 10 mm/min, bisulfuro de molibdeno. ....	77
<b>Figura 4.30.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 2 mm/min, aceite de castor. ....	77
<b>Figura 4.31.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 6 mm/min, aceite de castor. ....	78
<b>Figura 4.32.</b> Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez (L/D=0.8, L/D=2 y L/D=3) para velocidad 10 mm/min, aceite de castor. ....	78
<b>Figura 4.33.</b> Parametrización de las curvas esfuerzo vs deformación real....	80
<b>Figura 4.34.</b> Curvas generalizadas para cada relación L/D. ....	83
<b>Figura 5.1.</b> Influencia del cambio de velocidad en los esfuerzos. <i>Vedia et al (2002)</i> .....	87

# Índice de tablas

---

---

<b>Tabla 2.1.</b> Clasificación según grado de coeficiente de correlación.....	29
<b>Tabla 2.2.</b> Dimensiones recomendadas para las probetas de compresión. (ASTM, 1989) .....	30
<b>Tabla 3.1.</b> Tabla propiedades materiales metálicos. (Askeland, 1998).....	32
<b>Tabla 3.2.</b> Dimensiones de probetas de tracción según norma ASTM E8. (ASTM International, 2000) .....	33
<b>Tabla 3.3.</b> Dimensiones de probetas de compresión según norma ASTM E9. (ASTM International, 2000) .....	34
<b>Tabla 3.4.</b> Valores de $\bar{P}$ para distintas relaciones de esbeltez, bajo una deformación constante obtenidos en base al aceite de almendras. ....	46
<b>Tabla 3.5.</b> Hoja de cálculo de los parámetros utilizados. ....	51
<b>Tabla 3.6.</b> Hoja de cálculos para la determinación de parámetros para ecuaciones únicas. ....	54
<b>Tabla 4.1.</b> Valores de absorbancia para concentraciones estándar del cobre. ....	57
<b>Tabla 4.2.</b> Valor de absorbancia de la muestra de cobre ensayada. ....	57
<b>Tabla 4.3.</b> Parámetros para corrección de la curva de tracción. ....	59
<b>Tabla 4.4.</b> Valores experimentales de fluencia a compresión (MPa). ....	60
<b>Tabla 4.5.</b> Coeficientes de fricción para cada lubricante.....	61
<b>Tabla 4.6.</b> Parámetros obtenidos para una relación de esbeltez de 0.8. ....	81
<b>Tabla 4.7.</b> Parámetros obtenidos para una relación de esbeltez de 2. ....	81
<b>Tabla 4.8.</b> Parámetros obtenidos para una relación de esbeltez de 3. ....	82
<b>Tabla 4.9.</b> Ecuaciones para cada relación L/D.....	83

# *Introducción*

---

El exitoso empleo de metales en aplicaciones de ingeniería, se basa en la capacidad que posee el metal para cumplir con el diseño y con los requerimientos de servicio y para ser fabricado con las dimensiones adecuadas. La capacidad de un metal para satisfacer esas necesidades es determinada por las propiedades mecánicas y físicas del metal, en donde es posible determinar las mismas a través de ensayos como los de tracción, compresión, entre otros.

El ensayo de tracción es el realizado con mayor frecuencia en los materiales que se emplean para la construcción de máquinas, porque suministra las propiedades más importantes necesarias para cualquier proceso de diseño. Sin embargo, desde el punto de vista del conformado de metales, este ensayo no es del todo satisfactorio, ya que, a causa de la formación del cuello o estricción localizada, se obtiene un intervalo de deformación muy pequeño. La alternativa a este inconveniente es la ejecución de ensayos de compresión, que pudieran ser de compresión plana o cilíndrica.

El ensayo de compresión cilíndrica es el motivo de este proyecto de investigación. Dicho ensayo consiste en aplicar a una probeta de forma

cilíndrica, una carga estática en la dirección de su eje longitudinal, que tiende a provocar un acortamiento de la misma y cuyo valor se irá incrementando hasta la rotura o suspensión del ensayo.

La razón de invertir y trabajar en esta investigación, es que con el diseño de esta práctica de compresión cilíndrica, se puede garantizar que dentro del pensum de la carrera de ingeniería mecánica, el estudiante pueda contar con nuevos recursos didácticos e informativos que le permitan conocer nuevas características de los materiales que están sometidos a distintos ensayos mecánicos, analizando su comportamiento bajo diversos parámetros como son la lubricación, la tasa de deformación y la esbeltez, y obtener las curvas características esfuerzo-deformación real ( $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$ ).

En el capítulo 1, se hace referencia al planteamiento del problema, en donde se explica la importancia de la investigación, así como los objetivos planteados para poder lograr la misma. También se menciona la justificación del proyecto y su alcance, en conjunto con las distintas investigaciones que se han realizado acerca del tema, las cuales sirven de soporte para el desarrollo del proyecto.

En el capítulo 2, se encuentra reflejada toda la información teórica necesaria para la correcta interpretación y desarrollo del proyecto, donde se hace mención a conceptos como compresión, tracción, formas de compresión, ductilidad, composición del cobre, entre otros.

En el capítulo 3, se describe la metodología utilizada durante la realización del proyecto, donde se explica la forma en la que se realizó el mecanizado de las probetas, el análisis de la composición química, los ensayos de compresión y tracción, así como los pasos necesarios para el procesamiento de los resultados obtenidos.

En el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos en el proyecto, donde se aprecia el comportamiento del cobre cuando es sometido a cargas

compresivas, por medio de un conjunto de gráficas que muestran las distintas variables evaluadas y la influencia de las mismas en metal. También se presenta la composición química del cobre y los coeficientes de fricción presentes durante los ensayos.

En el capítulo 5, se elaboraron análisis del comportamiento del material en los ensayos de compresión cilíndrica, en función a los efectos de la lubricación, relación de esbeltez y velocidad de deformación.

En el capítulo 6, se presentan las afirmaciones finales del proyecto realizado, en base a los objetivos planteados.

En el capítulo 7, se mencionan las recomendaciones en base al proyecto, las cuales podrán ser abordadas por futuras investigaciones, y que sirvan de soporte para el desarrollo de las mismas.

Al final del proyecto se presenta la Guía Práctica, elaborada en base a los resultados del estudio realizado.

# CAPÍTULO 1

## *Planteamiento del problema*

---

---

### **1.1 Situación problemática**

Actualmente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, se encuentra el Laboratorio de Procesos de Fabricación, donde se realizan distintos tipos de ensayos a materiales metálicos con el fin de estudiar su comportamiento bajo distintas condiciones experimentales, generando información valiosa y útil que puede ser utilizada para cualquier proceso de conformado.

El ensayo de tracción es el realizado con mayor frecuencia en los materiales que se emplean para la construcción de máquinas, porque suministra las propiedades más importantes necesarias para cualquier proceso de diseño. Sin embargo, desde el punto de vista del conformado de metales, este ensayo no es del todo satisfactorio, ya que, a causa de la formación del cuello o estricción localizada, se obtiene un intervalo de deformación muy pequeño. La alternativa a este inconveniente es la ejecución de ensayos de compresión, que pudieran ser de compresión plana o cilíndrica.

El ensayo de compresión cilíndrica es el motivo de este proyecto de investigación. Dicho ensayo consiste en aplicar a una probeta de forma cilíndrica, una carga estática en la dirección de su eje longitudinal, que tiende

a provocar un acortamiento de la misma y cuyo valor se irá incrementando hasta la rotura o suspensión del ensayo.

En el pensum de la cátedra de Procesos de Fabricación I, dentro de su laboratorio no se contempla un ensayo de compresión cilíndrica, por lo que no es desarrollada esta posibilidad de obtener el comportamiento esfuerzo-deformación en un amplio intervalo de deformaciones, además de que las probetas requeridas son de menor costo en comparación con las de tracción.

El diseño de la práctica permitirá además de la obtención de las curvas esfuerzo-deformación ( $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\varepsilon}$ ), el estudio de la influencia de: fricción, tasa de deformación, etc. en el proceso.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende: diseñar un material guía e informativo que permita la incorporación de esta práctica en el pensum de la cátedra, lo cual garantiza que el estudiante obtenga la relación funcional correspondiente al comportamiento mecánico del material basado en la curva  $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\varepsilon}$  y mediante el ensayo de compresión cilíndrica como recurso alternativo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

*Diseñar una práctica de compresión cilíndrica en materiales metálicos para el Laboratorio de Procesos de Fabricación I.*

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensayos de compresión cilíndrica considerando variaciones de velocidad, esbeltez y lubricación.
- Obtener las curvas características  $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\varepsilon}$  del metal a distintas condiciones.

- Analizar la influencia que tienen la velocidad, esbeltez y lubricación en la caracterización del metal.
- Determinar el modelo matemático  $\bar{\sigma} : f(\bar{\epsilon})$  que mejor se ajusta al comportamiento del metal a diferentes condiciones, con base en los modelos matemáticos existentes, como son el de Hollomon, Ludwik, etc.
- Diseñar la práctica de compresión cilíndrica para la cátedra de Procesos de Fabricación I que incorpore los aspectos evaluados anteriormente.
- Elaborar material didáctico para los estudiantes, referido al ensayo de compresión cilíndrica, tales como: guía de la práctica digitalizada, animación del ensayo, etc.

### 1.3 Justificación

Una de las ventajas que ofrece el ensayo de compresión cilíndrica, es que permite obtener un mayor intervalo de deformación para un determinado material, de donde se puede obtener información que es de gran importancia para cualquier proceso de conformado.

La razón de invertir y trabajar en esta investigación, es que con el diseño de esta práctica de compresión cilíndrica, se puede garantizar que dentro del pensum de la carrera de ingeniería mecánica, el estudiante pueda contar con nuevos recursos didácticos e informativos que le permitan conocer nuevas características de los materiales que están sometidos a distintos ensayos mecánicos y, de esta manera, adquirir una mejor formación para su desarrollo profesional. Así mismo, el estudiante podrá desarrollar esta experiencia con distintos materiales metálicos, analizar su comportamiento bajo diversos parámetros como son la lubricación, la tasa de deformación y la esbeltez, y

obtener las curvas características  $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$ , permitiéndole que obtenga la relación funcional correspondiente al comportamiento mecánico del material.

El desarrollo de esta investigación en el sector industrial, destaca la importancia que trae el ensayo de compresión como método alternativo al de tracción, ya que desde el punto de vista económico es menos costoso y las probetas requieren menos material ya que su geometría es más sencilla; de tal manera que se genera una nueva herramienta que puede ser utilizada en un amplio rango de aplicaciones de materiales, como son para el sector de la construcción de estructuras y máquinas, pero sobre todo para los procesos de conformado.

## 1.4 Alcance

- El objeto de la presente investigación es diseñar una práctica de compresión cilíndrica que pueda ser aplicada dentro del Laboratorio de Procesos de Fabricación I.
- Para efectos de la fase de experimentación requerida en el diseño de la práctica; se empleará como material de estudio cobre puro.
- En esta investigación se pretende que se estudie la influencia de 3 parámetros (lubricación, esbeltez y tasa de deformación) sobre la caracterización del cobre.
- Los datos obtenidos serán el punto de partida para obtener la relación  $\bar{\sigma} : f(\bar{\epsilon})$ .
- Se estudiarán tres factores, de tres niveles cada uno, los cuales generan un total de 27 combinaciones, a cada una de las cuales se le harán tres repeticiones para un total de 81 ensayos.
- El material didáctico servirá de guía para la realización de la práctica.

## 1.5 Limitaciones

- La máquina de ensayos universal que se encuentra en el laboratorio de ensayos mecánicos del Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación no está adaptada para trabajar con seguridad en ensayos de compresión cilíndrica.
- Debido a la condición multiuso de la máquina y por ser la única a la que se tiene acceso en la Facultad de Ingeniería, se podrían presentar dificultades con la disponibilidad de la misma en los momentos requeridos.
- La máquina de ensayos pudiera presentar fallos mecánicos durante el desarrollo de la experiencia.
- Obtener las licencias que permitan trabajar con los software que mejor se ajusten a los requerimientos, como pudieran ser: Acrobat Reader, Microsoft Word, Power Point, Visual Basic, 3D Studio Max, etc.

## 1.6 Antecedentes

Las leyes constitutivas de la deformación plástica describen la relación entre los parámetros básicos de la deformación a una temperatura dada, las características del material y la microestructura. Las ecuaciones de Ludwik (1909) y de Hollomon (1944) son altamente empleadas para describir el comportamiento plástico de un acero. Estas relaciones son fáciles de usar y suficientemente adecuadas para representar la curva tensión-deformación. Más adelante Voce (1948) propuso unos ajustes más adecuados al modelo de Hollomon para aleaciones no férricas y grandes deformaciones (Singh, Murty, et al, 1994).

Son muchos los estudios que se han realizado sobre los ensayos de compresión cilíndrica, ya que el mismo ofrece grandes ventajas para distintos tipos de aplicaciones, recientemente en la Universidad Nacional de Mendoza

(Argentina), en la Facultad de Ingeniería, específicamente en la cátedra de Ciencia de Los Materiales, se incorporó este ensayo, con la ventaja (a juicio de los autores, M. Del Pópolo, 2005) de obtener la tensión de compresión sobre un determinado metal en cualquier instante del mismo, así como la resistencia estática de compresión y la tensión al límite de elasticidad, claro dependiendo del tipo de material a ensayar, ya que el comportamiento de los mismos (frágiles y dúctiles) es distinto de acuerdo a esta forma de sollicitación. En el trabajo de Del Pópolo se empleó una máquina universal marca CIFIC tipo AMSLER, con capacidad de 30 toneladas, y el ensayo se realizó a probetas metálicas cilíndricas según las normas ASTM E9, recomendando que la relación entre el diámetro y la altura para probetas cortas sea  $h=0,9D$ , para mediana sea  $h=3D$  y para largas sea  $h= (8 \text{ a } 10) D$ , y así estudian el comportamiento de distintos metales que están sometidos a distintos esfuerzos.

Realizar estudios a metales a través de compresión cilíndrica, es una alternativa que muchos investigadores han utilizado para evaluar el comportamiento de los mismos bajo distintas sollicitaciones, Diot et al (2006) estudiaron el comportamiento dinámico del metal en pruebas de compresión, en donde los mismos alegan que el ensayo de compresión uniaxial parece bien adaptado y es frecuentemente utilizado para caracterizar el comportamiento reológico bajo distintas aplicaciones, llegando a la conclusión de que para pruebas de alta velocidad de deformación, la medición de carga se ve perturbada por la respuesta elástica del experimento realizado, por tanto ellos resaltan que la dificultad es identificar el comportamiento del material estudiado, y en función a esto propusieron mejorar el análisis de la compresión dinámica de ensayo, presentando un método que les permite convertir los resultados experimentales en una relación esfuerzo-deformación.

Caracterizar la respuesta de un material bajo cargas compresivas requiere la realización de ensayos de compresión para medir su

comportamiento. Bajo determinadas circunstancias, los ensayos compresión pueden presentar ventajas sobre otros métodos. Estos pueden proporcionar información útil sobre la deformación plástica y límite de ruptura, pero ciertas precauciones deben ser adoptadas para asegurar la validez del comportamiento del material (ASM International, 2000). Las dificultades crecen en esta situación pues una compresión homogénea no es tan simple como parece. Una de las precauciones que se deben tener en cuenta es la de los efectos fricciónales en la intercara entre la probeta y las superficies de carga que puede conducir a un abarrilamiento, tal como es descrito en la norma ASTM E9 (2000). Estos efectos han sido estudiados con anterioridad por muchos investigadores entre los cuales se encuentran Abdul (1981), Yang et al (1991), Bay (1987) y más recientemente por Manisekar y Narayanasamy (2005), en donde, haciendo uso de diferentes tipos de lubricantes para manejar el efecto friccional sobre las caras de probetas cilíndricas de aluminio, llegaron a determinar de forma clara que el radio de abarrilamiento aumentaba con el aumento de el coeficiente de fricción. Otra de las precauciones a tomar en cuenta es la geometría y tamaño de las probetas a ensayar, estas condiciones fueron analizadas en una investigación reciente en la que Del Viso, Carmona et al (2007) usando probetas de concreto de alta resistencia con formas cilíndricas y cúbicas de diferentes tamaños, realizaron ensayos de compresión a velocidad constante, llegando a determinar que el comportamiento del material luego del punto máximo de deformación en las probetas cúbicas, presenta una pendiente más suave, lo que se traduce en un consumo mayor de energía, por otro lado, indican que las muestras grandes, resisten menos en términos de esfuerzo que las más pequeñas. Cabe destacar que en la norma ASTM E9 (2000) se hace referencia a valores de esbeltez recomendados de entre 1.5 y 2 para evitar el fenómeno del pandeo en muestras cilíndricas.

La velocidad es un factor de importancia que puede influir en el comportamiento de un material que está sometido a un estado de esfuerzo,

Goglio, Peroni et al (2007) realizaron un estudio sobre el comportamiento que presenta un material adhesivo epóxico en forma cilíndrica sometido a un ensayo de compresión y tracción, bajo distintos valores de velocidad de deformación, llegando a la conclusión de que el material a tracción se comporta como frágil, pero a compresión presenta la virtud de ser un material dúctil ya que el mismo es muy sensible a los cambios en la velocidad de deformación.

# CAPÍTULO 2

## *Marco teórico*

---

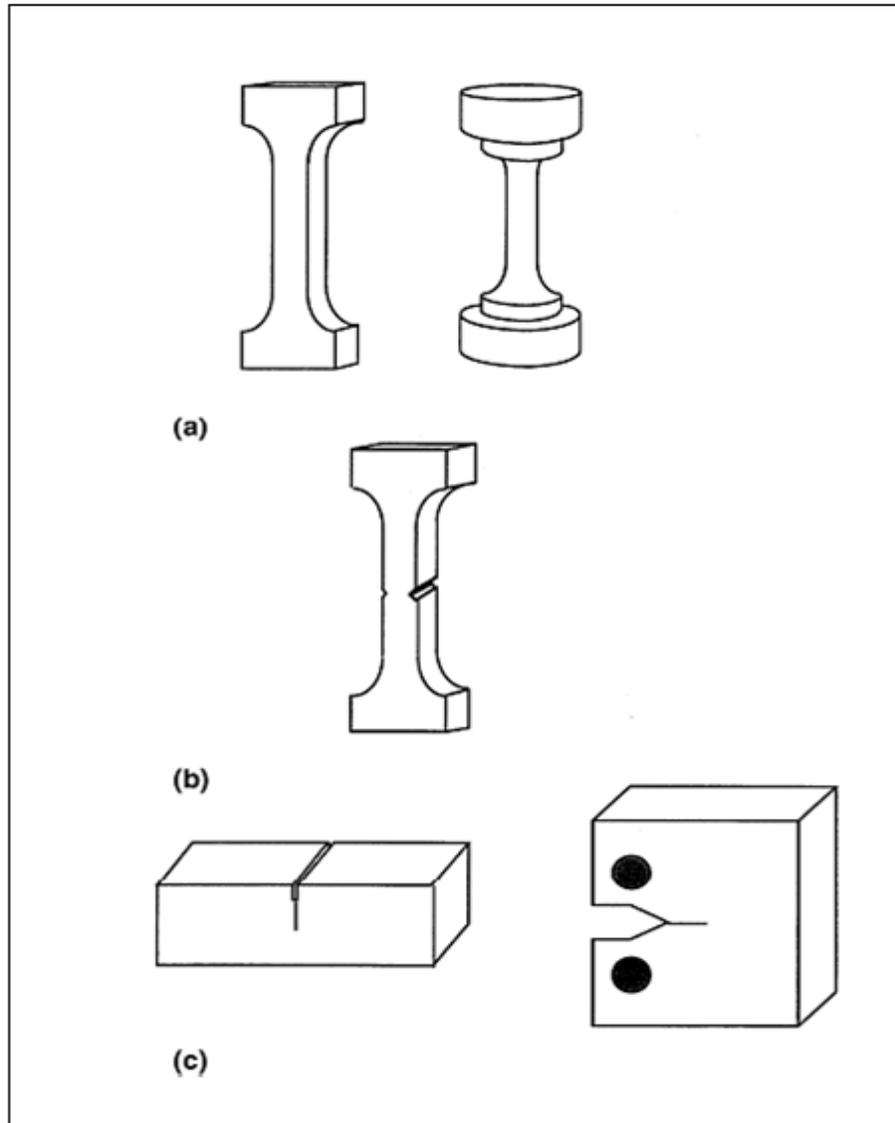
---

### **2.1 Introducción al comportamiento mecánico de los materiales**

El empleo exitoso de metales en aplicaciones de ingeniería, se basa en la capacidad que posee el metal para cumplir con el diseño y con los requerimientos de servicio y para ser fabricado con las dimensiones adecuadas. La capacidad de un metal para satisfacer esas necesidades es determinada por las propiedades mecánica y físicas del metal. Las propiedades físicas son normalmente medidas por medio de métodos que no requieren la aplicación de un mecanismo de fuerza externa (o carga). Los ejemplos típicos de las propiedades físicas son la densidad, propiedades magnéticas (por ejemplo, la permeabilidad), conductividad y difusividad térmica, propiedades eléctricas (ej., resistividad), calor específico, y el coeficiente de expansión térmica. Las propiedades mecánicas, se describen como la relación entre las fuerzas que actúan en un material y la resistencia del mismo a ser deformado (es decir, esfuerzos) y a fracturar. Esta deformación, sin embargo, puede o no ser evidente en el metal después de que la carga aplicada es eliminada.

Existen diferentes tipos de ensayos, que utilizan la aplicación de fuerza para medir propiedades, tales como módulo elástico, esfuerzo de fluencia,

ductilidad, resistencia a la fatiga y esfuerzos de rotura. A continuación se presentan los tipos de probetas utilizadas en distintos ensayos, en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Probetas típicas (a) ensayo de tracción, (b) probetas dentadas para ensayos de tracción, y (c) para pruebas de dureza. (ASM Internacional, 2000)

## 2.2 Ensayo de Tracción Uniaxial

### 2.2.1 Introducción.

El ensayo de tracción es uno de los más comúnmente utilizados para el estudio de los materiales. En su forma más simple, el ensayo de tracción consiste en sujetar el material por ambos extremos y aplicar cargas opuestas en el mismo por medio de una máquina. Una fuerza de tracción es aplicada por la máquina, resultando un alargamiento gradual que continua hasta su eventual fractura. Durante este proceso, la fuerza y extensión que se produce, es una medida cuantitativa de cómo la prueba genera deformaciones en virtud de la fuerza aplicada, lo cual generalmente son controladas y registradas. Cuando el ensayo de tracción es correctamente realizado, por medio de la fuerza y alargamiento proporciona datos que se pueden cuantificar, obteniendo importantes propiedades mecánicas de un material. Algunas de las propiedades mecánicas que se pueden determinar por medio de los ensayos de tracción son las siguientes, sin embargo no se limitan solo a estas:

- Propiedades de deformación elásticas, tales como el módulo de elasticidad (módulo de Young) y la relación de Poisson
- Esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último.
- Propiedades de ductilidad, tales como el porcentaje de alargamiento y el porcentaje de reducción de área.
- Esfuerzo-endurecimiento característicos.

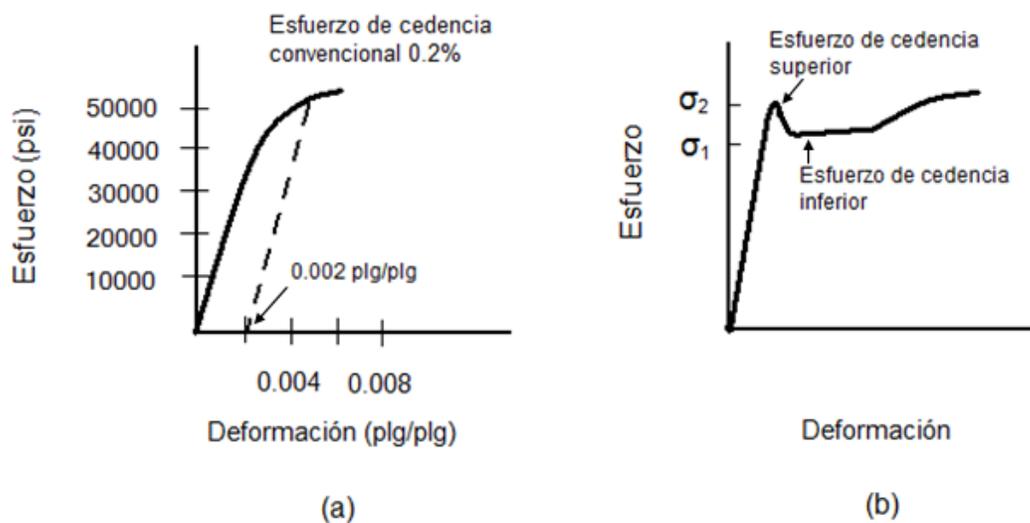
Estas características de los materiales obtenidas del ensayo de tracción, se utilizan para control de calidad en la producción, para la clasificación de desempeño de materiales estructurales, para la evaluación de las nuevas aleaciones, y para tratar con los esfuerzos estáticos requeridos en el diseño.

El principio básico del ensayo de tracción es muy simple, pero son numerosas las variables que afectan los resultados. Generalmente la

variación que pudiera existir en los ensayos mecánicos se ve afectada por varios factores que aplican en los materiales, es decir, la metodología, los factores humanos, el equipo, y las condiciones ambientales.

### 2.2.2 Propiedades a la tracción

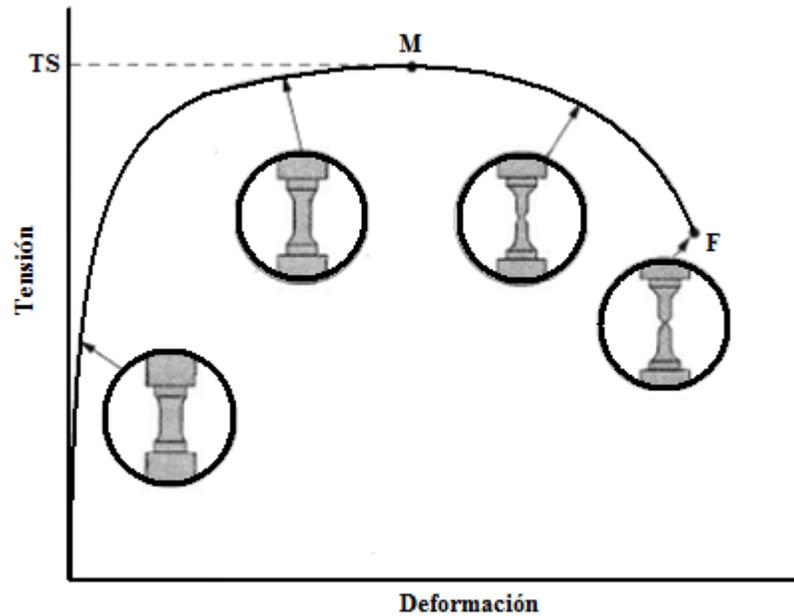
Esfuerzo de cedencia: es el esfuerzo al cual la deformación plástica se hace importante. En los metales, es por lo general el esfuerzo requerido para que las dislocaciones se deslicen. El esfuerzo de cedencia es por tanto, el esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material. En algunos casos se determina trazando una línea paralela a la porción inicial de la curva esfuerzo vs deformación pero desplazada a 0.2% del origen.



**Figura 2.2.** a) Determinación del límite elástico convencional al 0.2% de deformación en el hierro fundido gris y b) esfuerzo de cedencia superior e inferior que describe el comportamiento mecánico de un acero al carbono. (Askeland, 1998)

Resistencia a la tensión: es el esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada, que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo vs deformación ingenieril. Hasta llegar a este punto, toda la deformación es uniforme en la

región estrecha de la probeta. Sin embargo, cuando se alcanza la tensión máxima, se empieza a formar una disminución localizada en el área de la sección transversal en algún punto de la probeta, lo cual se denomina estricción o cuello.



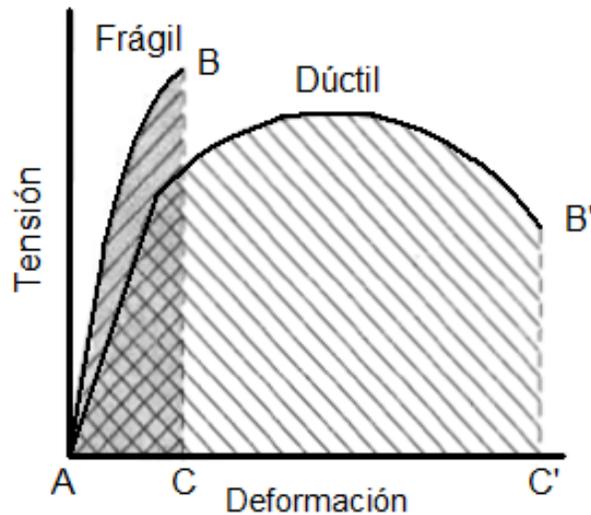
**Figura 2.3.** Curva típica de tracción hasta la fractura, punto F. La resistencia a la tracción TS está indicada en el punto M. (Callister, 1995)

Propiedades elásticas: el modulo de elasticidad o modulo de Young,  $E$ , es la pendiente de la curva esfuerzo vs deformación en su región elástica. Esta relación es la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Ductilidad: es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil. El conocimiento de la ductilidad de un material es importante por lo menos por dos razones. En primer lugar, indica al diseñador el grado en que una estructura podrá deformarse antes de

producirse la ruptura. En segundo lugar, especifica el grado de deformación que puede permitirse durante las operaciones de conformación.



**Figura 2.4.** Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles ensayados hasta la fractura. (Callister, 1995)

Resiliencia: es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar esta.

Tenacidad: es un término mecánico que se utiliza en varios contextos, en sentido amplio, es una medida de la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura.

## 2.3 Ensayo de compresión uniaxial

### 2.3.1 Introducción

Las cargas compresivas ocurren en una amplia variedad en las aplicaciones de los materiales, tales como construcciones de estructuras de acero y en soportes de concreto para puentes, al igual que en los procesos de fabricación de materiales, tales como durante el forjado y la laminación de una

pieza. Caracterizar la respuesta del material a estas cargas requiere de ensayos que midan el comportamiento compresivo del mismo.

Bajo ciertas circunstancias, el ensayo de compresión pudiera tener ventajas sobre los otros ensayos. El ensayo de tracción es el más desarrollado y es ampliamente uno de los más utilizados para ensayar el comportamiento de un material, y puede ser utilizado para determinar todos los aspectos del comportamiento mecánico de un material bajo esfuerzos de tracción, incluyendo su deformación elástica, plástica, límite de fluencia, y sus propiedades a la ruptura. Sin embargo, la extensión de su deformación está limitada por la aparición de cuello de estricción.

Para determinar el comportamiento de los materiales bajo grandes esfuerzos en la zona plástica, las mediciones se deben realizar más allá del límite de estricción. Es por ello que los ensayos de compresión y torsión se presentan como una alternativa para superar esta limitación.

Adicionalmente, las probetas para el ensayo de compresión de geometría mucha más simple, no requieren rosca ni alargamientos en sus extremos para su fijación, y utilizan menos material que las probetas para el ensayos de tracción. Es por esto, que los ensayos de compresión son a menudo más útiles para ensayos a pequeña escala y para ensayo de componentes donde las probetas de tracción son difíciles de fabricar.

### 2.3.2 Modos de deformación en los ensayos de compresión

El ensayo de compresión puede proveer información considerablemente valiosa en cuanto a la deformación plástica y ruptura del material, pero ciertas precauciones se deben tomar para asegurar la validez de los resultados obtenidos sobre el comportamiento del material.

En la figura 2.5 se ilustra los modos de deformación que pueden ocurrir en los ensayos de compresión. El pandeo mostrado en la figura 2.5 ocurre cuando la relación de esbeltez ( $L/D$ ) de la probeta es muy grande, y puede ser tratada por un análisis clásico de pandeo plástico y elástico. Estos análisis predicen que las probetas cilíndricas que tienen una relación de esbeltez,  $L/D$ , menor a 5 están exentas del pandeo y pueden ser utilizadas para ensayar tanto materiales dúctiles como frágiles.

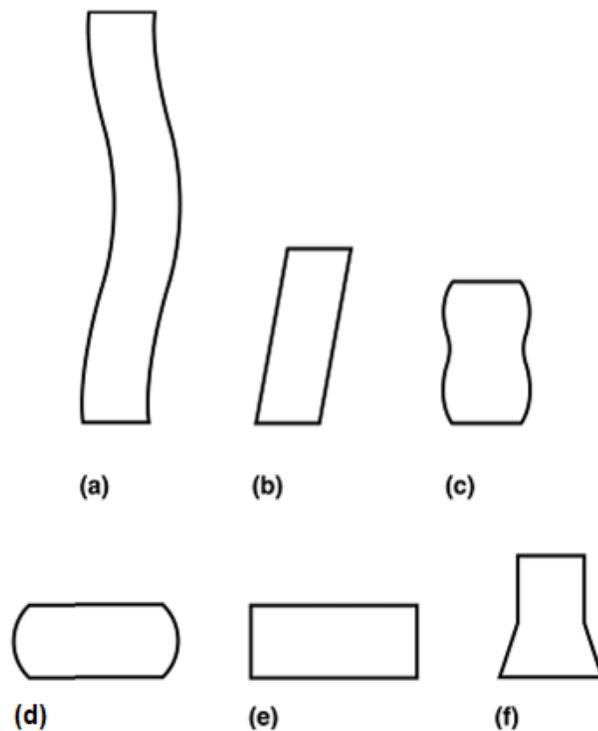
Experiencias prácticas con materiales dúctiles, por otro lado, demuestran que relaciones  $L/D$  tan pequeñas como 2.5 conllevan a repuestas a la deformación insatisfactorias. Para probetas cilíndricas, aun ligeras excentricidades en las cargas o platos de compresión que no estén completamente paralelos ocasionan esfuerzos que deforman a la probeta, tal como se muestra en la figura 2.5. Es por esto, que relaciones  $L/D$  menores son las que normalmente se utilizan para evitar el pandeo y así poder obtener mediciones certeras sobre el comportamiento de la deformación plástica del material bajo cargas compresivas.

La fricción es otra de las fuentes de deformaciones irregulares en los ensayos de deformación de materiales dúctiles. La fricción presente entre los extremos de la probeta y los platos de compresión impide el flujo lateral entre las superficies de contacto, lo cual origina el abarrilamiento o abultamiento de la superficie cilíndrica.

Bajo estas circunstancias, para relaciones  $L/D$  igual a 2, ocurre un doble abarrilamiento, tal como se muestra en la figura 2.5, relaciones más pequeñas conllevan a un abarrilamiento simple, como se muestra en la figura 2.5. Este abarrilamiento indica que la deformación no es uniforme (el esfuerzo y deformación varía a lo largo de toda la probeta), y tales ensayos no son válidos para la determinación de la mayoría de las propiedades plásticas y

elásticas de un material. Sin embargo, el abarrilamiento puede ser beneficioso para la determinación de propiedades de ruptura localizadas de un material.

Si los ensayos de compresión pueden ser llevados a cabo sin la presencia de fricción entre la probeta y los platos de compresión, el abarrilamiento no se produce, como se muestra en la figura 2.5, y la deformación que se produce es uniforme. Por lo cual para medir la mayoría de las propiedades de un material sometido a compresión, esta es la configuración que se debe adoptar.



**Figura 2.5.** Modos de deformación bajo compresión. (a) Pandeo, cuando  $L/D > 5$ . (b) Distorsión, cuando  $L/D > 2.5$ . (c) Doble abarrilamiento, cuando  $L/D > 2.0$  y existe fricción entre las superficies de contacto. (d) Abarrilamiento, cuando  $L/D < 2.0$  y existe fricción entre las superficies de contacto. (e) Compresión homogénea, cuando  $L/D < 2.0$  y no existe fricción entre las superficies de contacto. (f) Compresión inestable, debido procesos de ablandamiento del material. (ASM Internacional, 2000)

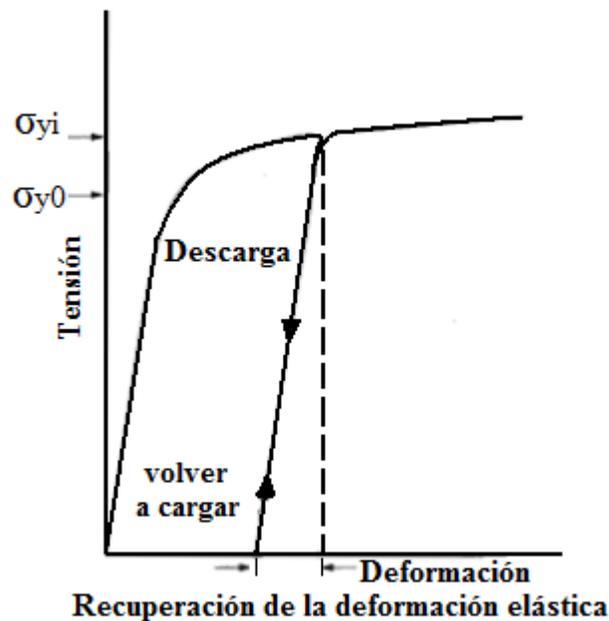
Una forma final de deformación irregular en la compresión uniaxial es una inestabilidad que es lo opuesto a la estricción que ocurre en el ensayo de tracción. En este caso, la inestabilidad ocurre debido a procesos de ablandamiento del material y forma una rápida y localizada expansión, como se muestra en la figura 2.5.

### 2.3.3 Propiedades en la compresión

La mayoría de las características de deformación plástica y elástica de un material policristalino son generalmente las mismas en compresión y tracción. Como resultado, las curvas del módulo elástico, esfuerzo de fluencia, son las mismas en compresión y tracción. Por otro lado, el esfuerzo de ruptura, esfuerzo último y la ductilidad, dependen de mecanismos localizados de deformación y fractura que son generalmente diferentes en tracción y compresión. Los materiales anisotrópicos, como las aleaciones y los policristalinos altamente texturizados, también presentan diferencias considerables en tracción y compresión luego de comportamiento elástico inicial.

La obtención de la curva de endurecimiento, o deformación plástica, de un material es mejor llevada a cabo a través del ensayo de compresión, particularmente si la aplicación, como la mayoría de los procesos metalmecánicos requieran de conocimiento sobre el comportamiento de la deformación bajo grandes esfuerzos plásticos más allá del límite de estricción en los ensayos de tracción. En estos casos, las deformaciones son mucho mayores en magnitud que las deformaciones elásticas, e indirectamente la medición de la deformación axial a través de el monitoreo del movimiento de los platos de compresión es suficientemente acertada. Cualquier error sistemático causado por la deformación elástica de los platos o equipo de ensayo son insignificantes comparados con los grandes desplazamientos plásticos de las probetas de compresión.

El esfuerzo de ruptura de un material es muy diferente en tracción y compresión. En tensión, el esfuerzo de ruptura de un material dúctil es regido por su comportamiento de estricción, el cual concentra la deformación plástica en una pequeña región, generando un estado de esfuerzos triaxiales en la zona del cuello y propaga una fractura dúctil a partir de grietas que se originan en el centro de la región del cuello. El esfuerzo de ruptura de un material frágil en tracción, por otro lado, es regido por su esfuerzo de ruptura.



**Figura 2.6.** Diagrama esquemático de la curva de tracción mostrando el fenómeno de recuperación de la deformación elástica y del endurecimiento por deformación. (Dieter, 1988)

En la compresión de un material dúctil, la estricción no ocurre, de tal forma que la generación de grietas y el mecanismo de crecimiento que conlleva a la completa separación en el ensayo de tracción no terminan con el proceso de compresión. Sin embargo, las fracturas dúctiles se pueden originar en la superficie abarrilada de una probeta de compresión con fricción. Estas fracturas generalmente crecen lentamente y no originan la completa separación de la probeta, de forma tal que la capacidad de carga del material

no es limitada. Como resultado, no hay una definición de límite de ruptura en la compresión de materiales dúctiles. Las grietas superficiales que se pueden formar en la superficie abarrilada de los ensayos de compresión con fricción no solo dependen del material, sino también de la cantidad de fricción y de las relaciones  $L/D$  de la probeta.

En la compresión de materiales frágiles o materiales de baja ductilidad, la fractura ocurre drásticamente por cizallamiento. La ruptura ocurre a lo largo de un plano de corte, bien sea, ocasionado una completa separación o en varias partes alrededor de la probeta, produciendo un aplastamiento del material. En cualquiera de los casos, la capacidad de soporte de carga del material se interrumpe abruptamente y el esfuerzo de ruptura se define fácilmente como la carga en ese punto dividido entre la sección transversal de la probeta.

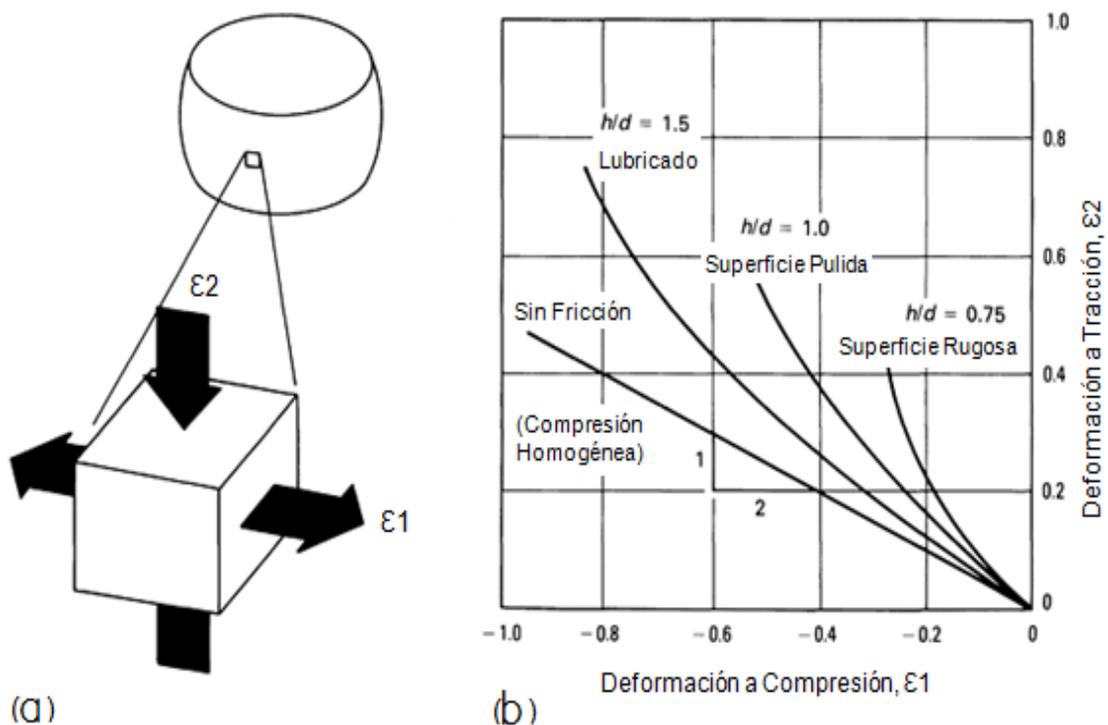
El esfuerzo último de un material en tracción es fácilmente definido como el máximo capacidad de soporte de carga. En un material dúctil, esto ocurre en el comienzo del cuello de estricción. En materiales frágiles, esto ocurre a la fractura. Como la estricción no ocurre en los ensayos de compresión, no hay esfuerzo último en materiales dúctiles, y en materiales frágiles este ocurre cuando se produce la fractura.

#### 2.3.4 Ensayo de compresión para fracturas dúctiles

Cuando existe fricción sobre las superficies de contacto, el material de la superficie de las probetas es retardado en su movimiento hacia afuera mientras que el material en la región media es comprimido. Como resultado, ocurre el abarrilamiento, tal como se muestra en la figura 2.5c y 2.5d (pag. 17). Bajo estas condiciones, para una deformación axial dada, el perfil de abultamiento proporciona deformaciones circunferenciales en la zona media que son mayores a las deformaciones que ocurren durante la compresión

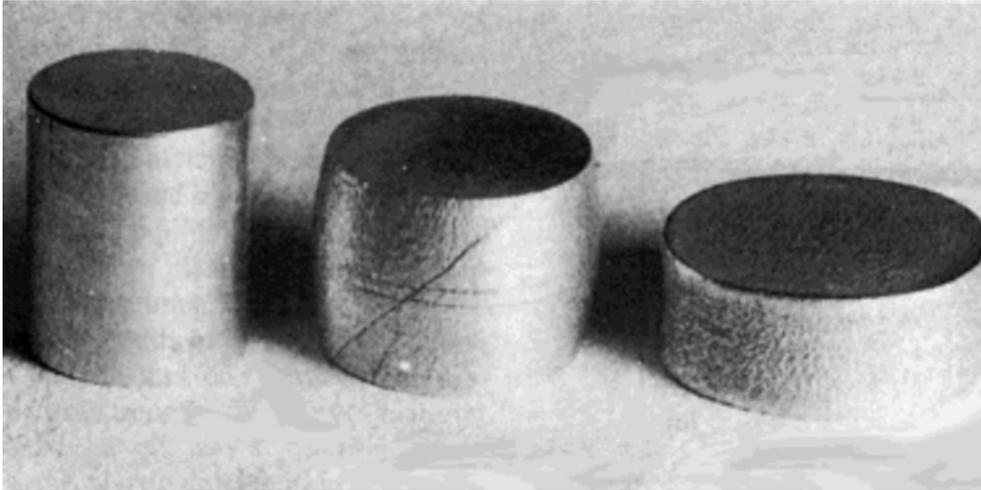
homogénea. Al mismo tiempo, debido al perfil de abarrilamiento, la deformación compresiva local en la zona media de la probeta es menor que la deformación que ocurriría durante la compresión homogénea para la misma deformación máxima. Estas desviaciones de las deformaciones superficiales desde la compresión homogénea se incrementan a medida que el abarrilamiento lo hace, la severidad del abultamiento, es controlado por la magnitud de la fricción y la relación  $L/D$  de la probeta.

En la figura 2.7b se muestra el cambio progresivo de la deformación en la superficie abarrilada para diferentes lubricaciones y relaciones  $L/D$ .



**Figura 2.7.** Cambio progresivo de la deformación en la superficie abarrilada en el ensayo de compresión. (a) Deformaciones en la superficie abarrilada. (b) Variaciones de las deformaciones en el ensayo de compresión sin fricción (Compresión homogénea) y con niveles más altos de fricción progresivos y con relaciones  $L/D$  más pequeñas. (ASM Internacional, 2000)

Estas combinaciones de deformaciones conllevan a esfuerzos de tracción alrededor de la circunferencia y esfuerzos de compresión reducidos en la zona media del abarrilamiento. La figura 2.8 muestra unas probetas de compresión con y sin lubricación.



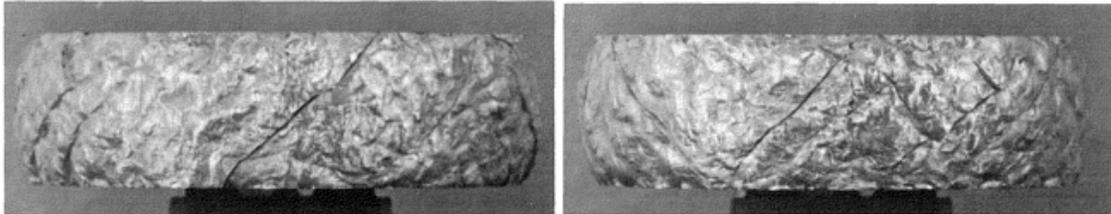
**Figura 2.8.** Ensayo de compresión sobre una aleación de aluminio 2024-T35. A la izquierda, una probeta sin deformar; al centro, compresión con fricción (agrietada); a la derecha, compresión sin fricción (no está agrietada). (ASM Internacional, 2000)

### 2.3.5 Tipos de fractura

Para todos pero para los materiales más dúctiles, las probetas cilíndricas desarrollan grietas cuando son comprimidas. Estas grietas generalmente se originan en la superficie exterior de la probeta. A medida que la probeta es deformada, la grieta se propaga, y se van formando se van originando otras adicionales. Algunos de los tipos de fracturas se describen a continuación:

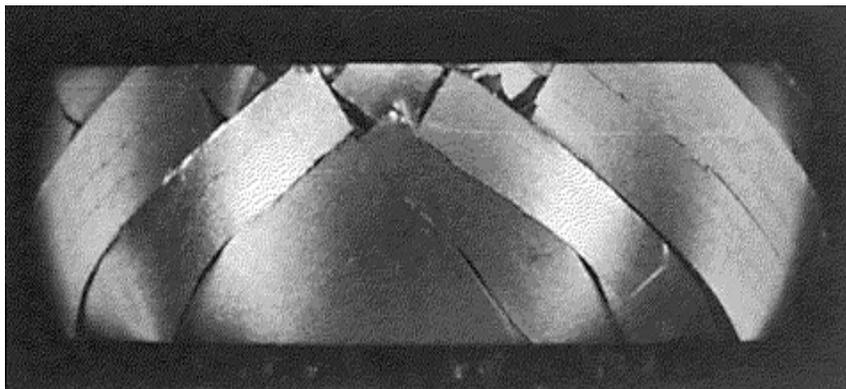
Fractura cascara de naranja: en muchos materiales, la superficie corrugada (efecto de concha de naranja) ocurre antes que la ruptura por compresión. Este efecto es mayormente predominante en algunas aleaciones de aluminio. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 2.9 para una probeta

de una aleación de aluminio 7075-T6. La probeta se muestra para una deformación del 72%. El corrugado comenzó a aparecer a partir de un 10 y 15% para deformaciones compresivas y las macro-fracturas ocurren después de una deformación de entre 50 y 60%.



**Figura 2.9.** Dos vistas de la probeta de una aleación de aluminio 7075-T6 comprimida un 72%, mostrando el efecto concha de naranja. Son evidentes las varias macro-fracturas en la superficie corrugada. (ASM Internacional, 2000)

Macro-fracturas en aceros: un caso en donde las macro-fracturas aparecen sin la precedencia de micro-fracturas se muestra en la figura 2.10. El material es un acero AISI-SAE 4340 templado a 204 °C. Las grietas se iniciales una a la vez y se extendieron a lo largo de la superficie de la probeta casi instantáneamente. Las primeras grietas aparecieron cuando la deformación compresiva alcanzo un 30%, y las demás continuaron originándose hasta que concluyo el ensayo a un 72%.



**Figura 2.10.** Grietas de corte en una probeta comprimida un 72% de un acero AISI-SAE 4340. (ASM Internacional, 2000)

## 2.4 Modelos según curvas esfuerzo vs deformación real.

### 2.4.1 Ludwik

Una de las ecuaciones que describe la curva esfuerzo-deformación real es la de Ludwik (1909). En esta se relacionan los cambios en la resistencia producidas por la variación en la deformación, temperatura o velocidad de deformación (Díaz, 2004). La ecuación es:

$$\sigma = \sigma_0 + h\varepsilon^m \quad (2.2)$$

En el modelo “ $\sigma$ ” y “ $\varepsilon$ ” representan las variables de esfuerzo y la deformación respectivamente, “ $\sigma_0$ ” se considera como constantes de esfuerzo inicial, “ $h$ ” es el coeficiente de resistencia, “ $m$ ” el exponente de endurecimiento por deformación. (Johnson et al, 1973).

### 2.4.2 Hollomon

El modelo de Hollomon, es el que mejor se ajusta para describir el comportamiento plástico de un acero. Esta relación es fácil de usar y suficientemente adecuada para representar la curva esfuerzo vs deformación verdadera a bajas deformaciones.

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (2.3)$$

En el modelo “ $\sigma$ ” y “ $\varepsilon$ ” representan el esfuerzo y la deformación verdadera, “ $K$ ” es el coeficiente de resistencia, “ $n$ ” el exponente de endurecimiento por deformación. (Kleemola et al, 1973).

Una desventaja de la formulación de Hollomon es que la tensión de fluencia es cero cuando la deformación plástica es cero, lo cual no es realista (Fernández, 2004).

### 2.4.3 Swift

Esta formulación es precisa debido a que toma en consideración la deformación inicial que presente el material, aunque esto conlleva a la complicación de su resolución.

$$\sigma = K_2 (\varepsilon + \varepsilon_0)^{n_2} \quad (2.4)$$

En el modelo “ $\sigma$ ” y “ $\varepsilon$ ” representan el esfuerzo y la deformación verdadera, “ $\varepsilon_0$ ” es el valor de la predeformación en el material, “ $K_2$ ” es el coeficiente de resistencia y “ $n_2$ ” el exponente de endurecimiento por deformación.

En la práctica esta ecuación no es muy utilizada, debido a que la deformación inicial “ $\varepsilon_0$ ” la hace tediosa, si se elimina el término “ $\varepsilon_0$ ” de la (ecuación 2.14), resultaría la (ecuación 2.13) realizada por Hollomon la cual resulta más fácil y rápida de usar. (Kleemola et al, 1973).

## 2.5 Medida del coeficiente de rozamiento

En la teoría del conformado de metales se supone que la tensión tangencial, en la superficie de la pieza, es directamente proporcional a la tensión normal  $\sigma_n$ , en presencia de un lubricante. Un coeficiente de rozamiento se puede definir como:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (2.5)$$

que es análogo a la relación de las fuerzas tangenciales y normal en física elemental. Sin embargo, la tensión tangencial  $\tau$  se limita a un valor de fluencia por cizalladura  $k$  del metal mismo. Puesto que el valor mínimo de la tensión normal que puede causar deformación plástica es  $Y$ , tensión de

fluencia uniaxial, el valor máximo del "coeficiente de rozamiento" para condiciones de rozamiento de adherencia total viene dado por la relación  $K/Y$ . Estas cantidades están, por supuesto, relacionadas de acuerdo con el criterio de fluencia. Utilizando el criterio de Von Mises, ecuación (2.6)

$$2k = 1.155Y \quad (2.6)$$

De esta forma se tiene

$$\mu = \frac{k}{Y} = 0,577 \quad (2.7)$$

El coeficiente de fricción puede variar durante un ensayo, ya que la lubricación se deteriora debido al adelgazamiento de la película de lubricante y el aumento de la superficie de contacto. Estudios experimentales indican, sin embargo, que este fenómeno es despreciable para operaciones bien lubricadas. Para cálculos prácticos se puede suponer que la tensión de cizalladura  $\tau$  para la interfase herramienta / pieza, donde la tensión normal es  $\sigma_n$ , viene dada por:

$$\tau = \mu\sigma_n \quad (2.8)$$

siempre que  $\tau < k$ . De otro modo, existe rozamiento de adherencia, y

$$\tau = k \quad (2.9)$$

Actualmente no hay un método generalmente aceptado para medir el valor del coeficiente de rozamiento para superficies y lubricantes dados. El resultado puede estar influenciado por diversos factores como la pieza de trabajo, el material de las herramientas, de la eficiencia del lubricante, la velocidad de deformación y de la temperatura, entre otros. Esto indica que los únicos datos de rozamiento absolutamente útiles son aquellos obtenidos de las medidas durante la operación considerada.

## 2.6 Procedimiento para determinar el coeficiente de fricción en un ensayo de compresión cilíndrica.

Para determinar el coeficiente de fricción en este tipo de ensayo, es necesario realizar un ensayo de compresión cilíndrica, en donde a partir de varias relaciones de esbeltez se generen ciertos puntos experimentales, y así se pueda generar la curva  $\bar{P}$  vs  $d_0/h_0$ , de la cual se generará una dispersión de puntos que permitirán obtener una tendencia experimental, que será aproximada a la teórica la cual es la que se muestra a continuación:

$$\bar{P} = \sigma + \frac{\mu \cdot \sigma}{3} \cdot \left[ \frac{1}{1+e} \right] \cdot \frac{d_0}{h_0} \quad (2.10)$$

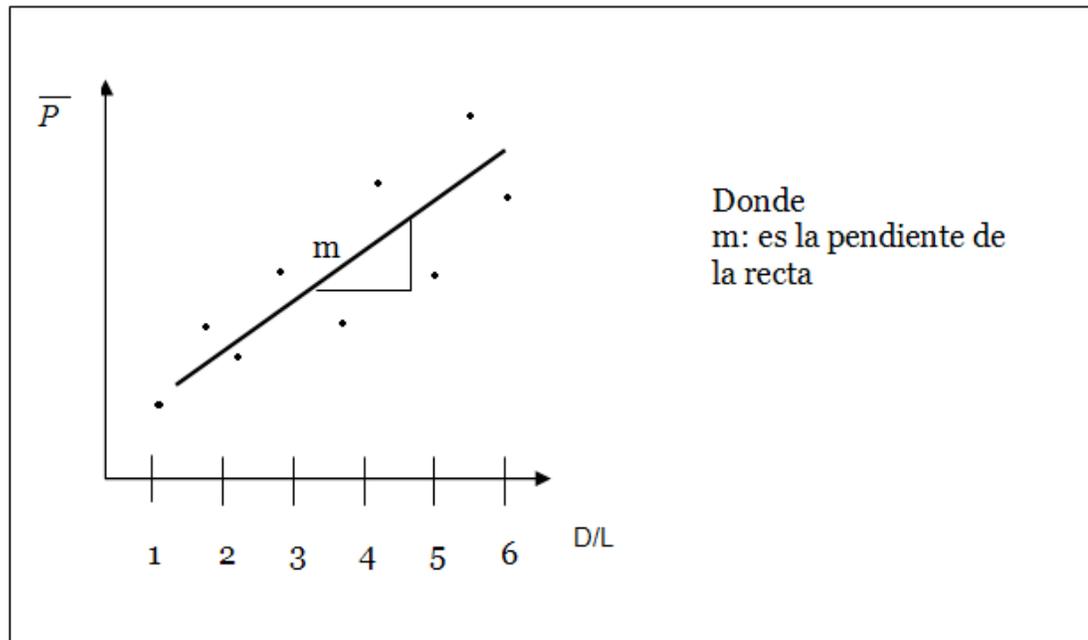
Para poder garantizar que la variable independiente sea  $d_0/h_0$ , se hace necesario variar  $\Delta h$  de tal forma que  $(e)$  se mantenga siempre constante:

$$e = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2.11)$$

De esta forma por medio de la ecuación (2.10), se puede observar que la misma bajo las condiciones anteriores describe un comportamiento lineal, por lo tanto la pendiente de esa recta es la siguiente ecuación:

$$m = \frac{\mu \cdot \sigma}{3} \cdot \left[ \frac{1}{1+e} \right] \quad (2.12)$$

Con esta información y por medio de los puntos experimentales se puede describir el comportamiento que poseen dichos puntos:



**Figura 2.11.** Representación de los puntos experimentales que se generan con el ensayo.

En base a esta tendencia se obtiene la pendiente de la recta ( $m$ ) y con la ecuación (2.12) se determina el coeficiente de fricción. Es importante tener presente que para distintos tipos de lubricantes con lo que se trabaje se pueda obtener un valor de  $\mu$  distinto.

## 2.7 Ajuste de curvas

### 2.7.1 Coeficiente de correlación

Describe la intensidad de la relación entre dos conjuntos de variables de nivel de intervalo. Es la medida de la intensidad de la relación lineal entre dos variables.

El valor del coeficiente de correlación puede tomar valores desde cero hasta uno, indicando que mientras más cercano a uno sea el valor del coeficiente de correlación, en cualquier dirección, más fuerte será la

asociación lineal entre las dos variables. Mientras más cercano a cero sea el coeficiente de correlación indicará que más débil es la asociación entre ambas variables. Si es igual a cero se concluirá que no existe relación lineal alguna entre ambas variables de estudio, esto se muestra de una mejor manera a continuación.

**Tabla 2.1.** Clasificación según grado de coeficiente de correlación.

Coef. de correlación $R^2$ (%)	Clasificación
0,0-0,2	Correlación muy débil, despreciable
0,2-0,4	Correlación débil. bajo
0,4-0,7	Correlación moderada
0,7-0,9	Correlación fuerte, alto, importante
0,9-1,0	Correlación muy fuerte, muy alto

## 2.8 Cobre y sus aleaciones

El cobre, de símbolo Cu, es el elemento químico de número atómico 29. Se trata de un metal de transición de color rojizo y brillo metálico que, junto con la plata y el oro, forma parte de la llamada familia del cobre, caracterizada por ser los mejores conductores de electricidad. Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos.

El cobre forma parte de una cantidad muy elevada de aleaciones que generalmente presentan mejores propiedades mecánicas, aunque tienen una conductividad eléctrica menor. Las más importantes son conocidas con el nombre de bronce y latones. Por otra parte, el cobre es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas.

## 2.9 Consideraciones para el ensayo de compresión

### 2.9.1 Probetas de ensayo

Probetas solidas en forma cilíndrica: es recomendado que, cuando sea factible, las probetas para el ensayo de compresión sean de forma cilíndrica. Existen tres formas de probetas cilíndricas para el ensayo de materiales metálicos, estas son la pequeña, la mediana y la larga. A continuación se muestra una tabla con dimensiones recomendadas para probetas de compresión.

**Tabla 2.2.** Dimensiones recomendadas para las pobretas de compresión. (ASTM, 1989)

Especímenes	Diámetro		Longitud		Aprox. L/D
	In.	mm	In.	mm	
Corto	$1.12 \pm 0.01$	$30.0 \pm 0.2$	$1.00 \pm 0.05$	$25.0 \pm 1.$	0.8
	$0.50 \pm 0.01$	$13.0 \pm 0.2$	$1.00 \pm 0.05$	$25.0 \pm 1.$	2
Medio	$0.50 \pm 0.01$	$13.0 \pm 0.2$	$1.50 \pm 0.06$	$38.0 \pm 1.$	3
	$0.80 \pm 0.01$	$20.0 \pm 0.2$	$2.38 \pm 0.12$	$60.0 \pm 3.$	3
	$1.00 \pm 0.01$	$25.0 \pm 0.2$	$3.00 \pm 0.13$	$75.0 \pm 3.$	3
	$1.12 \pm 0.01$	$30.0 \pm 0.2$	$3.38 \pm 0.14$	$85.0 \pm 3.$	3
Largo	$0.80 \pm 0.01$	$20.0 \pm 0.2$	$6.38 \pm 0.15$	$160.0 \pm 3.$	8
	$1.25 \pm 0.01$	$32.0 \pm 0.2$	12.5	320	10

Las probetas pequeñas son usadas usualmente para ensayos de compresión de materiales como metales de soporte, los cuales son utilizados en forma de platos delgados para cargar cargas perpendiculares a la superficie. Los de mediano tamaño son utilizados usualmente para determinar generales de compresión en los materiales metálicos. Las probetas grandes son más adecuadas para la determinación del modulo de elasticidad de los materiales metálicos.

### 2.9.2 Lubricación

Como ya se ha mencionado, la lubricación es un factor que puede afectar los resultados del ensayo de compresión. Para reducir efectivamente

la fricción entre las superficies se recomienda lubricarlas con aceites lubricantes como: TFE- láminas de fluorocarbono, bisulfuro de molibdeno, grafito de bisulfuro de molibdeno, etc.

### 2.9.3 Velocidad de deformación

Se recomienda colocar para maquinas de ensayo equipadas con un controlador de la velocidad de deformación, una tasa igual a 0.005 in/in.min (m/m.min). Se puede utilizar una tasa de deformación de 0.003 in/in.min (m/m.min) si el material es sensible a la velocidad de deformación.

# CAPÍTULO 3

## *Marco metodológico*

---

---

### 3.1 Selección del material a estudiar

Debido a que en la Facultad de Ingeniería se dispone de una máquina ensayo universal Galdabini con capacidad limitada (de 20 Toneladas), se selecciona como material de estudio el cobre, ya que requiere bajos esfuerzos para deformarse, lo cual garantiza que los ensayos puedan ser realizados entre límites de carga seguros para la máquina, permitiendo cumplir con los requerimientos planteados. Otra de las razones por las que se selecciona el cobre es porque la línea de investigación bajo la cual se está trabajando, sólo estudia el comportamiento de los materiales metálicos bajo los distintos procesos de fabricación.

**Tabla 3.1.** Tabla propiedades materiales metálicos. (Askeland, 1998)

Material	Tm (°C)	E		$\mu$
		(psi)	(GPa)	
Pb	327	2.0 x 10 <sup>6</sup>	13.8	0.45
Mg	650	6.5 x 10	44.8	0.29
Al	660	10.0 x 10	69	0.33
Cu	1085	18.1 x 10	124.8	0.36
Fe	1538	30.0 x 10	206.9	0.27

Donde:

$T_m$ : es la temperatura de fusión.

$\mu$ : es el coeficiente de Poisson.

$E$ : es el modulo de elasticidad.

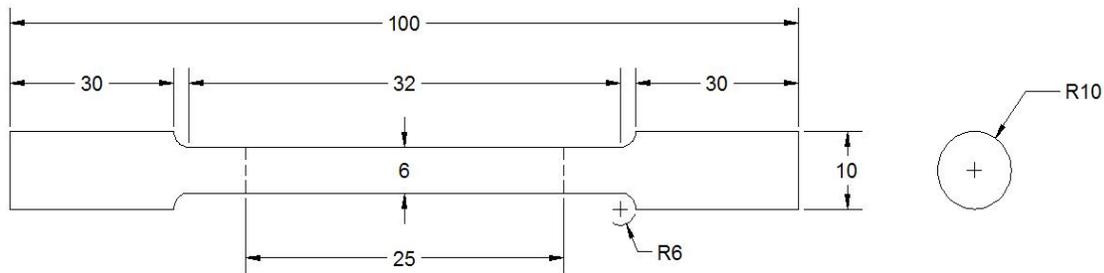
### 3.2 Mecanizado de las probetas a estudiar

Luego de seleccionar el material y tamaño de las barras cilíndricas con las que se trabajara, en este caso barras de  $\frac{1}{2}$ " , se mecanizaron las probetas según la norma ASTM dependiendo del tipo de ensayo a realizar, en este caso se realizaron tres (3) ensayos de tracción y noventa y seis (96) de compresión con la finalidad de determinar las propiedades mecánicas del material bajo esfuerzos compresivos, y comparar el comportamiento del mismo bajo un ensayo de tracción.

Para el mecanizado de las probetas de tracción se tomo como referencia las dimensiones estandarizadas recomendadas en la norma ASTM E8 para especímenes pequeños, tal como se indica a continuación:

**Tabla 3.2.** Dimensiones de probetas de tracción según norma ASTM E8. (ASTM International, 2000)

Dimensiones, mm			
	Especímenes Estándar		Espécimen Pequeño
Diámetro Nominal	40 mm	12.5 mm	6 mm
G- Zona calibrada	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	200.0 ± 0.5
W- Ancho	40.0 ± 0.2	12.5 ± 0.2	200.0 ± 0.5
T- Espesor	espesor del material		
R- Radio de entalle, min	25	12.5	6
L- Longitud total	450	200	100
A- Longitud de la zona reducida, min	225	57	32
B- Longitud de la zona de agarre	75	50	30
C- Ancho de la zona de agarre, aprox.	50	20	10



**Figura 3.1.** Dimensiones de probetas de tracción para especímenes pequeños.

Para las probetas de compresión, se trabajó con un diámetro de 10 mm y en base a la relación de esbeltez indicada en las normas ASTM E9 (ver tabla 3.3), se determinó la longitud requerida de cada probeta.

**Tabla 3.3.** Dimensiones de probetas de compresión según norma ASTM E9. (ASTM International, 2000)

Especímenes	Diámetro		Longitud		Aprox. L/D
	In.	mm	In.	mm	
Corto	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25.0 ± 1.	0.8
	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25.0 ± 1.	2
Medio	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.50 ± 0.06	38.0 ± 1.	3
	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	2.38 ± 0.12	60.0 ± 3.	3
	1.00 ± 0.01	25.0 ± 0.2	3.00 ± 0.13	75.0 ± 3.	3
	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	3.38 ± 0.14	85.0 ± 3.	3
Largo	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	6.38 ± 0.15	160.0 ± 3.	8
	1.25 ± 0.01	32.0 ± 0.2	12.5	320	10

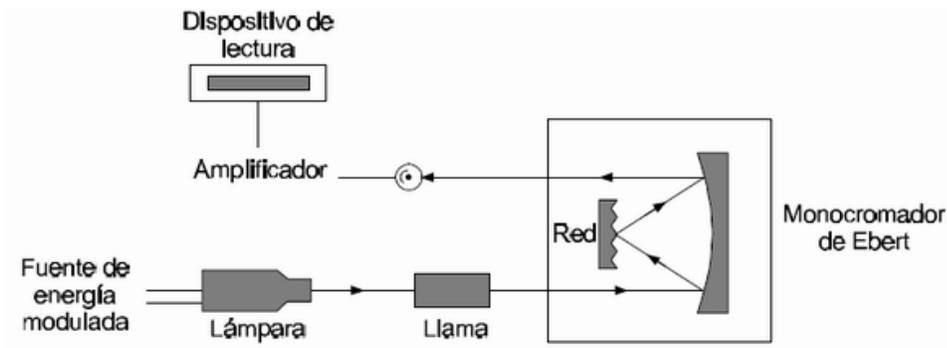
En la figura 3.2 se muestran las probetas ya mecanizadas con un diámetro de 10 mm a distintas relaciones de esbeltez, como son de 3, 2 y 0.8 respectivamente, relaciones que se seleccionaron para la realización de los ensayos de compresión acorde con la norma ASTM E9.



**Figura 3.2.** Probetas de cobre a distintas relaciones de esbeltez.

### 3.3 Análisis de la composición química del material a ensayar

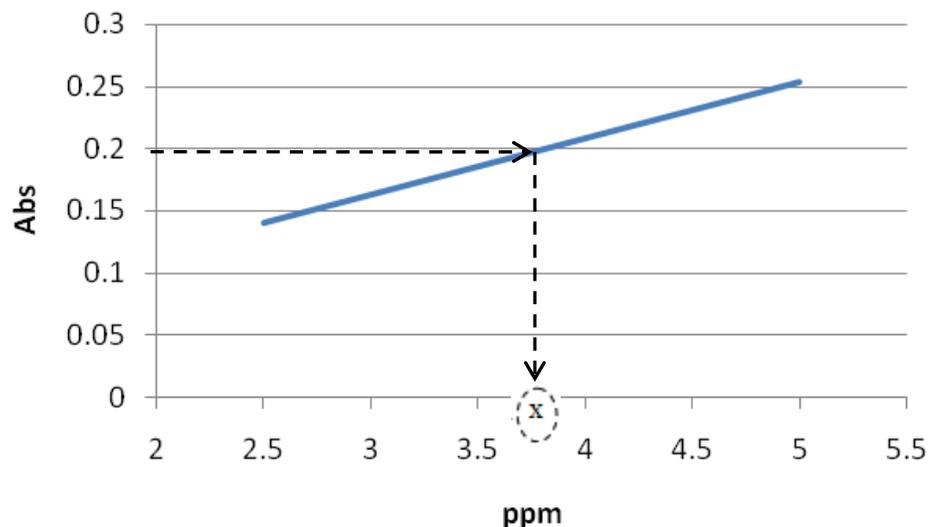
Se realizó un análisis químico del material a estudiar, para así conocer el grado de pureza del mismo, de tal manera que sea de soporte como información de referencia para otros trabajos de investigación, que requieran estudiar el comportamiento del material sometido a compresión cilíndrica. El método utilizado se basó en la absorción atómica, en este se nebuliza la muestra y luego la disemina en forma de aerosol dentro de una llama de aire acetileno u óxido nitroso-acetileno, donde luego es captada por un sistema óptico y electrónico.



**Figura 3.3.** Esquema del proceso de absorción atómica.

El procedimiento seguido para la medición de la composición química del cobre fue el siguiente: primeramente se pesa en una balanza digital el contenido de la muestra a ensayar en forma de viruta, luego es necesario disolver dichas partículas en una concentración de ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  hasta que la muestra se encuentre totalmente en estado líquido, seguidamente se disuelve el contenido en cierto volumen de agua destilada hasta obtener un valor de concentración en ppm comprendido entre 2 valores de concentración estandarizados que representan el intervalo de linealidad del cobre, correspondiente a los límites de 2,5 y 5 ppm. Posteriormente se introduce la muestra en la máquina de absorción atómica junto con otras 2 concentraciones, de donde se obtienen un conjunto de valores de absorbancia para las concentraciones estandarizadas y de la muestra problema.

Con las concentraciones estandarizadas y su correspondiente valor de absorbancia, se tienen dos pares de puntos abs vs ppm que al graficarlos generan una línea recta, la cual al intersectarla con el valor de absorbancia de la muestra dado por la máquina, se obtiene el valor verdadero de concentración del material, tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.4.** Curva de abs vs ppm del cobre.

Este valor de concentración obtenido en ppm se transforma por relaciones de volumen y concentración hasta obtener el porcentaje de cobre contenido en la muestra ensayada, siguiendo la ecuación:

$$\% Cu = \frac{X \cdot V_p}{V_c \cdot m} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Donde:

X: concentración de la muestra patrón (ppm)

V<sub>p</sub>: volumen de la muestra patrón

V<sub>c</sub>: volumen de la muestra control

m: masa del material

### 3.4 Ensayos de tracción

Una vez mecanizadas las probetas de tracción con las dimensiones establecidas en la norma ASTM, se proceden a realizar los ensayos, hasta alcanzar un total de tres (3) repeticiones de tal forma de garantizar que los resultados obtenidos sean representativos. Realizados los ensayos se toman los datos de F y d proporcionados por la máquina universal de ensayos Galdabini y se procede a determinar un conjunto de parámetros hasta obtener los esfuerzos y deformación verdaderos, tal como se indica a continuación:

A través de las condiciones iniciales de la probeta y la longitud instantánea, es posible determinar la deformación nominal o de ingeniería que sufre el material por medio de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (3.2)$$

Donde:

$e$ : Deformación nominal

$L$ : Longitud instantánea

$L_0$ : Longitud inicial

Ahora es necesario determinar el esfuerzo nominal, por medio de la fuerza y el área instantánea.

$$S = \frac{F_i}{A_i} \quad (3.3)$$

Donde:

$S$ : Esfuerzo nominal

$F_i$ : Fuerza de deformación

$A_i$ : Área de contacto

Luego se determina el esfuerzo verdadero que viene expresado en términos del esfuerzo y deformación nominal, la cual se rige con la siguiente ecuación.

$$\bar{\sigma} = S.(1 + e) \quad (3.4)$$

Una vez que se obtiene la deformación nominal entonces es posible determinar la deformación real.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (3.5)$$

Seguidamente a la obtención de los parámetros anteriores es necesario corregir los datos a partir de la carga máxima, por medio del modelo propuesto por Bridgman, cuyo procedimiento es descrito por Cabello y Torres (2008) como se señala a continuación:

Se determinan:

La deformación verdadera a la fractura:

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (3.6)$$

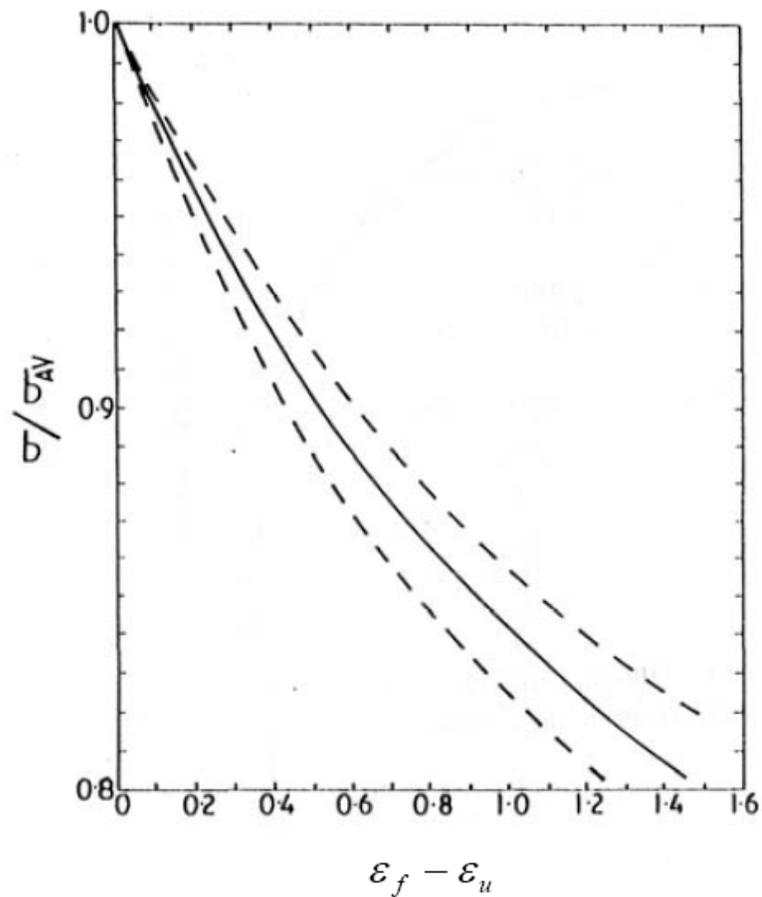
Donde:

$A_0$ : área inicial

$A_f$ : área final

La deformación verdadera a máxima carga:

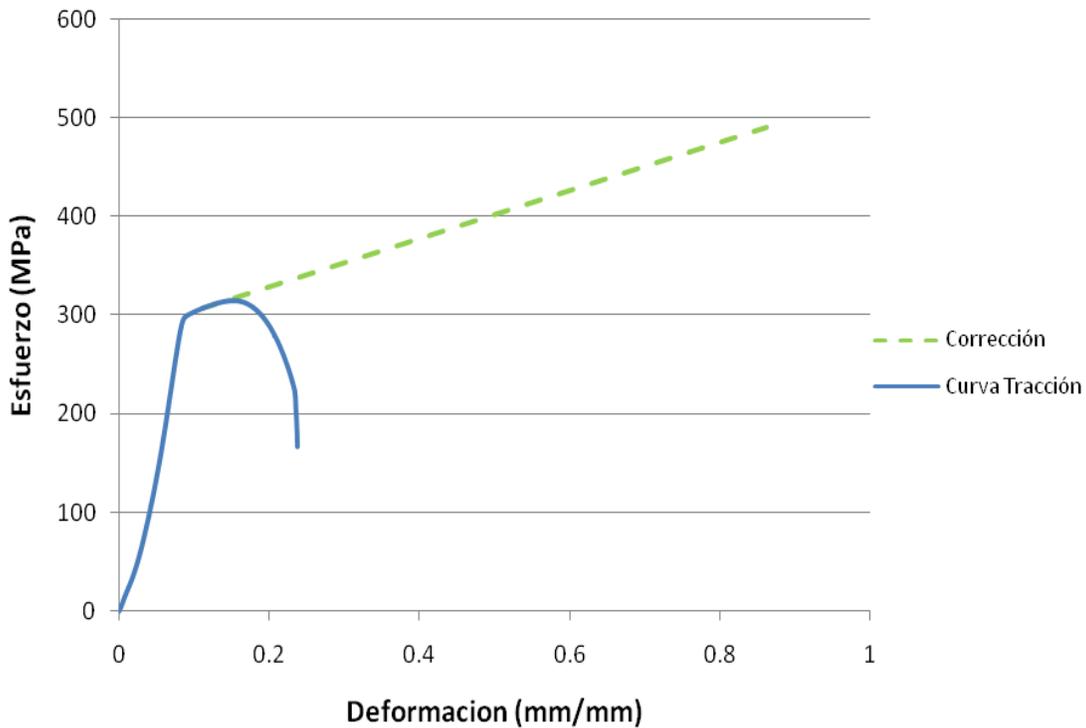
$$\varepsilon_u = \ln(1 + e_u) \quad (3.7)$$



**Figura 3.5.** Curva maestra para la determinación del esfuerzo a la fractura corregido por efecto de la estricción localizada mediante la corrección de Bridgman. (Cabello y Torres, 2004)

Con los valores de deformación verdadera a la fractura y deformación verdadera a carga máxima se obtiene una diferencia  $\epsilon_f - \epsilon_u$ , con la cual se ingresa a la curva maestra de corrección mostrada en la figura 3.5, para obtener la relación entre el esfuerzo corregido a la fractura  $\sigma$  y el esfuerzo promedio  $\sigma_{av}$ .

Con el valor determinado por medio de la curva maestra y el valor  $\sigma_{av}$  se puede determinar el valor de esfuerzo de ruptura corregido. Con el par de valores de deformación y esfuerzo de ruptura verdadero se puede graficar una curva suavizada desde el punto de carga máxima y deformación a carga máxima hasta los valores de ruptura corregidos, con lo cual se obtiene una curva de esfuerzo-deformación verdadera corregida por encuellamiento, tal como se aprecia en la figura 3.6.



**Figura 3.6.** Curva de traccion esfuerzo-deformacion corregida.

Obtenida la curva corregida, se utiliza el criterio de Von-Mises como método para determinar el esfuerzo de fluencia a compresión, partiendo de los datos de tracción, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S=1.155Y \quad (3.9)$$

Donde:

Y: esfuerzo de fluencia a tracción

S: esfuerzo de fluencia a compresión

Este valor se compara con un promedio de los valores de fluencia obtenidos experimentalmente a través del ensayo de compresión y se determina la relación experimental ( $Y_c/Y$ ) existente entre ambos.

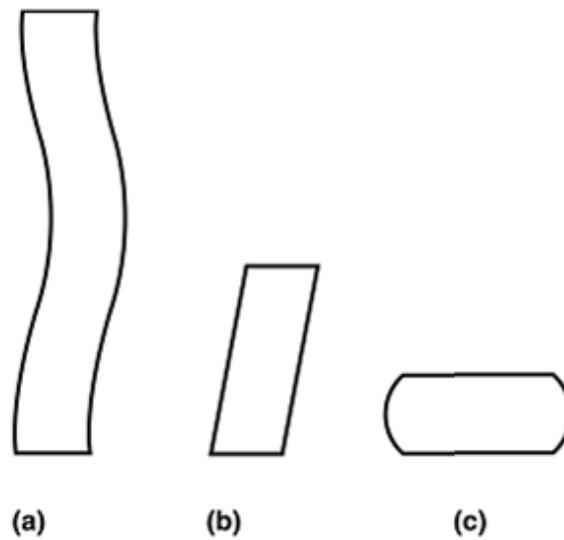
### **3.5 Ensayos de compresión cilíndrica**

Una vez determinados todos los parámetros con los que se van a realizar los ensayos, se empieza con el proceso práctico de compresión, en este se introducen las probetas ya mecanizadas según las distintas relaciones de esbeltez y se comienza con el proceso de compresión, variando la lubricación y la tasa de deformación para cada relación de esbeltez. Este proceso se realiza tres veces para cada combinación de parámetros de estudio, generando un total de ochenta y un (81) ensayos, esto con el fin de obtener resultados que garanticen la exactitud en la obtención del comportamiento del material ensayado.

Para la detención de los ensayos se tomaran como criterios fundamentales los siguientes: pandeo, distorsión, abarrilamiento, falla de la probeta o elevada carga que comprometa la capacidad del equipo durante la realización de los ensayos (ver figura 3.8).



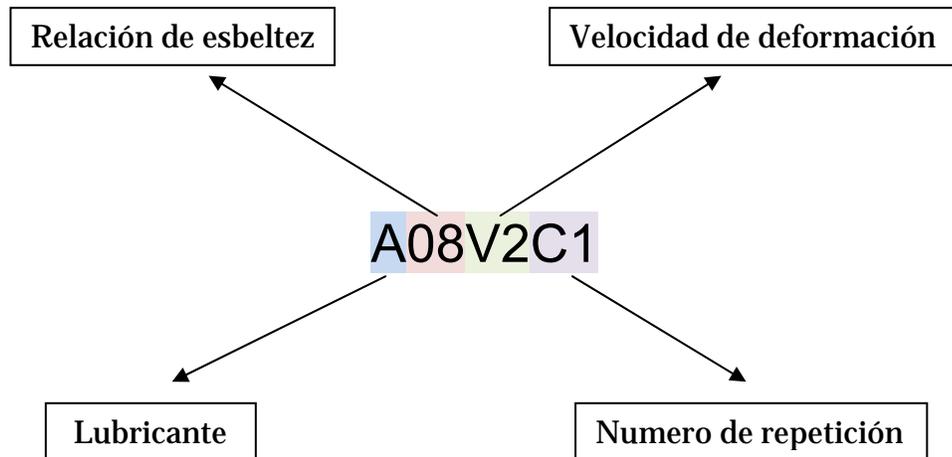
**Figura 3.7.** Ensayo de compresión.



**Figura 3.8.** Algunos criterios para detención de ensayos de compresión. a) Pandeo, b) Distorsión y c) Abarrilamiento.

Luego de haber concluido con cada ensayo, para tener una correcta apreciación de los mismos, cada probeta se identificó por medio de un código que refleja los parámetros de lubricación, relación de esbeltez  $L/D$  y velocidad,

además del número de repetición para cada condición, tal como se indica a continuación:



**Figura 3.9.** Esquema de codificación de los ensayos.

En donde para lubricación: A: Aceite de almendra, B: Bisulfuro de molibdeno y C: Aceite de castor. Por su parte para las relaciones de esbeltez: 08: representa  $L/D=0.8$ , 20: representa  $L/D=2$  y 30: representa  $L/D=3$ . De la misma forma para la velocidad de deformación se utiliza: V2: para una velocidad de 2 mm/min, V6: para 6 mm/min y V10: para 10 mm/min. Finalmente para identificar las repeticiones se utiliza: C1: para el primer ensayo, C2: para la primera repetición y C3: para la segunda.

### 3.6 Determinación del factor de fricción de los distintos lubricantes a usar

Una vez realizado los ensayos y seleccionados los tres tipos de lubricantes a ensayar, se determinó el coeficiente de fricción de cada uno de ellos, esto se logró aplicando la metodología reportada por Cabello y Torres (2008), en la que se realiza cinco ensayos de compresión cilíndrica para cada uno bajo distintas relaciones de esbeltez, considerando valores cercanos con

los que se van a trabajar, de tal manera de generar una dispersión de puntos en función de la presión media y el factor de fricción, los cuales forman una tendencia lineal. De esta forma dependiendo de la relación de esbeltez y del tipo de lubricante a ensayar se determina el factor de fricción asociado. Para esto se realizan los siguientes pasos:

Primeramente se determina la altura instantánea por medio de la siguiente ecuación.

$$h = h_0 - d \quad (3.10)$$

Donde:

$h$ : Altura instantánea.

$h_0$ : Altura inicial.

$d$ : desplazamiento de la máquina.

Luego se determina el área instantánea de la sección transversal de la probeta.

$$A_i = \frac{A_0 \cdot h_0}{h_i} \quad (3.11)$$

Donde:

$A_i$ : Área de contacto.

$A_0$ : Área inicial de la muestra.

$h_0$ : Altura inicial de la muestra.

$h_i$ : Altura instantánea de la muestra.

Por medio de la altura es posible determinar la deformación nominal o de ingeniería que sufre el material por medio de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{h}{h_0} - 1 \quad (3.12)$$

Donde:

$e$ : Deformación nominal.

$h$ : Altura instantánea.

$h_0$ : Altura inicial.

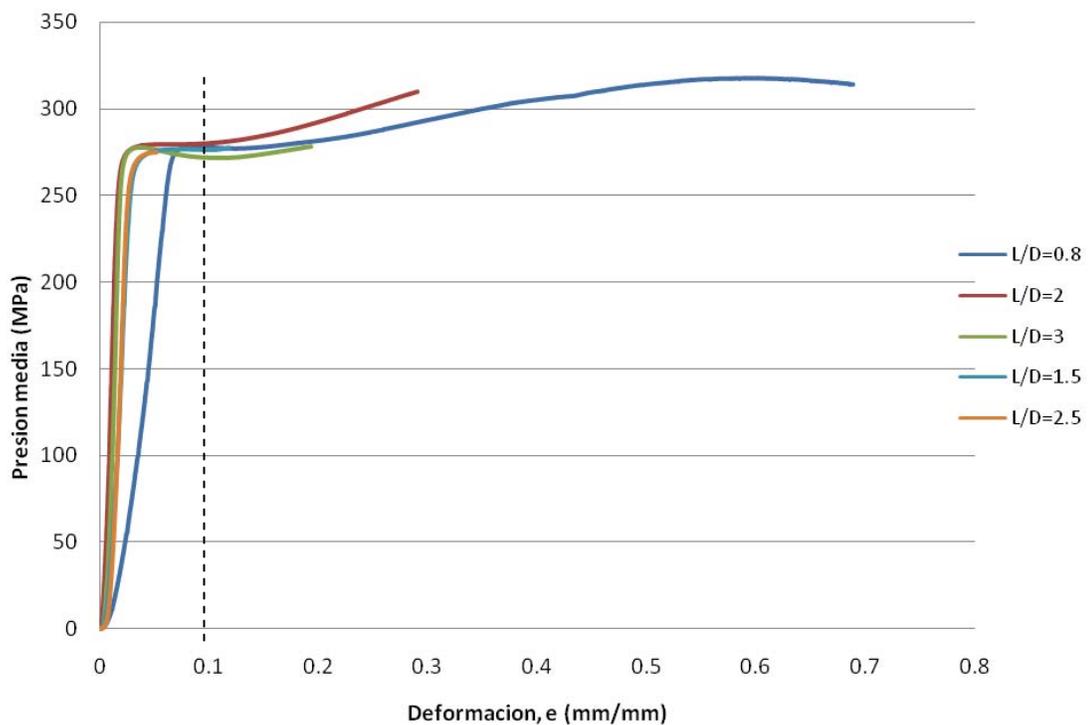
$$\bar{P} = \frac{F_i}{A_i} \quad (3.13)$$

Donde:

$\bar{P}$ : Esfuerzo verdadero.

$F_i$ : Fuerza de deformación.

$A_i$ : Área de contacto.



**Figura 3.10.** Curvas de  $\bar{P}$  vs  $e$  bajo distintas relaciones de esbeltez para el aceite de almendras.

Una vez obtenidos los valores de  $\bar{P}$  y  $e$  se grafican los mismos para distintas relaciones de esbeltez ( $L/D$ ), y se interceptan bajo una deformación constante como por ejemplo  $e=0.09$ , tal como se muestra en la figura 3.10.

De esta intercepción resultan una serie de puntos de  $\bar{P}$  experimentales que al graficarlos junto con su valor correspondiente del inverso de la relación de esbeltez ( $D/L$ ) generan una curva con tendencia rectilínea, cuya pendiente viene relacionada con el coeficiente de fricción  $\mu$  y su corte con el eje de  $\bar{P}$  representa el coeficiente  $\sigma$ . Tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$m = \frac{\mu \cdot \sigma}{3} \cdot \left[ \frac{1}{1+e} \right]^{3/2} \tag{3.14}$$

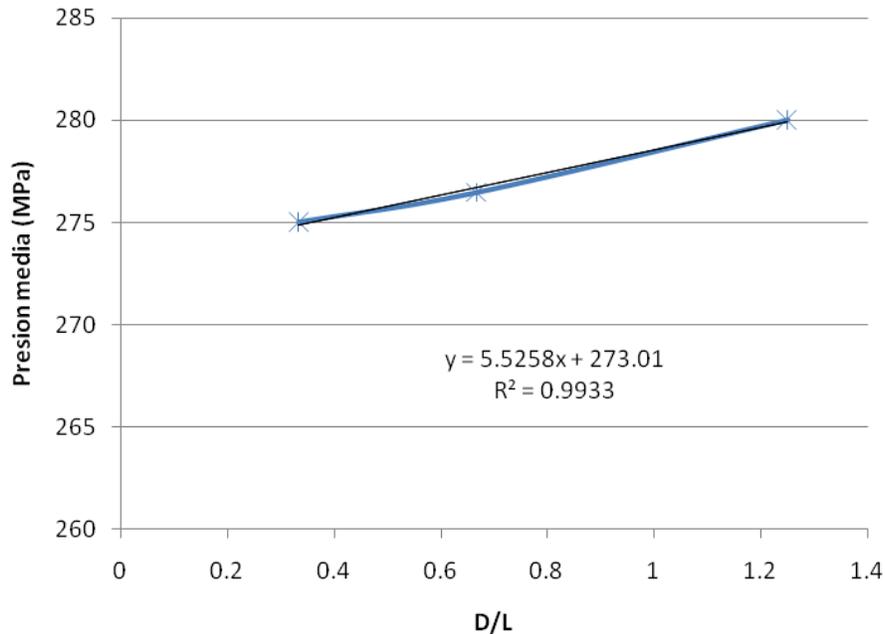
A continuación se observan los pares de valores  $\bar{P}$  vs  $D/L$  para una deformación de 0.09 utilizando como lubricante aceite de almendras.

**Tabla 3.4.** Valores de  $\bar{P}$  para distintas relaciones de esbeltez, bajo una deformación constante obtenidos en base al aceite de almendras.

L/D	e	P. media (MPa)	D/L
3	0.09	275	0.333333
1.5	0.09	276.45	0.666667
0.8	0.09	280	1.25

Seguidamente a la obtención de la curva  $\bar{P}$  vs  $D/L$ , ésta se ajusta en base a la ecuación de una recta  $y=a+mx$ , de donde se obtienen los valores del punto de corte con el eje de  $\bar{P}$  representado por  $\sigma$  y el valor de la pendiente  $m$ , correspondiente a la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \sigma + \frac{\mu \cdot \sigma}{3} \cdot \left[ \frac{1}{1+e} \right]^{3/2} \cdot \frac{d_0}{h_0} \tag{3.15}$$



**Figura 3.11.** Linealización de la curva  $\bar{P}$  vs D/L.

A partir de la ecuación 3.16, sustituyendo los valores de  $m$  y  $\sigma$ , se despeja el coeficiente de fricción  $\mu$  para cada lubricante, tal como se muestra a continuación:

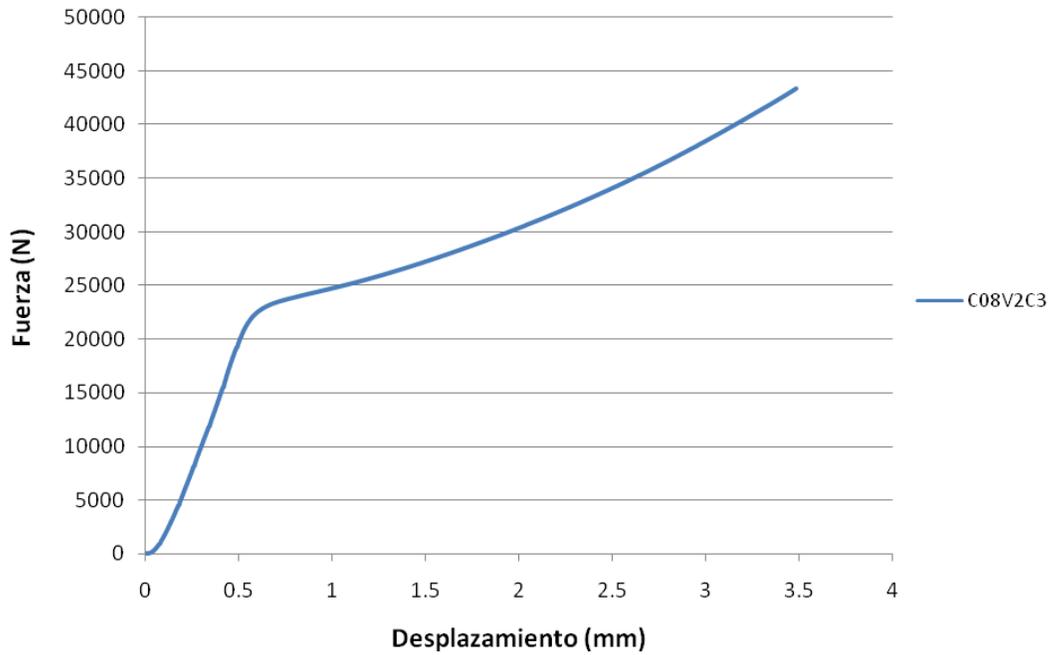
$$\mu = \frac{m \cdot 3}{\sigma \cdot \left[ \frac{1}{1+e} \right]^{3/2}} \quad (3.16)$$

De esta forma se obtienen los valores del coeficiente de fricción para los diversos lubricantes a utilizar durante la realización del proyecto investigativo, tales como son: Aceite de Almendras, Aceite de Castor, Bisulfuro de Molibdeno.

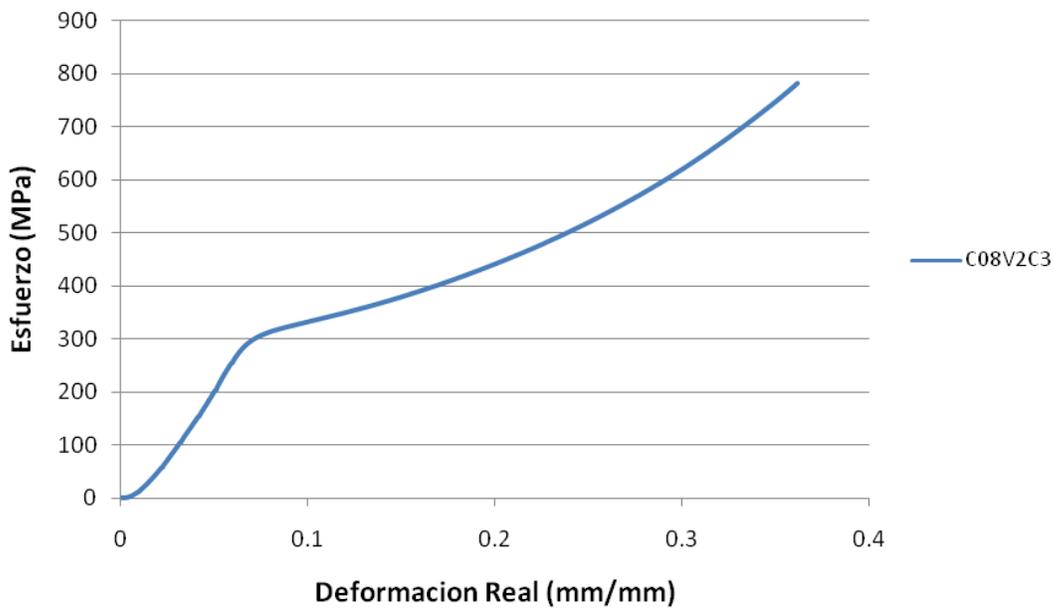
### 3.7 Procesamiento de los resultados obtenidos

Una vez que se ha logrado culminar con todos los ensayos planteados, se interpretan los resultados obtenidos tomando en cuenta la influencia de los parámetros estudiados, sobre el comportamiento del material sometido a

compresión, de tal manera de determinar el grado en que cada uno de ellos afecta su comportamiento bajo cargas compresivas.



**Figura 3.12.** Curva Fuerza vs Desplazamiento (F vs d).



**Figura 3.13.** Curva Esfuerzo-Deformación efectiva ( $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$ ).

Del ensayo de compresión cilíndrica se obtienen valores de fuerza y desplazamiento (Ver figura 3.12), los cuales deben ser procesados considerando el efecto que ocasiona dicha compresión sobre el material, con la intención de determinar el comportamiento mecánico del mismo, el cual se rige por la curva esfuerzo deformación efectiva, tal y como se muestra en la figura 3.13.

Para la determinación de esta curva es necesario realizar una serie de cálculos que permitan transformar los resultados experimentales, a continuación se demuestra la metodología utilizada:

Primeramente se determina la altura instantánea por medio de la siguiente ecuación.

$$h = h_0 - d \quad (3.10)$$

Donde:

$h$ : Altura instantánea

$h_0$ : Altura inicial

$d$ : desplazamiento de la máquina

Por medio de esta altura es posible determinar la deformación nominal o de ingeniería que sufre el material por medio de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{h}{h_0} - 1 \quad (3.12)$$

Donde:

$e$ : Deformación nominal

$h$ : Altura instantánea

$h_0$ : Altura inicial

Una vez que se obtiene la deformación nominal entonces es posible determinar la deformación real.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (3.17)$$

Luego se determina el esfuerzo nominal, por medio de la fuerza y el área instantánea.

$$S = \frac{F_i}{A_i} \quad (3.18)$$

Donde:

S: Esfuerzo nominal

$F_i$ : Fuerza de deformación

$A_i$ : Área de contacto

Ahora es necesario determinar el esfuerzo verdadero que viene expresado en términos de la presión media la cual se rige con la siguiente ecuación.

$$\bar{P} = S \cdot (1 + e) \quad (3.19)$$

Al haberse determinado la presión media es posible obtener el esfuerzo verdadero tomando en consideración el efecto de la fricción por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{\bar{P}}{\left(1 + \frac{\mu d_0}{3 h_0} \cdot \left[\frac{1}{1+e}\right]^{\frac{3}{2}}\right)} \quad (3.20)$$

Donde:

$\bar{P}$ : Presión media.

e: Deformación nominal.

$h_0$ : Altura inicial.

$d_0$ : Diámetro inicial.

$\mu$ : coeficiente de fricción.

Por la naturaleza del estado de esfuerzos presentes en el ensayo de compresión cilíndrica, la curva esfuerzo verdadero-deformación verdadera ( $\sigma$  vs.  $\epsilon$ ), se corresponde con una curva esfuerzo efectivo-deformación efectiva ( $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$ ), relacionado con el comportamiento mecánico el material.

La tabla que se muestra a continuación corresponde a la hoja de cálculo utilizada para la determinación de los parámetros señalados anteriormente.

**Tabla 3.5.** Hoja de cálculo de los parámetros utilizados.

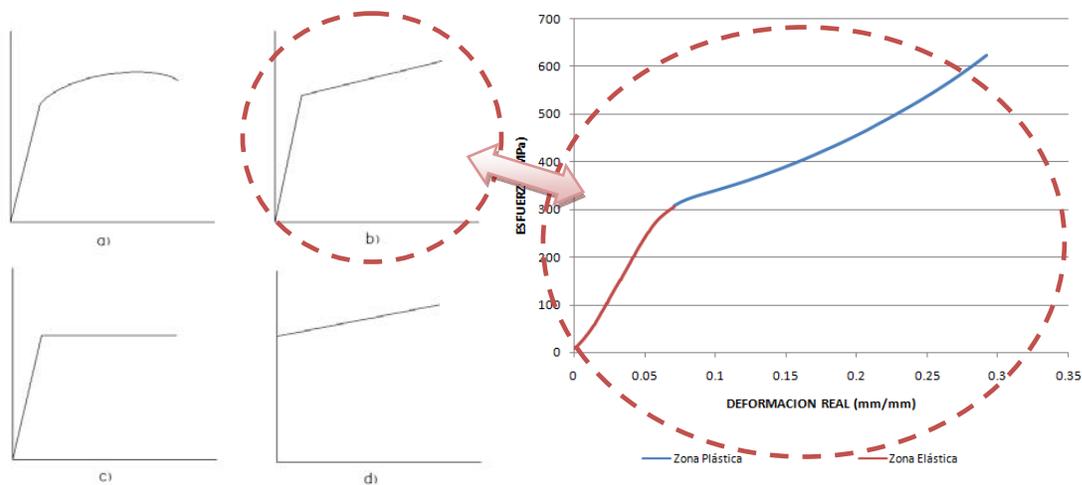
Pto	d (mm)	F (N)	h (mm)	e	S (MPa)	P (MPa)	$\epsilon$	$\sigma$ (MPa)
1	0	8	8	0	0,10185	0,1018	0	0,0996
2	0,002	9	7,998	0,00025	0,11459	0,1146	0,000249	0,1121
3	0,004	10	7,996	0,00050	0,12732	0,1273	0,000499	0,1246
4	0,006	11	7,994	0,00075	0,14005	0,1401	0,000749	0,1371
5	0,008	14	7,992	0,00100	0,17825	0,1784	0,000990	0,1746
6	0,010	18	7,990	0,00125	0,22918	0,2294	0,001249	0,2245
7	0,011	22	7,989	0,00137	0,28011	0,2804	0,001374	0,2744
8	0,013	28	7,987	0,00162	0,35650	0,3570	0,001623	0,3494
9	0,015	35	7,985	0,00187	0,44563	0,4464	0,001873	0,4369
10	0,017	43	7,983	0,00212	0,54749	0,5486	0,002122	0,5369
11	0,019	52	7,981	0,00237	0,66208	0,6636	0,002372	0,6494
12	0,021	62	7,979	0,00262	0,78940	0,7914	0,002621	0,7745
13	0,022	71	7,978	0,00275	0,90399	0,9064	0,002746	0,8870
14	0,024	84	7,976	0,00300	1,06951	1,0727	0,002995	1,0497
15	0,026	98	7,974	0,00325	1,24777	1,2518	0,003244	1,2250
16	:	:	:	:	:	:	:	:
17	:	:	:	:	:	:	:	:

### 3.8 Parametrización de la curva esfuerzo-deformación

Luego de obtenidos y evaluados los resultados se debe caracterizar el comportamiento del material, esto se logra a través del uso de los modelos matemáticos existentes como lo son el de Hollomon, Ludwik, etc. Con estos modelos lo que se hace es generar a través de varios puntos, la tendencia de

la curva de esfuerzo vs deformación, de tal manera de obtener la modelación del comportamiento del material bajo cargas compresivas que mejor se ajuste al mismo.

Una vez obtenido el comportamiento mecánico de un material, es posible determinar la tendencia a la que mejor se ajusta dicho metal. A continuación se muestra un conjunto de curvas teóricas que muestran los distintos comportamientos de esfuerzo-deformación para una tasa de deformación constante, en comparación con la curva obtenida de forma experimental.



**Figura 3.14.** Comportamientos de esfuerzo-deformación para una tasa de deformación constante (lado izquierdo), en comparación con la curva obtenida de forma experimental (lado derecho). a) Material elástico lineal con endurecimiento plástico no lineal (elasto-plástico), b) Material linealmente elástico y con endurecimiento lineal en la zona plástica, c) Material linealmente elástico y perfectamente plástico y d) Material rígido con endurecimiento lineal en la zona plástica.

Los mínimos cuadrados es uno de los métodos que permite obtener con gran precisión el ajuste de curvas, ya que es una técnica de análisis numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de datos se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los

mismos, de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. En su forma más simple, intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias entre los puntos generados por la función y los correspondientes en los datos.

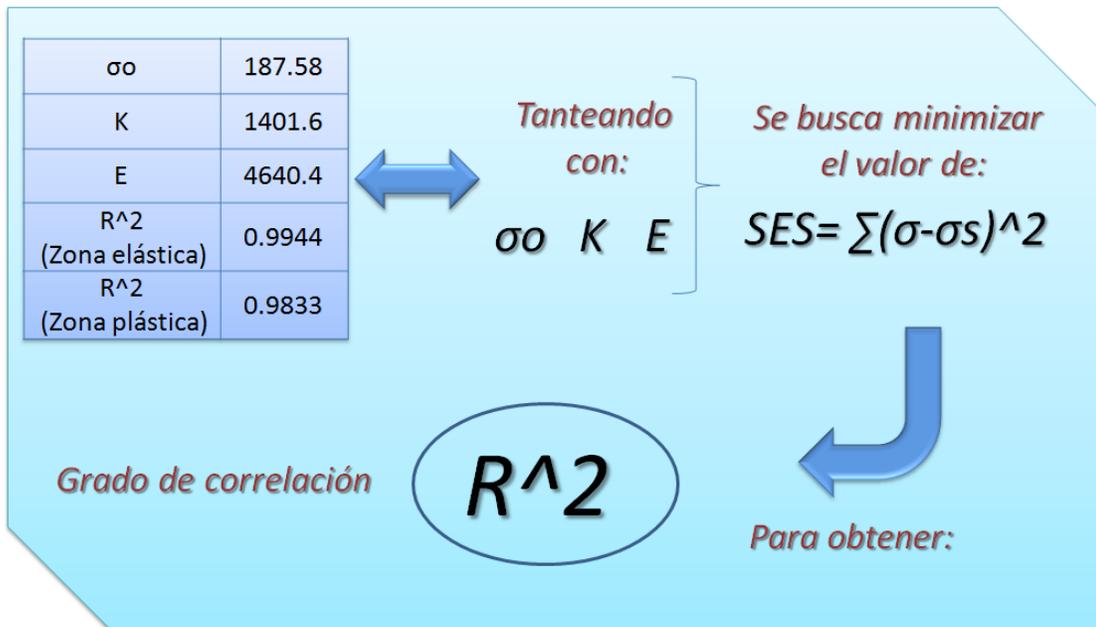
Basándose en un ajuste linealmente elástico y con endurecimiento lineal en la zona plástica tal como se muestra en la figura 3.14, se plantean las siguientes ecuaciones:

Desde esfuerzo 0 hasta  $\sigma_1$  (para zona elástica)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.21)$$

A partir de  $\sigma_1$  (para zona plástica)

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon \quad (3.22)$$



**Figura 3.15.** Esquema ilustrativo del método de iteración utilizado.

Como se muestra en la figura 3.15, este método permite conocer en qué medida los valores obtenidos se ajustan a la tendencia del modelo asumido, a

través de una correlación se define el grado de exactitud del ajuste tanto para la zona elástica como para la plástica. A continuación se muestra la ecuación del grado de correlación a utilizar:

$$R^2 = \frac{(\sigma - \sigma_s)^2}{(\sigma - \sigma_m)^2} \tag{3.23}$$

Luego de obtener los parámetros mencionados anteriormente para cada condición estudiada, estas se agrupan en función a la relación de esbeltez, para así obtener un promedio de cada parámetro y poder generar una ecuación representativa de cada relación de esbeltez. Este procedimiento se detalla a continuación:

**Tabla 3.7.** Hoja de cálculos para la determinación de parámetros para ecuaciones únicas.

L/D						
Lubricante	V	$\sigma$	K	E	R <sup>2</sup> (Zona Elástica)	R <sup>2</sup> (Zona Plástica)
A. Almendras	2	:	:	:	:	:
A. Almendras	6	:	:	:	:	:
A. Almendras	10	:	:	:	:	:
B. de Molibdeno	2	:	:	:	:	:
B. de Molibdeno	6	:	:	:	:	:
B. de Molibdeno	10	:	:	:	:	:
A. Castor	2	:	:	:	:	:
A. Castor	6	:	:	:	:	:
A. Castor	10	:	:	:	:	:
	Prom	:	:	:	:	:
	Dev	:	:	:	:	:
	% Error	:	:	:		

Donde:

Desviación estándar

$$Dev = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \tag{3.24}$$

Error

$$\%Error = \frac{Dev \cdot 100}{Pr om} \quad (3.25)$$

### 3.9 Diseño de la práctica de compresión cilíndrica

Posteriormente al análisis y caracterización del material, se determinan los parámetros más influyentes en los ensayos de compresión realizados, los cuales son la lubricación y la relación de esbeltez.

Se realiza un estudio de todo lo referente a compresión cilíndrica, y se establece que información debe estar presente en la práctica, que sirva de soporte para los estudiantes y que aporte todas las herramientas necesarias para la realización de la misma.

Partiendo de esto, se estableció trabajar con relaciones de esbeltez de 2 y 3, ya que las mismas son más fáciles de mecanizar y permiten evaluar efectos de pandeo y abarrilamiento. También se pide realizar un ensayo tracción con muestras de sección cilíndrica que sirva como base de comparación.

Se establece dentro de la práctica determinar el coeficiente fricción que está presente en el ensayo para cada lubricante utilizado, ya que así el estudiante aprenderá a conocer cómo se determina el mismo, contribuyendo con su desarrollo profesional. También se pide obtener la curva esfuerzo-deformación efectiva, así como la corrección de la misma por el efecto de la fricción, y aplicar el método de Brigdman para la corrección del ensayo de tracción.

Finalmente se realiza un instructivo, donde se incorpora esta información, con los objetivos a alcanzar durante la realización del ensayo, así

como también cada una de las actividades que permitan el cumplimiento de los mismos, de tal forma que sirva de guía para la realización de la práctica de compresión cilíndrica.

# CAPÍTULO 4

## *Resultados*

---

---

### 4.1 Análisis de la composición química

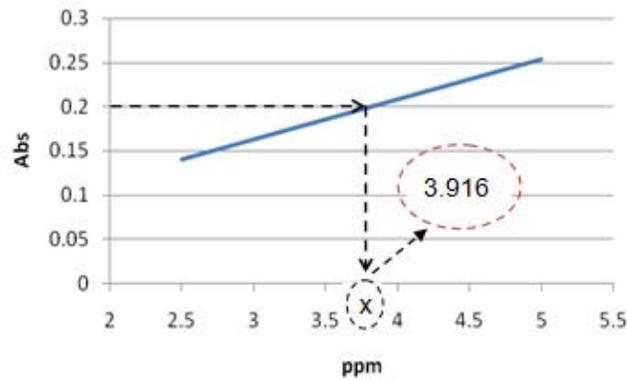
Obtenidos los valores de absorbancia (abs) de las concentraciones estandarizadas de cobre a 2.5 - 5 ppm y la de la muestra problema a través del método de absorción atómica (ver tabla 4.1 y 4.2), se grafican dichos puntos generando una línea recta abs vs ppm. Ver figura 4.1

**Tabla 4.1.** Valores de absorbancia para concentraciones estándar del cobre.

ppm	abs	ppm	abs
2.5	0.149	5	0.249
	0.121		0.265
	0.152		0.248
<b>Prom</b>	<b>0.141</b>	<b>Prom</b>	<b>0.254</b>

**Tabla 4.2.** Valor de absorbancia de la muestra de cobre ensayada.

abs	ppm
0.212	x
0.207	
0.197	
<b>Prom = 0.205</b>	

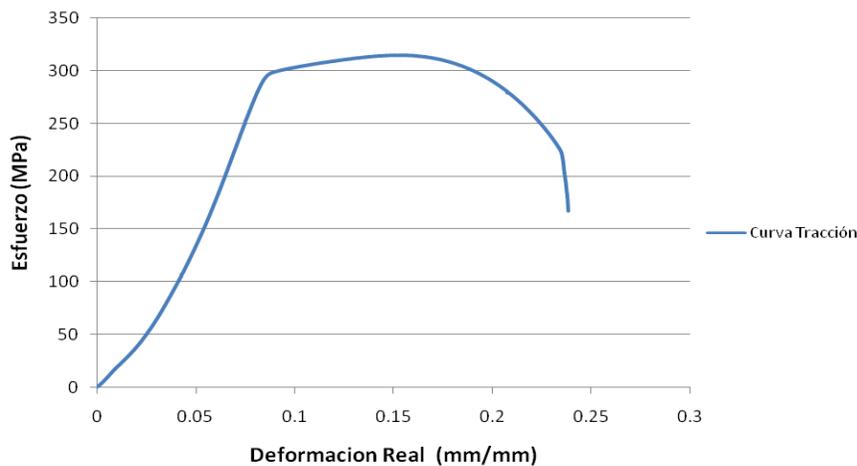


**Figura 4.1.** Curva de linealidad del cobre.

Al interceptar la gráfica anterior con el valor de absorbancia de la muestra problema se obtiene su concentración en ppm, cuyo valor es de 3.916 ppm. Con este valor de concentración se determina el porcentaje de cobre que se encuentra en la composición de la muestra medida por medio de la ecuación 3.1, dando como resultado un porcentaje de 97.29% de cobre.

## 4.2 Ensayos de tracción

Con los datos obtenidos de la máquina Galdabini se determina la curva  $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$  (ver figura 4.2), siguiendo la metodología mencionada en la sección 3.4.



**Figura 4.2.** Curva esfuerzo-deformación a tracción.

Esta curva se ve limitada por la aparición de la estricción por lo que fue necesario corregirla a partir del modelo de Bridgman descrito en el capítulo 3. De aquí se obtuvieron los siguientes parámetros:

**Tabla 4.3.** Parámetros para corrección de la curva de tracción.

<b>Parámetros de corrección</b>	
$\epsilon_f$	0.861565832
$\epsilon_u$	0.110932961
$\epsilon_f - \epsilon_u$	0.750632871
$\sigma_{av}/\sigma$	0.87
$\sigma_{av}$	426.6723724
$\sigma_f$	490.428014
$\sigma_u$	307.008

Donde:

$\epsilon_f$ : deformación verdadera a la ruptura (mm/mm).

$\epsilon_u$ : deformación a la carga máxima (mm/mm).

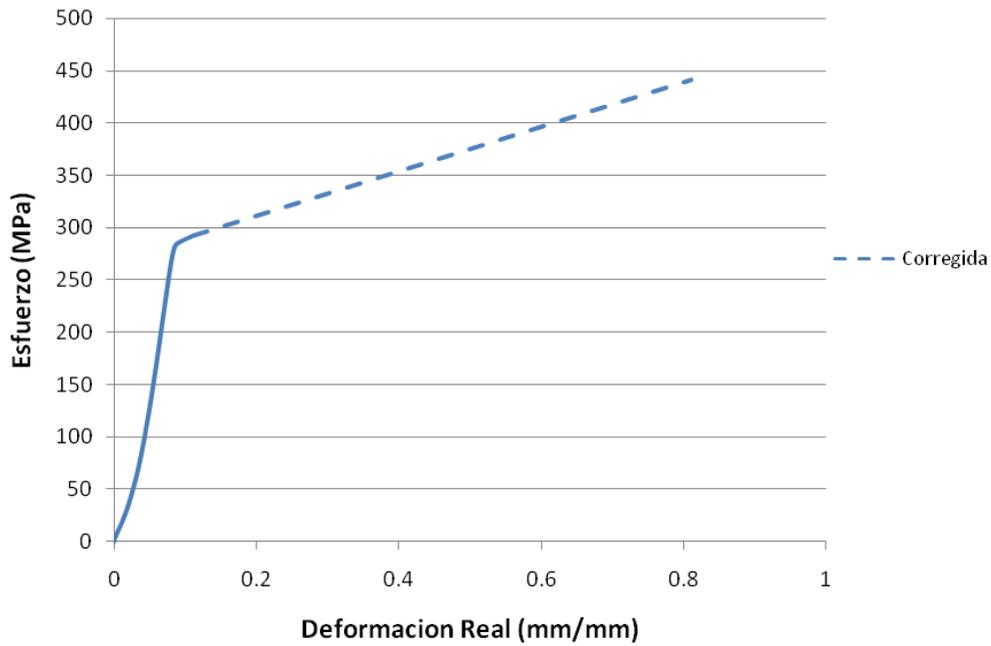
$\sigma_{av}$ : esfuerzo promedio (MPa).

$\sigma_f$ : esfuerzo verdadero a la ruptura (MPa).

$\sigma_u$ : esfuerzo a la carga máxima (MPa).

Con el par de puntos de esfuerzo-deformación a carga máxima y esfuerzo-deformación a la ruptura se extiende una línea que representa la corrección de la curva esfuerzo-deformación verdadera, tal como se muestra en la figura 4.3.

Del ensayo se tracción se tiene que el esfuerzo de fluencia es de 280,49 MPa, en donde al aplicar el criterio de Von Mises dado por la ecuación 3.9, se obtiene que el esfuerzo de fluencia a compresión es de 323.97 MPa.



**Figura 4.3.** Curva esfuerzo-deformación a tracción corregida por estricción.

A continuación se presentan los valores de fluencia obtenidos a través del ensayo de compresión, donde se indica el promedio de los mismos, la desviación estándar y el error que presentan con respecto al valor promedio.

**Tabla 4.4.** Valores experimentales de fluencia a compresión (MPa).

L/D	Lubricantes	V2	V6	V10
0.8	Almendra	306.38	308.33	315.47
	Bisulfuro	294.1	295.9	299.09
	Castor	292.44	282.88	291.07
2	Almendra	277.29	283.3	277.75
	Bisulfuro	272.59	283.41	286.58
	Castor	276.25	279.59	281.57
3	Almendra	265.27	272.92	274.57
	Bisulfuro	257.47	268.85	272.8
	Castor	273.69	275.66	279.45
<b>Prom</b>				<b>283.1361</b>
<b>Dev</b>				<b>13.56144</b>
<b>Error %</b>				<b>4.789724</b>

Con el valor promedio de los valores de fluencia a compresión y el valor de fluencia obtenido por tracción se determinó la relación  $Y_c/Y$  experimental dando como resultado un valor de  $Y_c/Y=1.0094$ .

### 4.3 Resultados experimentales

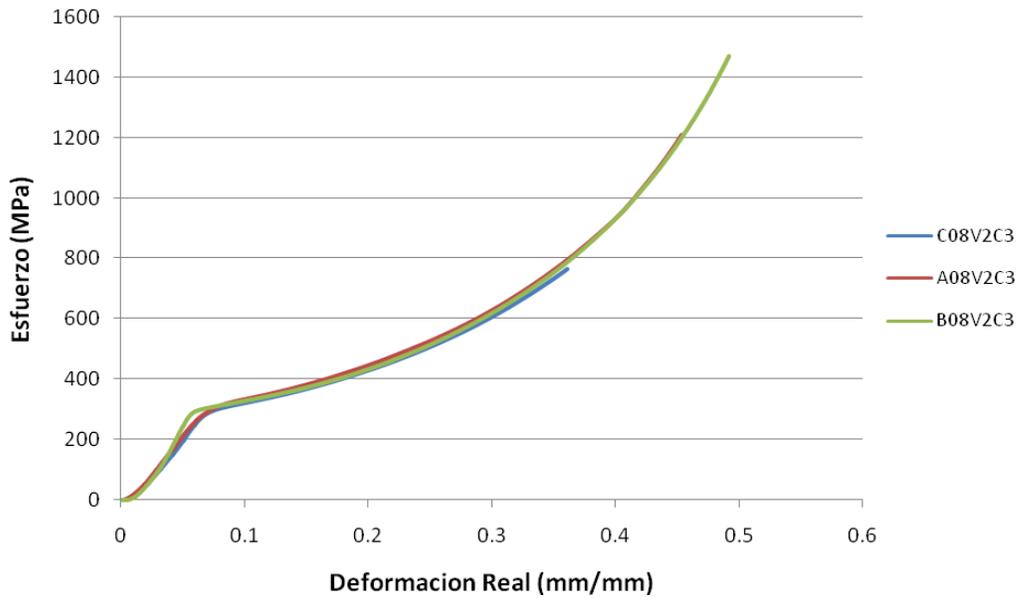
#### 4.3.1 Efecto de la lubricación.

Durante la realización de los ensayos se utilizaron tres tipos de lubricantes que pudieron o no haber afectado el comportamiento mecánico del material estudiado. A continuación se presenta un conjunto de curvas en donde se refleja el efecto que tienen los distintos lubricantes como son el aceite de almendra, aceite de castor y el bisulfuro de molibdeno bajo distintas condiciones experimentales de velocidad y relación de esbeltez.

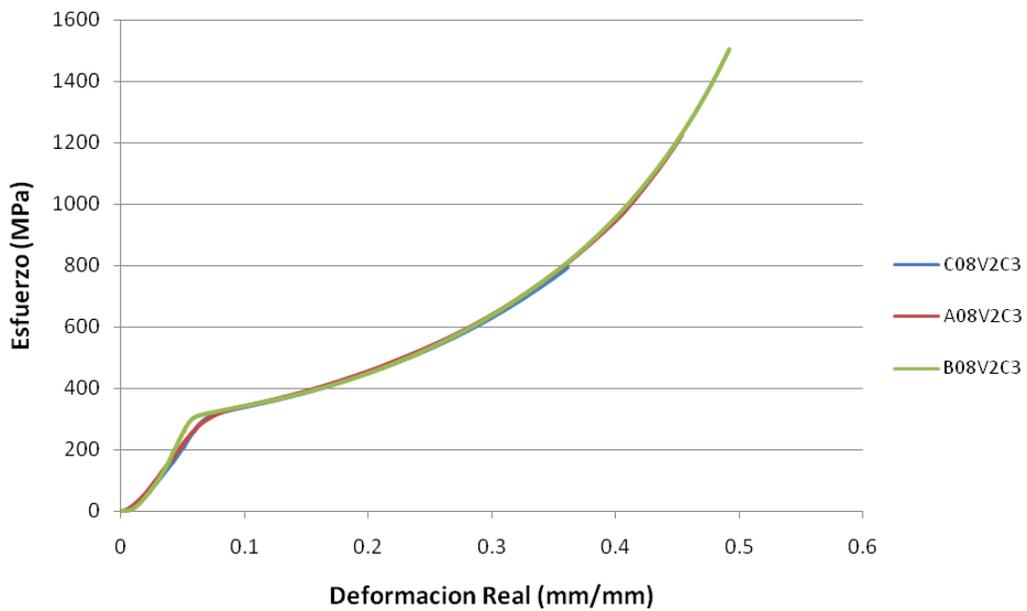
Para obtener el verdadero comportamiento de un material bajo efectos de fricción es necesario corregir dicho efecto, de tal manera que, independientemente del lubricante que se utilice el comportamiento del metal sea siempre el mismo. Es por ello que una vez obtenidas las curvas esfuerzo-deformación fue necesario corregirlas para cada condición de lubricación, relación de esbeltez y velocidad estudiadas, a través del factor de fricción calculado tal como se indicó en la sección 3.6, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 4.5.** Coeficientes de fricción para cada lubricante.

<b>Lubricante</b>	<b>Coeficiente de fricción experimental (<math>\mu</math>)</b>
Aceite de almendras	0.069
Bisulfuro de molibdeno	0.1092
Aceite de castor	0.1506



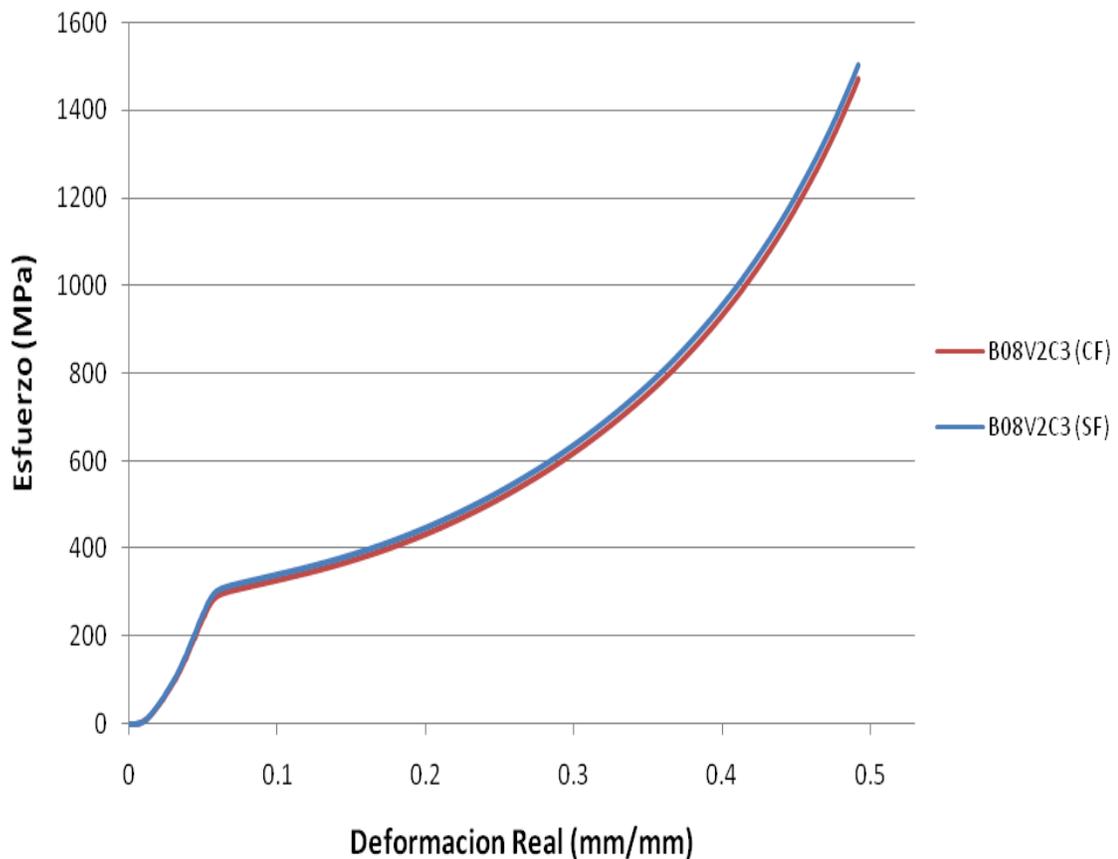
**Figura 4.4.** Curvas esfuerzo vs deformación real sin corregir el efecto de la fricción, para  $L/D= 0.8$ , Velocidad 2 mm/min.



**Figura 4.5.** Curvas esfuerzo vs deformación real corrigiendo el efecto de la fricción, para  $L/D= 0.8$ , Velocidad 2 mm/min.

En la figura 4.4 se muestra un caso representativo para la condición de relación de esbeltez  $L/D= 0.8$  y una velocidad  $V=2$  mm/min, bajo distintos lubricantes, en donde se observa el comportamiento del material cuando no se ha corregido por efectos de fricción, y en la figura 4.5 cuando se ha realizado la corrección.

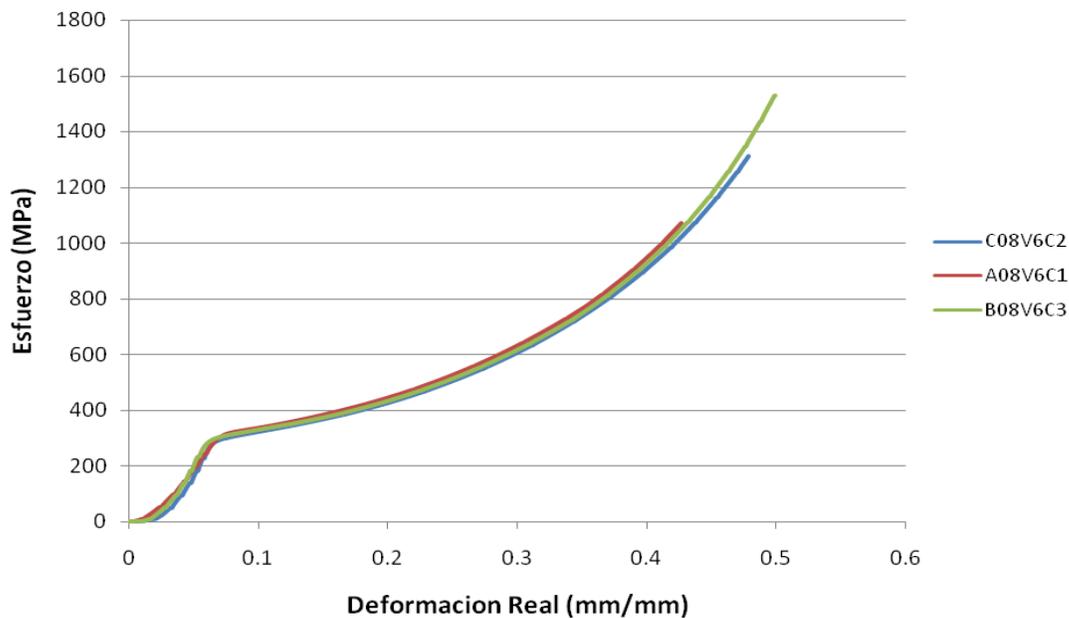
A continuación se muestra en la figura 4.6 el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación al corregir y al no corregir el efecto de la fricción.



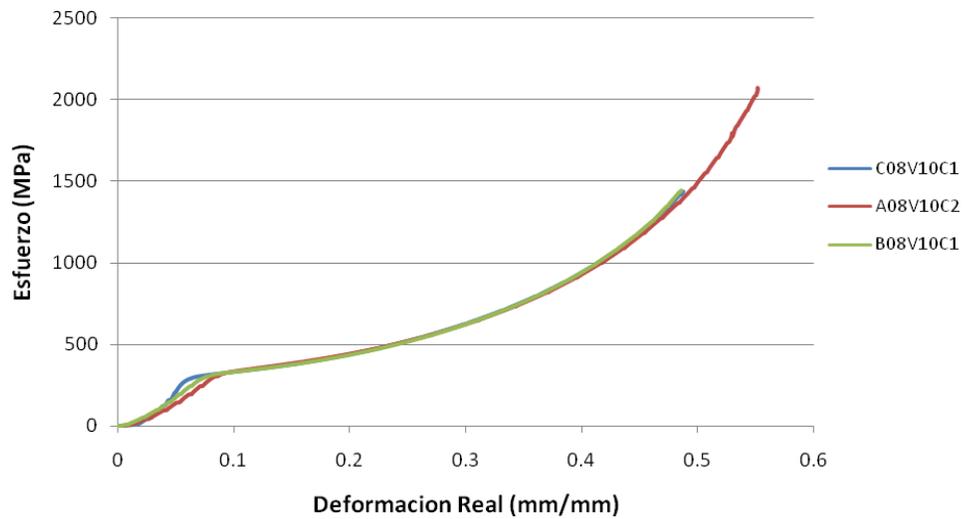
**Figura 4.6.** Comparación entre curvas esfuerzo vs deformación real, corrigiendo y sin corregir el efecto de la fricción (CF: corrigiendo efecto de fricción, SF: sin corregir efecto de fricción), para  $L/D= 0.8$ , Velocidad 2 mm/min.

En las figuras anteriores se logra apreciar que la fricción no influye de forma significativa en el comportamiento del material, para ver de forma más clara este efecto, en la figura 4.6 se presentan los comportamientos de las curvas esfuerzo vs deformación real para una misma condición experimental, cuando se corrige o no la fricción. De aquí se observa que la variación que existe entre las curvas es prácticamente despreciable.

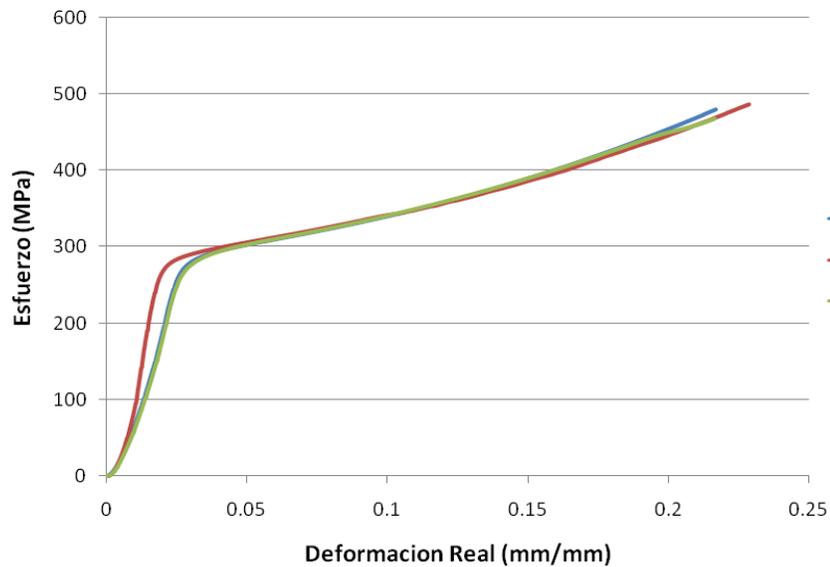
El estudio de la lubricación permite apreciar en qué medida influye el efecto de la fricción en el proceso; en la figura 4.7 en donde ya se ha corregido el efecto de la fricción, es posible observar que para los distintos lubricantes el comportamiento del material fue muy similar, condición que se mantuvo para las distintas combinaciones de esbeltez y velocidades estudiadas. A continuación se presenta el comportamiento del material para dichas condiciones una vez corregida la fricción en todas las gráficas.



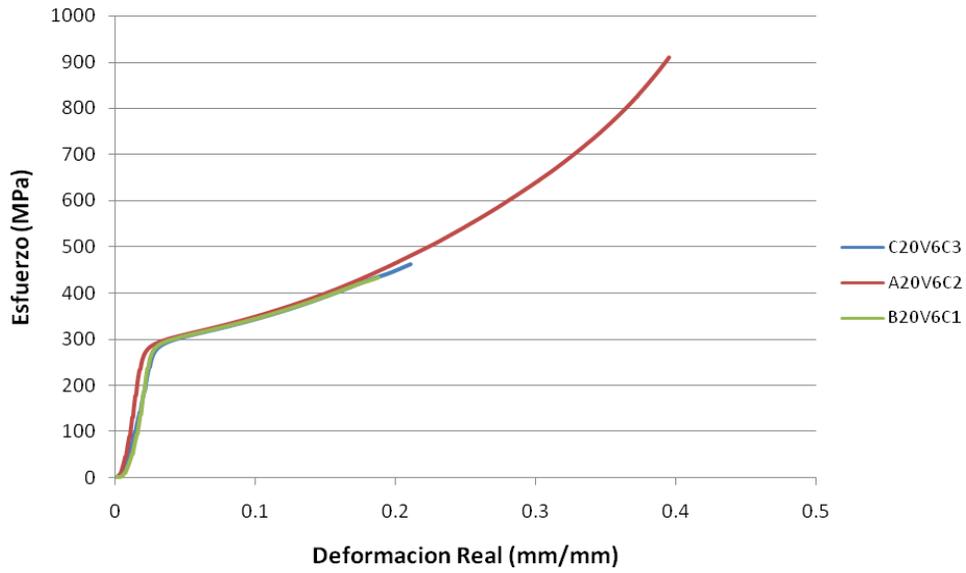
**Figura 4.7.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para  $L/D= 0.8$ , Velocidad 6 mm/min.



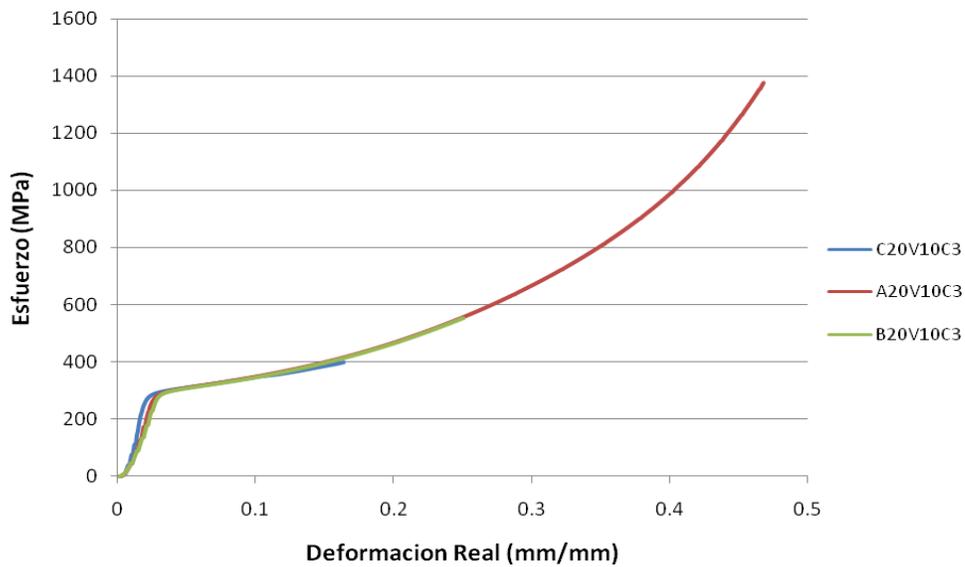
**Figura 4.8.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para  $L/D=0.8$ , Velocidad 10 mm/min.



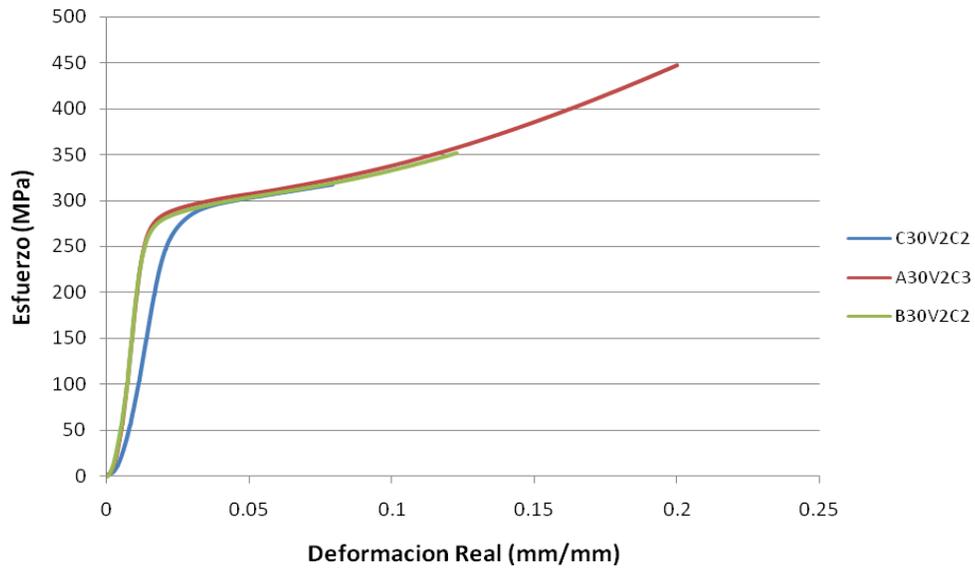
**Figura 4.9.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para  $L/D=2$ , Velocidad 2 mm/min.



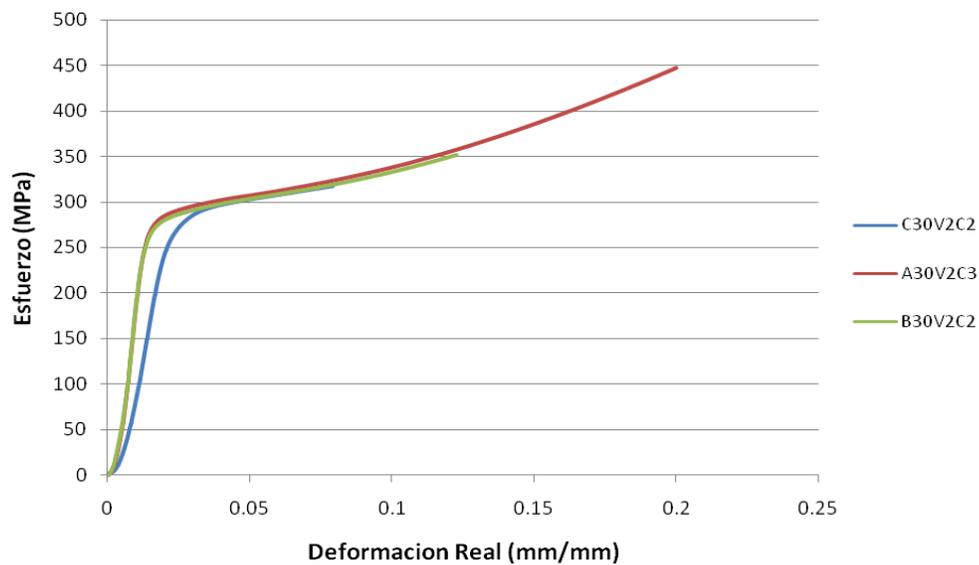
**Figura 4.10.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para L/D= 2, Velocidad 6 mm/min.



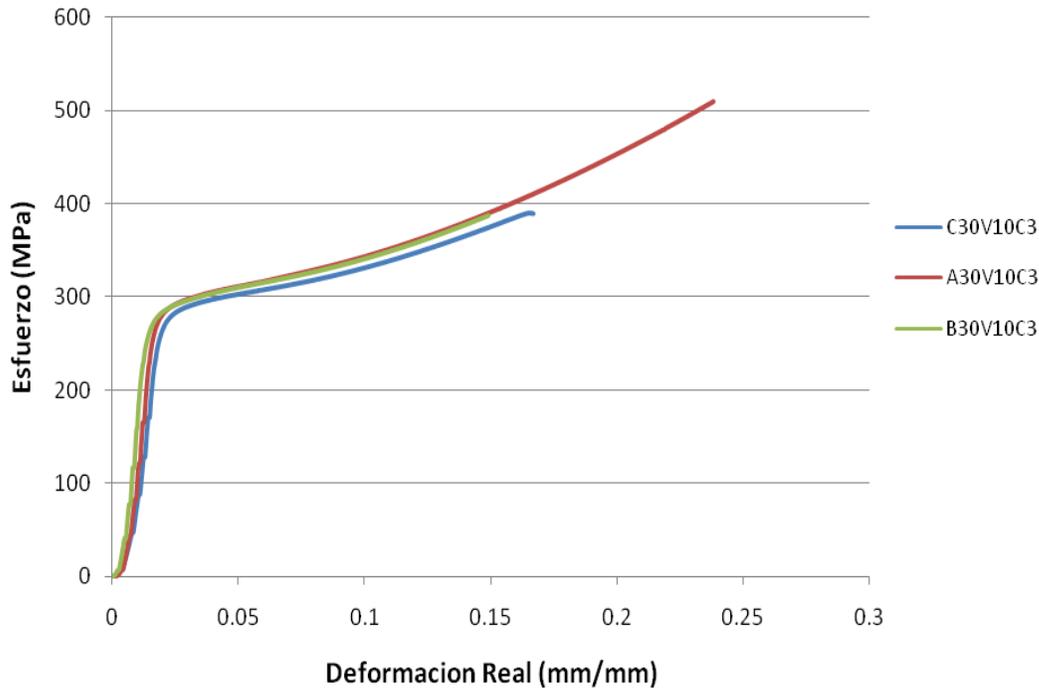
**Figura 4.11.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para L/D= 2, Velocidad 10 mm/min.



**Figura 4.12.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para  $L/D=3$ , Velocidad 2 mm/min.



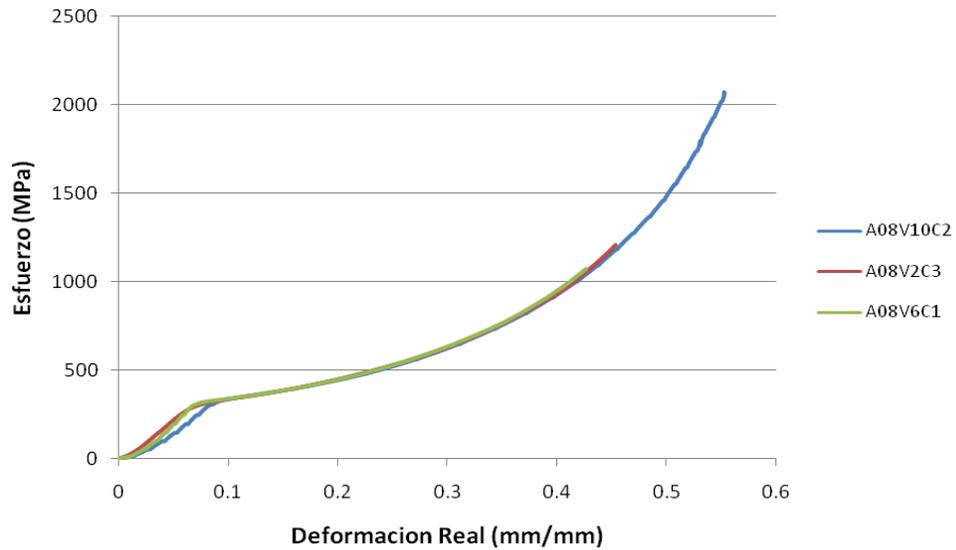
**Figura 4.13.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para  $L/D=3$ , Velocidad 6 mm/min.



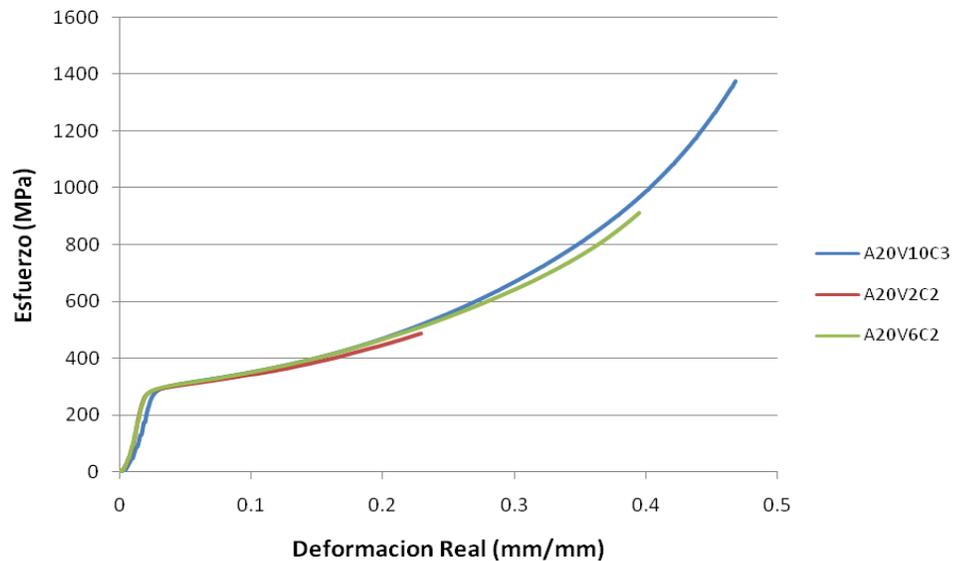
**Figura 4.14.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de los lubricantes (A: aceite de almendras, B: bisulfuro de molibdeno y C: aceite de castor) para  $L/D=3$ , Velocidad 10 mm/min.

#### 4.3.2 Efecto de la velocidad.

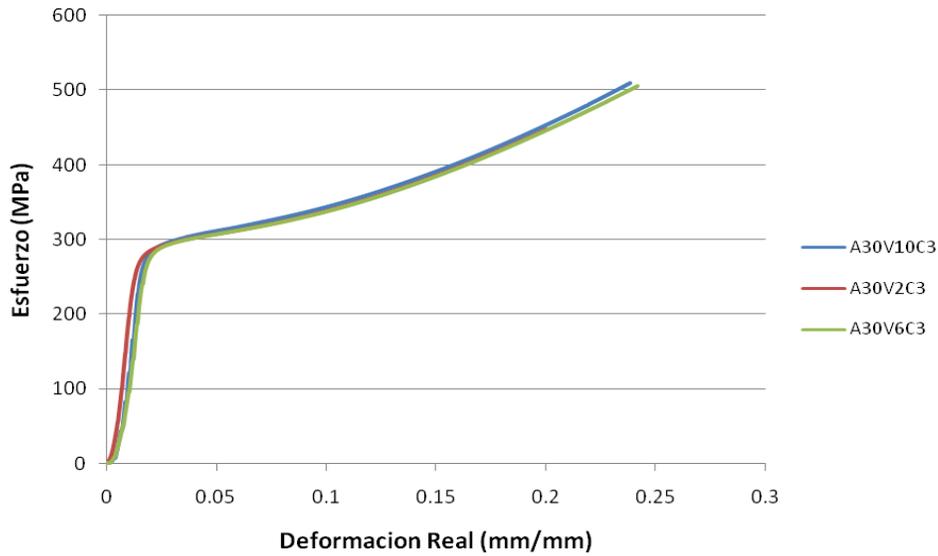
En las siguientes figuras se presenta el efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento del material, bajo distintas condiciones de lubricación y relaciones de esbeltez. Como se observa en la figura 4.15 la variación de la velocidad en el intervalo estudiado no influye en las curvas esfuerzo-deformación verdadero del material de manera significativa, caso que se mantuvo en la mayoría de las condiciones obtenidas para este estudio, a excepción de las curvas que se presentan en las figuras 4.16 y 4.19 (cuyas condiciones de estudio son:  $L/D=2$  y aceite de almendras;  $L/D=2$  y bisulfuro de molibdeno, respectivamente), en donde se aprecia cierta variación.



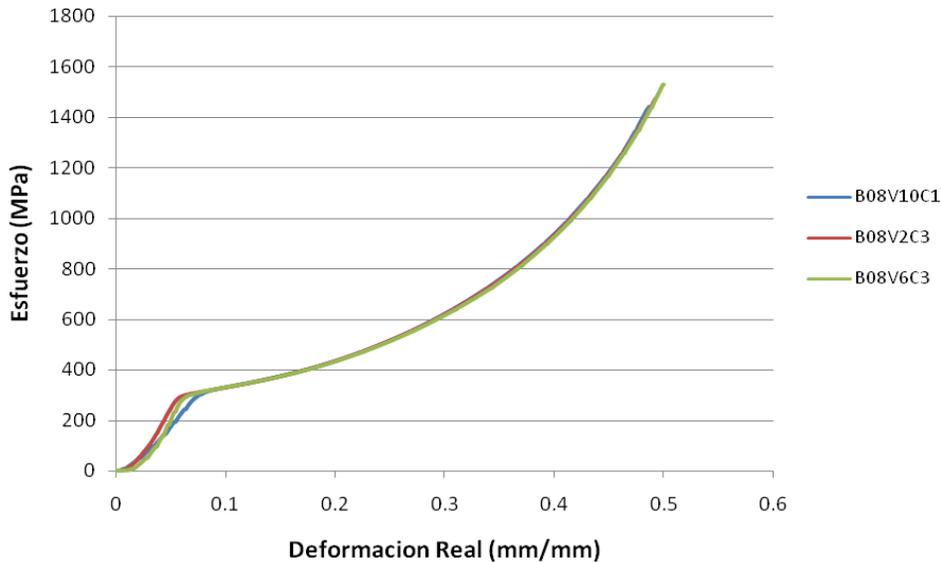
**Figura 4.15.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 0.8, aceite de almendras.



**Figura 4.16.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 2, aceite de almendras.



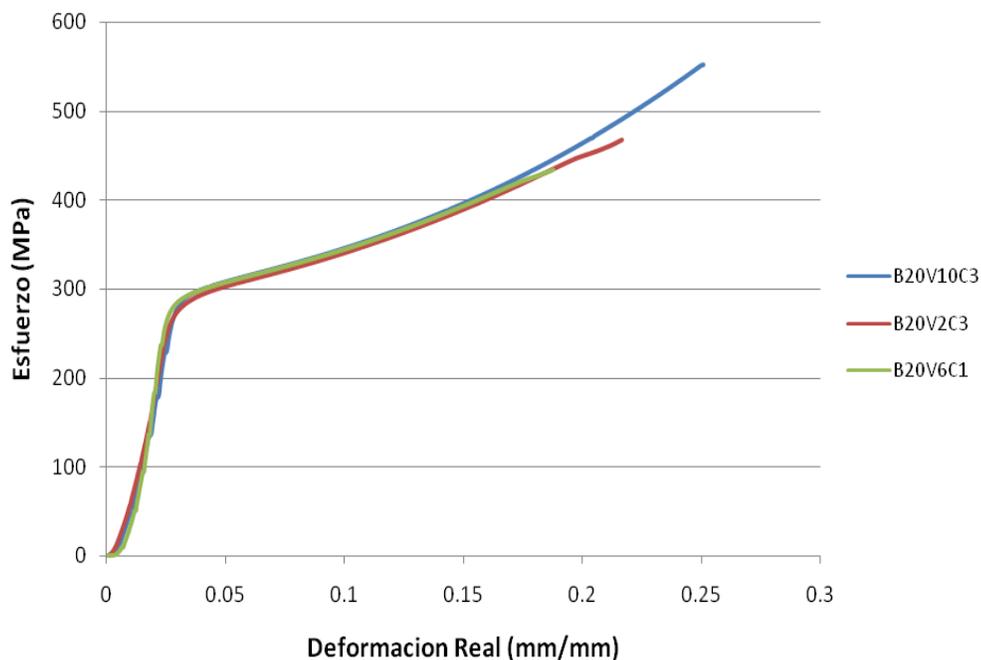
**Figura 4.17.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 3, aceite de almendras.



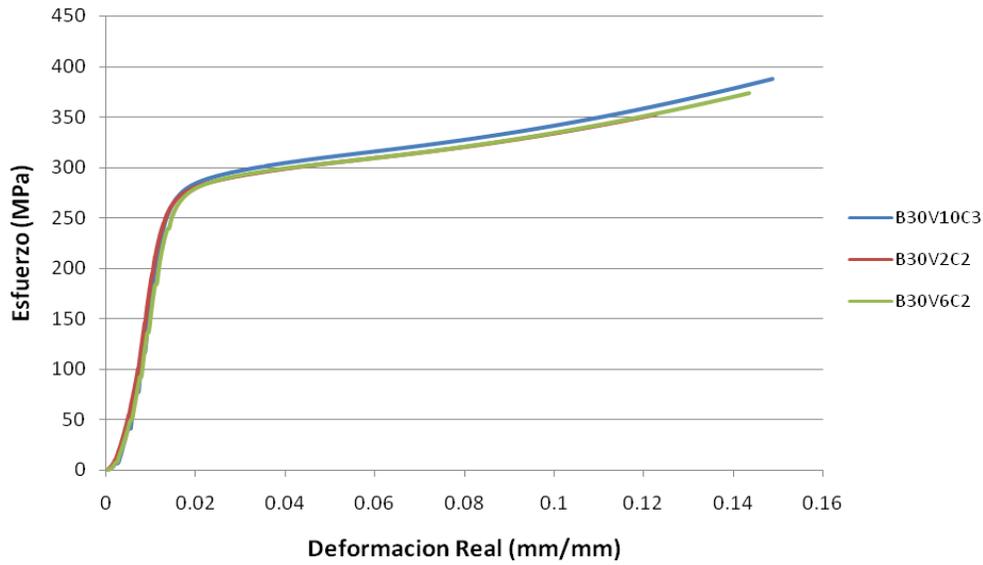
**Figura 4.18.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 0.8, bisulfuro de molibdeno.

La figura 4.16 es uno de los casos en donde se presenta cierta variación en el comportamiento de las curvas con la velocidad, en ésta se aprecia que a partir de una deformación de  $\bar{\epsilon} = 0.2$ , a medida que la velocidad aumenta las curvas muestran mayores esfuerzos, siendo la de mayores esfuerzos a la velocidad de 10 mm/min.

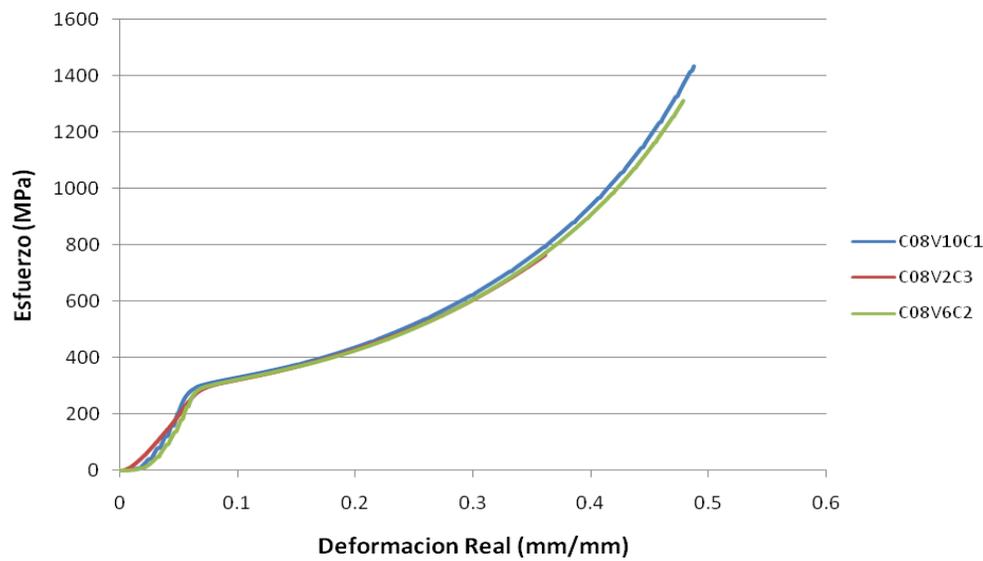
La figura 4.19 es otro de los casos en donde se presenta cierta variación en el comportamiento de las curvas con la variación de la velocidad, en ésta se puede apreciar que a partir de una deformación de  $\bar{\epsilon} = 0.2$ , para una velocidad de 10 mm/min la curva tiene mayores esfuerzos comparada con las otras velocidades de 2 y 6 mm/min, las cuales tienen comportamientos similares. En este caso, los parámetros estudiados son un lubricante a base de bisulfuro de molibdeno y la relación de esbeltez de 2.



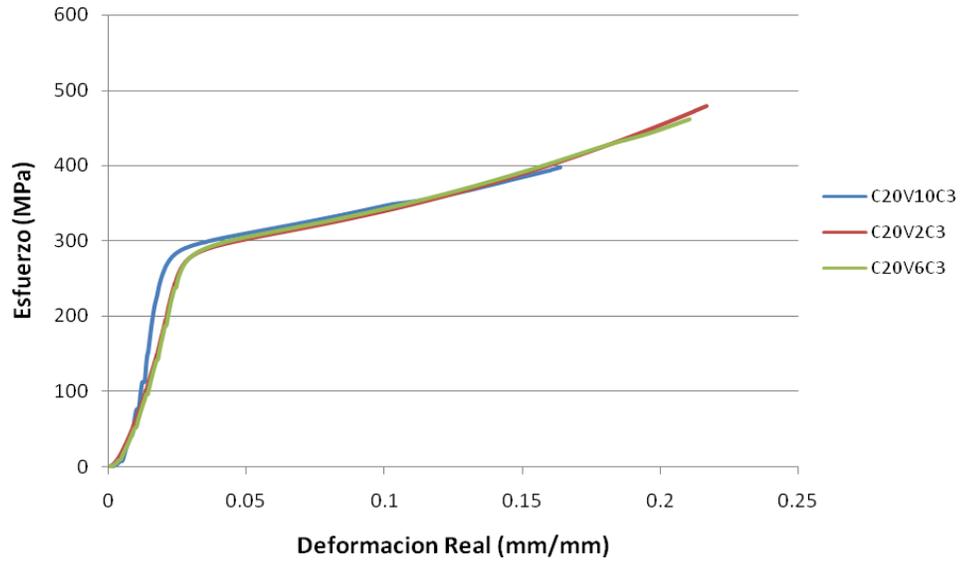
**Figura 4.19.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para  $L/D = 2$ , bisulfuro de molibdeno.



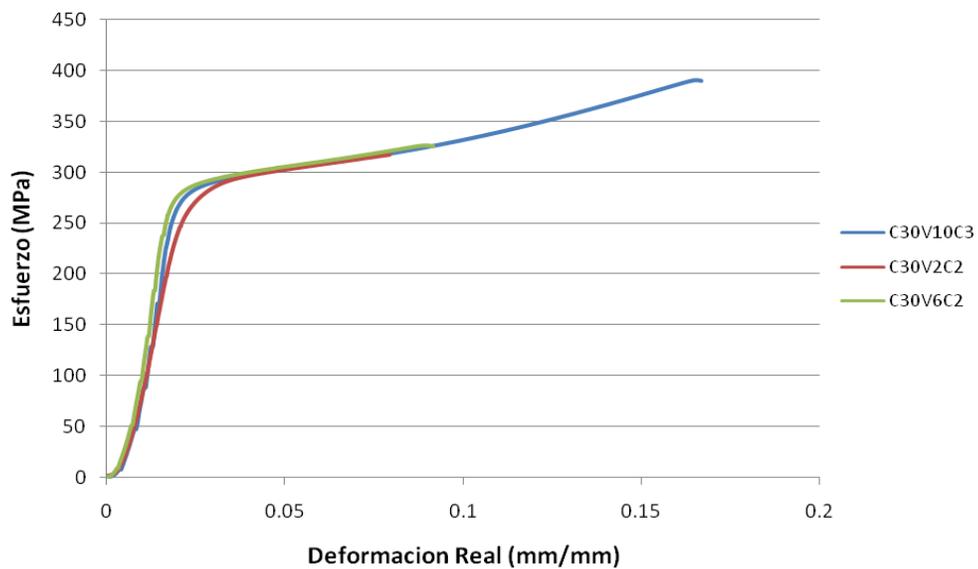
**Figura 4.20.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 3, bisulfuro de molibdeno.



**Figura 4.21.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 0.8, aceite de castor.



**Figura 4.22.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10mm/min) para L/D= 2, aceite de castor.

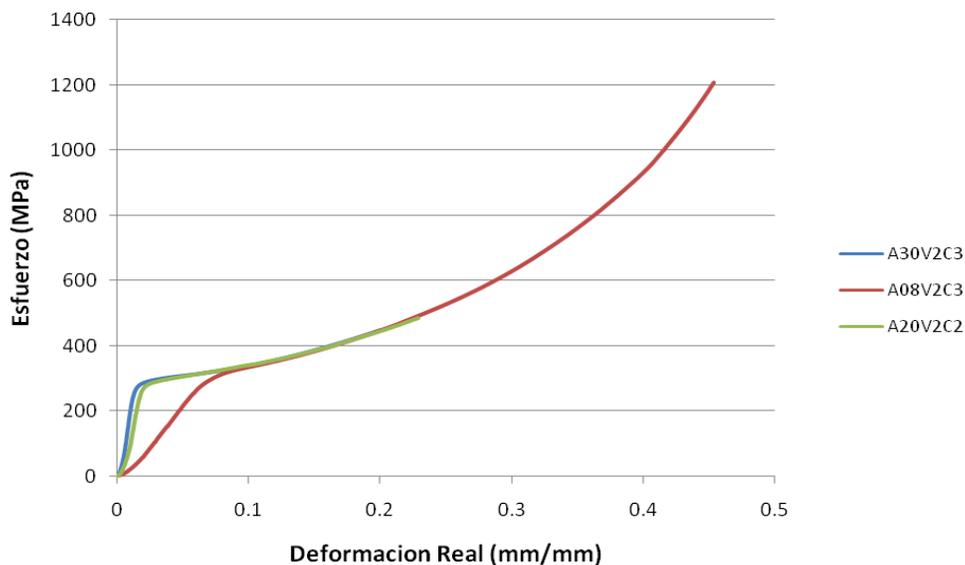


**Figura 4.23.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las velocidades (V2: 2 mm/min, V6: 6 mm/min, V10: 10 mm/min) para L/D= 3, aceite de castor.

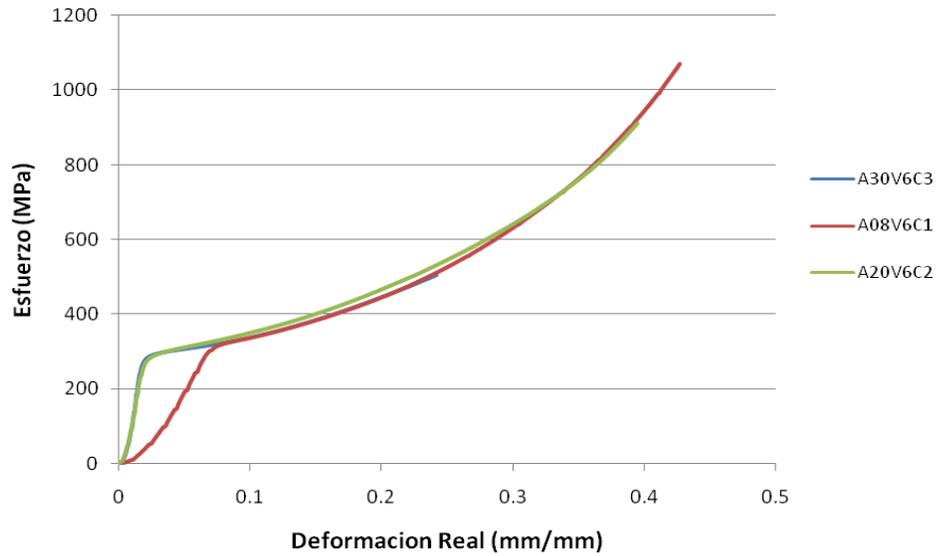
### 4.3.3 Efecto de la relación de esbeltez

En el estudio de la relación de esbeltez se busca conocer el comportamiento de un material en función de la proporción diámetro y altura, con la intención de saber si el cambio de la geometría de la probeta influye de manera determinante en su comportamiento.

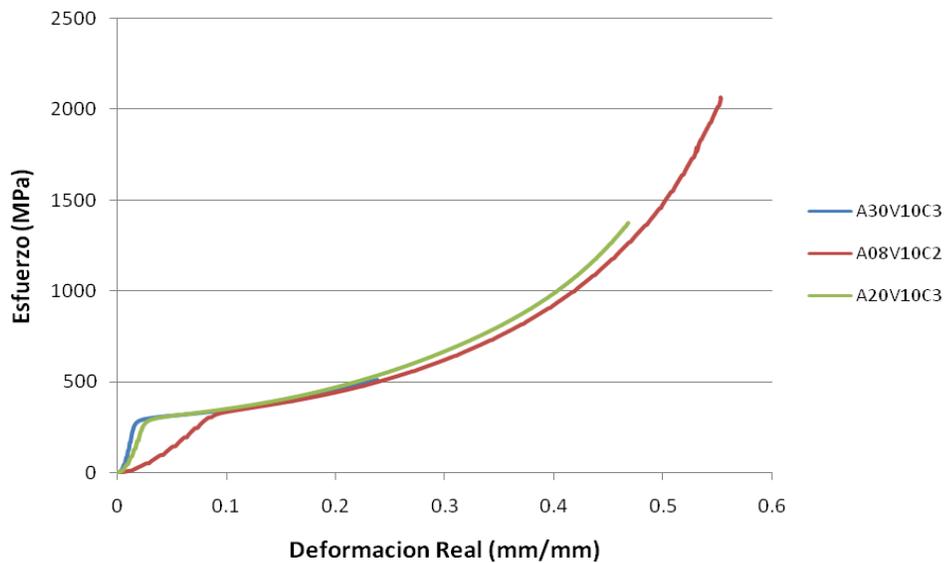
En el conjunto de curvas que se presentan a continuación se muestra el efecto de la relación de esbeltez en las curvas esfuerzo-deformación verdadero del material, estudiándose distintas relaciones de  $L/D$  para unas mismas condiciones de velocidad y lubricación. En la figura 4.24 se observa cómo las curvas se asemejan entre sí, sin embargo, para una relación de  $L/D=0.8$  se obtiene un mayor intervalo de deformación e igualmente presenta una gran variación en su comportamiento elástico comparada con las otras relaciones de  $L/D$ . Este comportamiento se mantuvo constante para las distintas combinaciones de velocidad y lubricación.



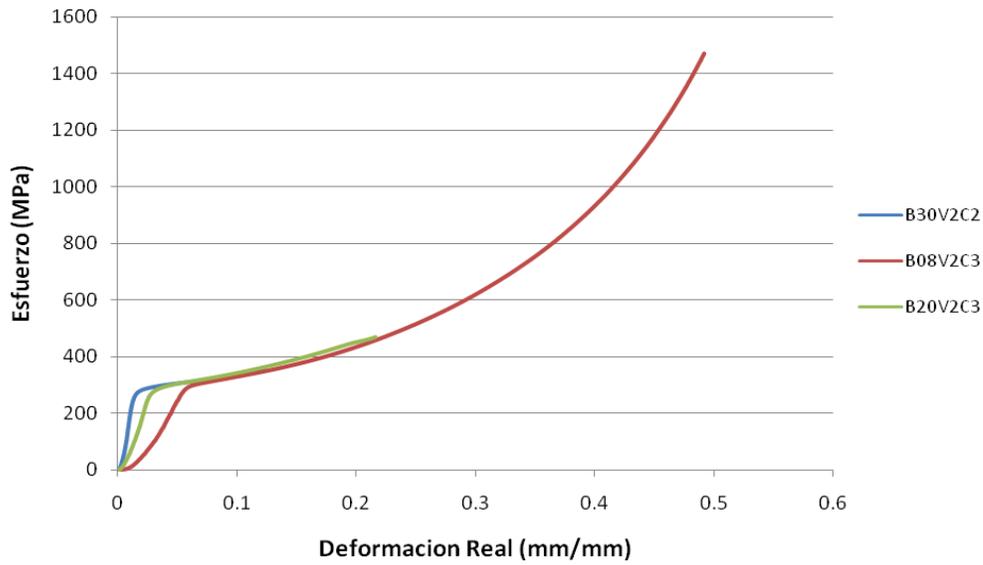
**Figura 4.24.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 2 mm/min, aceite de almendras.



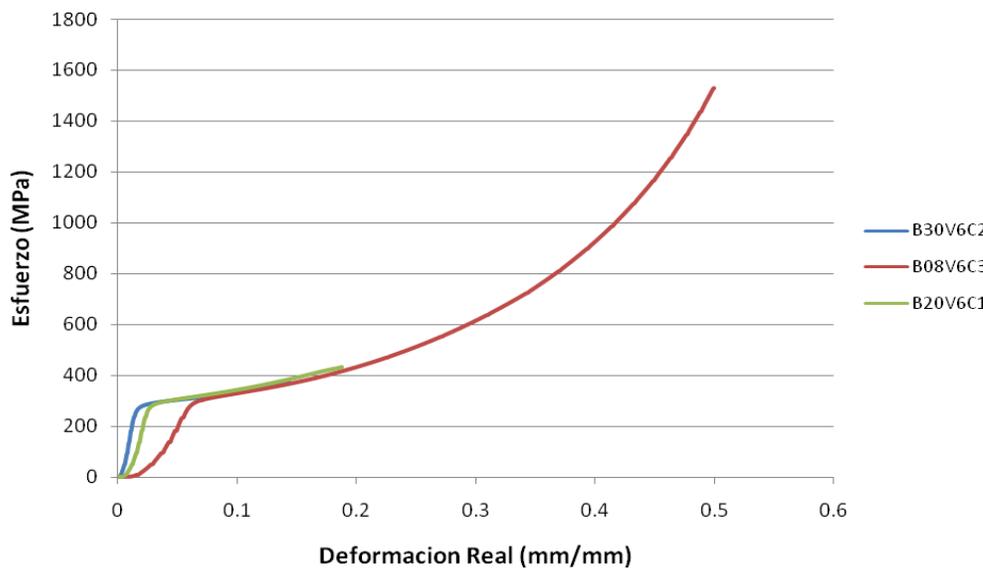
**Figura 4.25.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 6 mm/min, aceite de almendras.



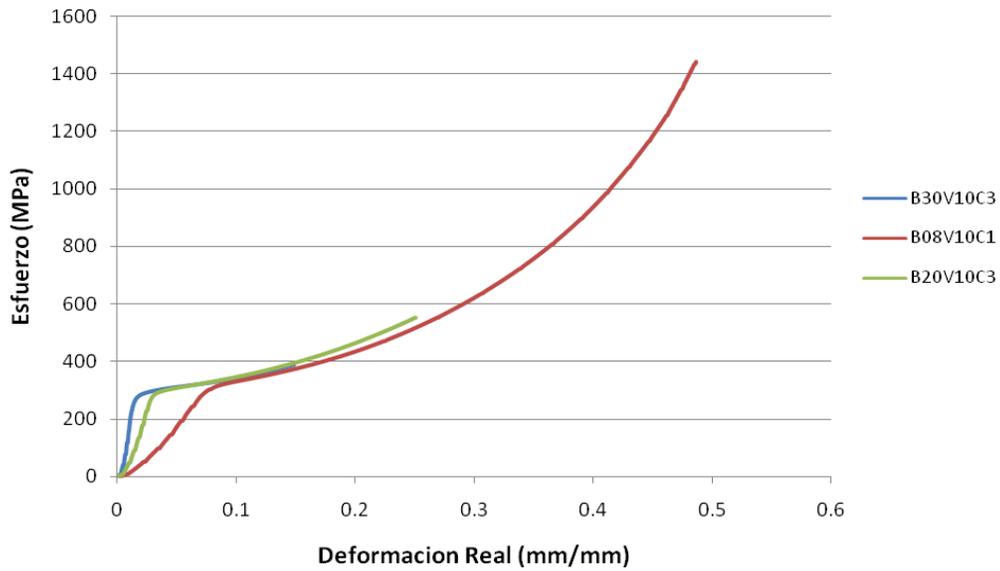
**Figura 4.26.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 10 mm/min, aceite de almendras.



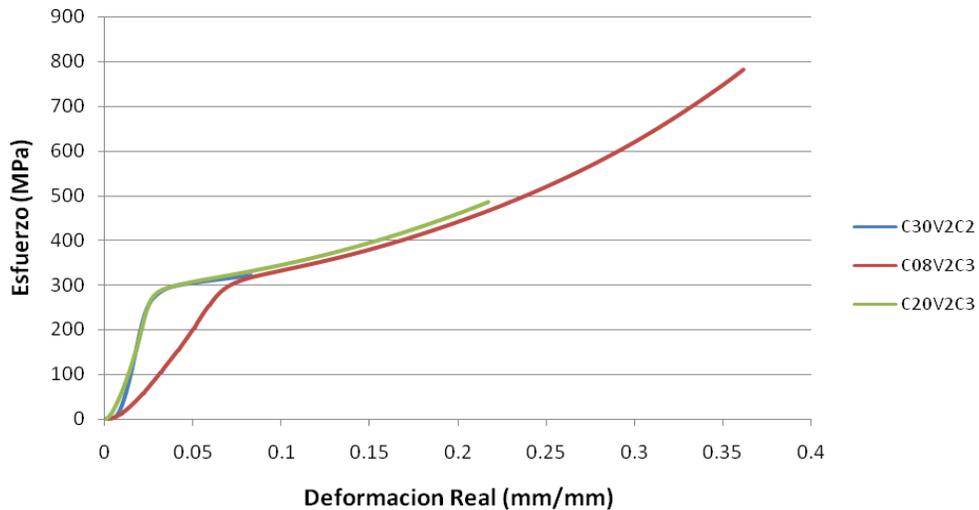
**Figura 4.27.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 2 mm/min, bisulfuro de molibdeno.



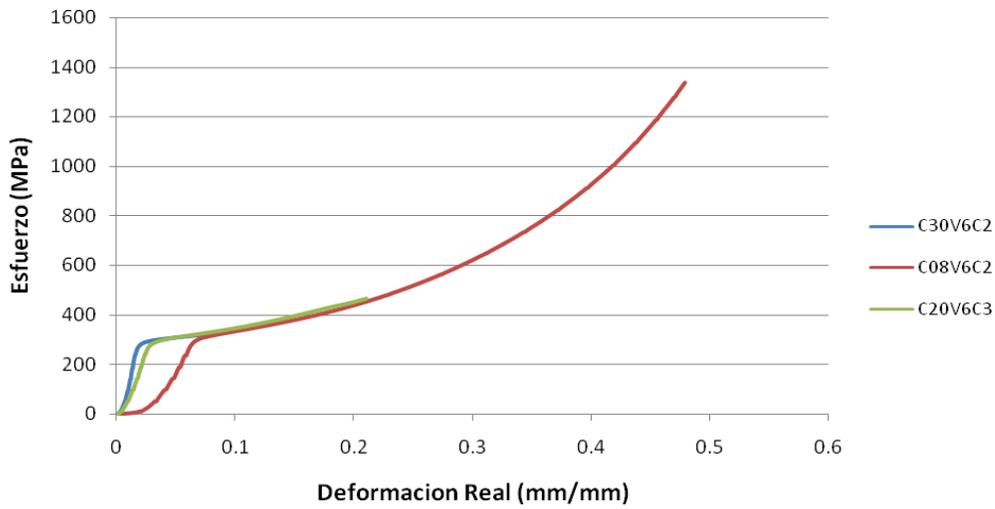
**Figura 4.28.** Curvas esfuerzo vs deformación Real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 6 mm/min, bisulfuro de molibdeno.



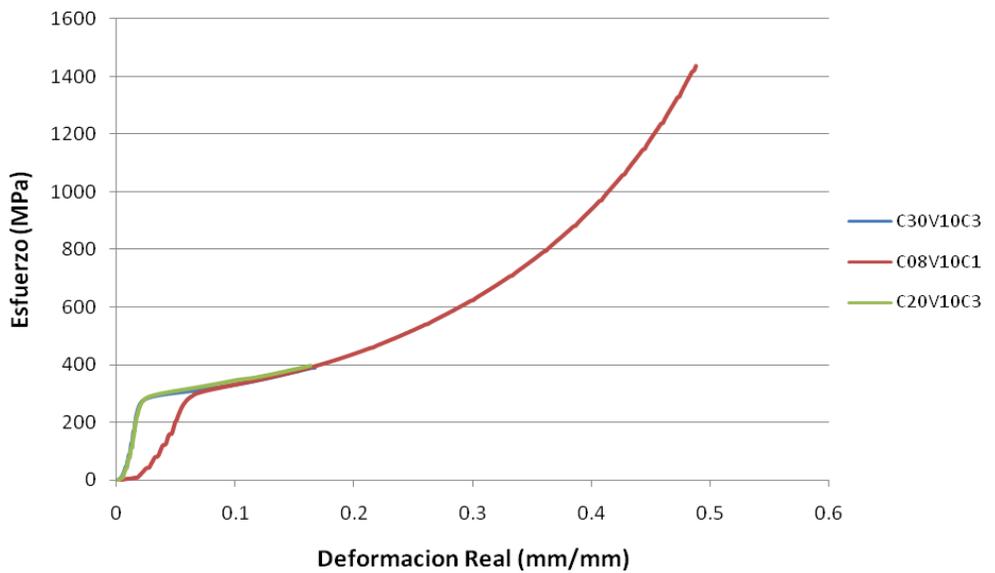
**Figura 4.29.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 10 mm/min, bisulfuro de molibdeno.



**Figura 4.30.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 2 mm/min, aceite de castor.



**Figura 4.31.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 6 mm/min, aceite de castor.



**Figura 4.32.** Curvas esfuerzo vs deformación real. Comparación de las relaciones de esbeltez ( $L/D=0.8$ ,  $L/D=2$  y  $L/D=3$ ) para velocidad 10 mm/min, aceite de castor.

## 4.2 Parametrización de las curvas esfuerzo vs deformación

Al observar la curva de esfuerzo-deformación obtenida, se aprecia que la misma presenta una tendencia lineal tanto en la zona elástica como en la plástica, es por ello, que al aplicar el método de los mínimos cuadrados se utiliza como modelo de ajuste el de un material con comportamiento lineal en la zona elástica y con endurecimiento lineal en la plástica, regidas por el modelo descrito por las ecuaciones 3.21 y 3.22 citadas en el capítulo 3.

A partir de estas ecuaciones es posible generar los valores de  $\sigma$  de la tabla de mínimos cuadrados (ver tabla 3.6), en donde después de un método de iteración se consiguen las variables que conforman estas ecuaciones, generando el perfil que mejor se ajusta al comportamiento del material. Las ecuaciones obtenidas cuando se trabaja con aceite de almendras,  $V=2$  mm/min y  $L/D=0.8$  son las siguientes:

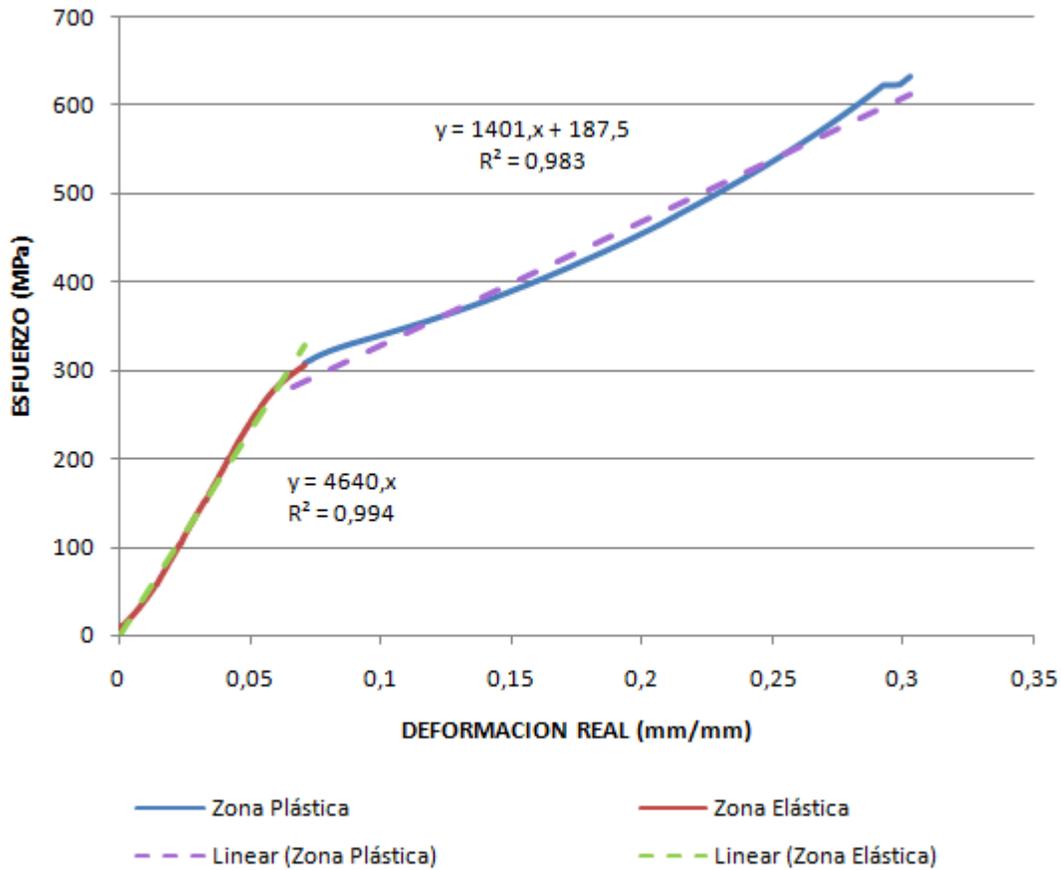
Desde esfuerzo 0 hasta 306.38

$$\sigma = 4640.4\bar{\epsilon} \quad (4.1)$$

A partir de 306.38

$$\sigma = 187.58 + 1401.6\bar{\epsilon} \quad (4.2)$$

En la figura 4.33 se observa la curva generada a partir de las ecuaciones anteriores, en donde se aprecia cómo las mismas se ajustan al comportamiento real del metal bajo esfuerzos compresivos cuando se trabaja con las condiciones ya mencionadas, observándose poca variación entre los valores teóricos y experimentales, caso que se valida con el valor del coeficiente de correlación obtenido, el cual es cercano a la unidad.



**Figura 4.33.** Parametrización de las curvas esfuerzo vs deformación real.

El procedimiento descrito anteriormente se realizó para cada una de las condiciones estudiadas, de tal manera de generar un promedio de los parámetros obtenidos en las ecuaciones teóricas, y así poder generar ecuaciones únicas para cada relación de esbeltez, ya que para distintas velocidades y distinta lubricación, no se ven afectadas las curvas esfuerzo-deformación, sino que la variación se presenta al estudiar las distintas relaciones de L/D. A continuación se presenta las tablas en donde se reflejan los parámetros de las ecuaciones de cada una de las condiciones estudiadas, así como su desviación en cuanto al valor promedio y el error asociado.

**Tabla 4.6.** Parámetros obtenidos para una relación de esbeltez de 0.8.

L/D=0.8						
Lubricante	V	$\sigma$	K	E	R <sup>2</sup> ( Zona Elástica)	R <sup>2</sup> ( Zona Plástica)
A. Almendras	2	187.58	1401.6	4640.4	0.9944	0.9833
A. Almendras	6	196.59	1381.3	4650.2	0.9737	0.9788
A. Almendras	10	175.9	1427.2	3928.4	0.9706	0.9741
B. de Molibdeno	2	197.63	1320.2	5360.7	0.9641	0.9712
B. de Molibdeno	6	208.96	1310.7	5560.4	0.9681	0.9733
B. de Molibdeno	10	188.49	1365.3	4275.8	0.9873	0.9767
A. Castor	2	182.42	1332.5	4329.5	0.9854	0.9808
A. Castor	6	205.23	1320.8	5468.4	0.9697	0.9752
A. Castor	10	217.5	1266.8	5809	0.9724	0.9776
	Prom	195.58	1347.37	4891.42	0.9761	0.9767
	Dev	13.38	50.35	669.51	0.0102	0.0038
	Error %	6.84	3.73	13.68		

De la tabla anterior se aprecia a través del error que existe poca dispersión en cuanto al valor promedio de los valores de  $\sigma$  y K, sin embargo si se observa que existe mayor dispersión con los valores de E con un error de 13.68%.

**Tabla 4.7.** Parámetros obtenidos para una relación de esbeltez de 2.

L/D=2						
Lubricante	V	$\sigma$	K	E	R <sup>2</sup> ( Zona Elástica)	R <sup>2</sup> ( Zona Plástica)
A. Almendras	2	243.8	994.29	14196	0.9668	0.9733
A. Almendras	6	229.69	1270.9	14762	0.9741	0.9767
A. Almendras	10	221.58	1367.3	12097	0.976	0.9684
B. de Molibdeno	2	249.35	983.36	10138	0.9776	0.9919
B. de Molibdeno	6	253.43	951.83	11573	0.9686	0.9916
B. de Molibdeno	10	239.01	1164.7	10254	0.98	0.9767
A. Castor	2	246.68	1013.8	10733	0.9851	0.9855
A. Castor	6	255.17	960.19	11342	0.9898	0.9926
A. Castor	10	265.98	937.1	12433	0.983	0.9773
	Prom	244.96	1071.49	11947.56	0.9778	0.9815
	Dev	13.49	157.23	1633.98	0.0075	0.0090
	Error %	5.50	14.67	13.67		

**Tabla 4.8.** Parámetros obtenidos para una relación de esbeltez de 3.

L/D=3						
Lubricante	V	$\sigma$	K	E	R <sup>2</sup> ( Zona Elástica)	R <sup>2</sup> ( Zona Plástica)
A. Almendras	2	259.3	864.3	17163	0.95	0.977
A. Almendras	6	254.9	884.2	16144	0.97	0.976
A. Almendras	10	252.1	887.3	18371	0.971	0.979
B. de Molibdeno	2	269.5	648.9	17677	0.938	0.986
B. de Molibdeno	6	268.8	687.7	15768	0.949	0.988
B. de Molibdeno	10	271.7	732	16684	0.934	0.988
A. Castor	2	269.2	653.7	13112	0.928	0.982
A. Castor	6	267.4	693.6	15876	0.965	0.982
A. Castor	10	266.7	721.7	15164	0.969	0.985
	Prom	264.4	752.6	16217.67	0.952	0.982
	Dev	7.10	98.45	1539.37	0.016	0.00453
	Error %	2.68	13.08	9.49		

En la tabla 4.7 se aprecia a través del error que existe poca dispersión en cuanto al valor promedio de los valores de  $\sigma$ , sin embargo si se observa que existe mayor dispersión con los valores de K y E con errores de 14.67 y 13.67%.

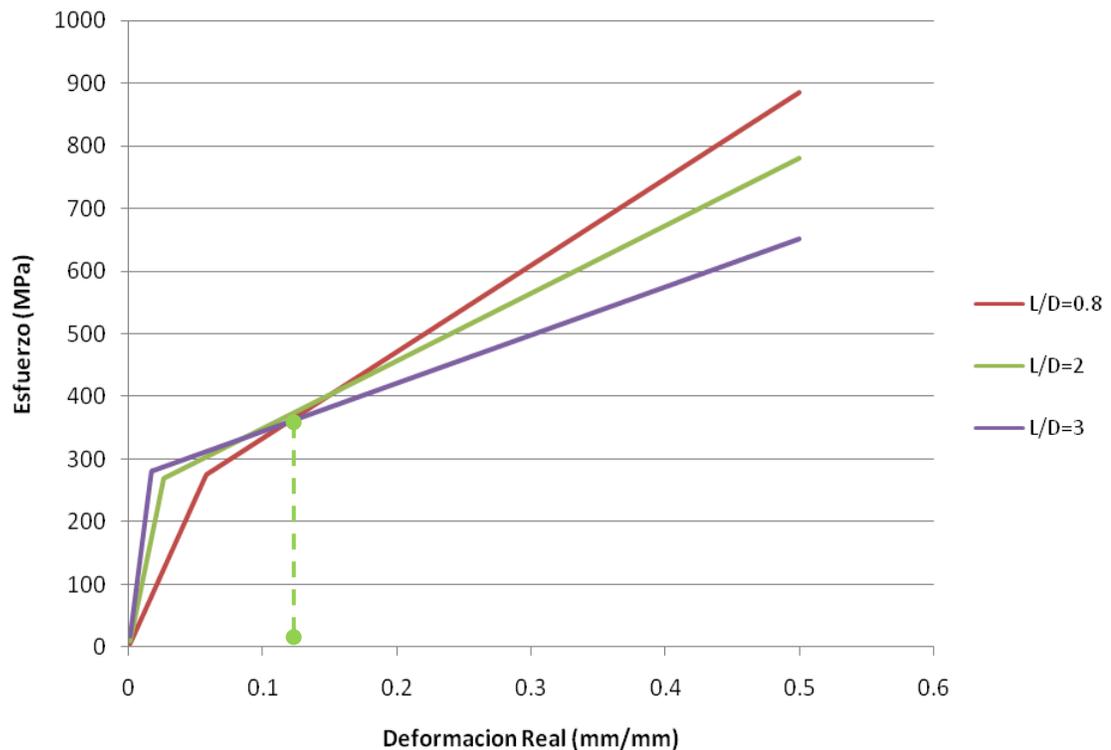
De la tabla 4.8 se aprecia a través del error que existe poca dispersión en cuanto al valor promedio de los valores de  $\sigma$  y E, sin embargo si se observa que existe mayor dispersión con los valores de K con un error de 13.08%.

En la tabla 4.9 donde se presentan las ecuaciones generalizadas para cada relación de esbeltez se aprecia que a medida que la relación de esbeltez aumenta, lo hacen también los valores de E y  $\sigma$ , a diferencia del valor de K que disminuye, lo cual concuerda con las tendencias de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para cada relación de esbeltez.

**Tabla 4.9.** Ecuaciones para cada relación L/D.

L/D	Ecuaciones	Región	R <sup>2</sup> Prom.
0.8	$4891.42x \bar{\varepsilon}$	Zona Elástica	0.9761
	$195.59 + 1347.38x \bar{\varepsilon}$	Zona Plástica	0.9767
2	$11947.56x \bar{\varepsilon}$	Zona Elástica	0.9778
	$244.97 + 1071.49x \bar{\varepsilon}$	Zona Plástica	0.9815
3	$16217.67x \bar{\varepsilon}$	Zona Elástica	0.9526
	$264.4 + 752.6x \bar{\varepsilon}$	Zona Plástica	0.9825

A partir de las ecuaciones presentadas en la tabla anterior se obtuvieron las curvas generalizadas de esfuerzo-deformación para cada relación L/D. (Ver figura 4.34)

**Figura 4.34.** Curvas generalizadas para cada relación L/D.

Aquí se aprecia como los esfuerzos en la zona plástica para  $\bar{\varepsilon} > 0.1$  son mayores para relaciones de esbeltez menores, es decir, para  $L/D=0.8$  se tiene mayores esfuerzos que para  $L/D=2$  y este a su vez presenta mayores esfuerzos que  $L/D=3$ . Por otro lado se observa como la curva con  $L/D=2$  muestra un comportamiento similar al de la curva general.

# CAPÍTULO 5

## *Análisis de resultados*

---

---

En el capítulo anterior se muestran los resultados donde se especifican los efectos que tienen los parámetros de estudio, como son la fricción, relación de esbeltez y velocidad de deformación sobre el comportamiento de un metal sometido a compresión.

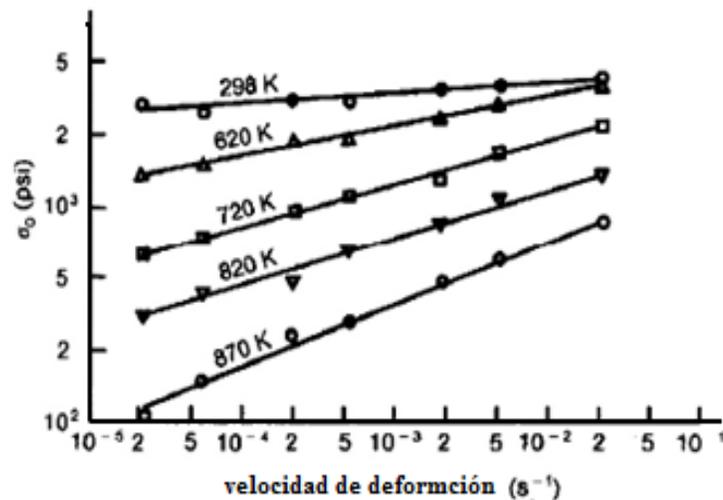
En lo referente al efecto de la fricción, se estudio la influencia de los lubricantes: aceite de almendras, aceite de castor y bisulfuro de molibdeno. Debido a sus distintas propiedades, el efecto que inducen en el proceso se refleja en el roce existente entre los platos de las mordazas y la probeta en estudio; aunque con ellos se busca disminuir al máximo la fricción en el proceso, esto no se logra ya que por más lubricante que se aplique en el proceso de compresión, siempre existe contacto metal-metal ya que la máquina por aplicar la carga en el eje longitudinal de la probeta, provoca que el lubricante fluya de la zona de contacto en dirección radial, afectando el comportamiento real del metal. Estos efectos ocasionados por el roce no se visualizan de forma tan evidente en las curvas esfuerzo-deformación efectiva. Observando los coeficientes de fricción determinados para los distintos lubricantes, se aprecia que sus valores se encuentran muy cercanos entre si, tal como se muestra en la tabla 4.1, generando prácticamente las mismas condiciones de fricción entre la probeta y los platos de la máquina. Sin

embargo, observando más detalladamente las curvas se aprecia cómo para menores valores de fricción las deformaciones soportadas por el material son mayores. Esto se debe en parte, a que debido a la formación de abarrilamiento en las probetas por efecto de una mayor fricción en sus caras, fue necesario detener el ensayo prematuramente para evitar la influencia de esfuerzos triaxiales en el comportamiento real del cobre.

Por otro lado, al observar las curvas sin corregir y corregidas por fricción se evidencia como el roce generado entre la película de lubricante y las superficies en contacto, no afectan significativamente el comportamiento real del cobre, observándose poca variación entre las curvas antes y después de la corrección; sin embargo, se nota un leve incremento en los esfuerzos en las curvas sin corregir. Esto se debe principalmente a que los coeficientes de fricción tienen magnitudes en el orden de centésimas, por lo que al introducirlos en la ecuación para corregir el efecto de fricción, la disminución de los esfuerzos resultante no es significativa.

En el estudio de la influencia de la velocidad se evaluó el comportamiento mecánico del material sometido a esfuerzos compresivos, con el propósito de observar en qué medida los cambios en la tasa de deformación afectan al mismo. El cambio de la velocidad durante la realización de los ensayos, no representa variaciones importantes en el comportamiento real del material en el intervalo de tasas de deformación estudiadas, tal como se aprecian los resultados en las figuras 4.12 a la 4.20. Al trabajar con lubricantes de almendra, castor y bisulfuro de molibdeno en combinación con relaciones de esbeltez de 0.8, 2 y 3, se observó que para velocidades de 2, 6 y 10 mm/min, el comportamiento tanto en la zona elástica como en la zona plástica mantienen una misma tendencia. Sin embargo, se aprecia un ligero cambio en las curvas, en donde a mayor velocidad se generan mayores esfuerzos, siendo más evidente para  $\epsilon > 0.2$ . Esto es debido a que con una mayor tasa de deformación la probeta absorbe más energía, ya

que a medida que se aplica la carga el material se endurece por deformación, lo que provoca que sea necesario aplicar un mayor esfuerzo para poder deformarlo. *Richeton et al* (2005), consideran que esto se debe a procesos moleculares secundarios, en donde un incremento en la tasa de deformación incrementa la movilidad molecular de las cadenas del material haciéndolas más rígidas y provocando un efecto de endurecimiento.



**Figura 5.1.** Influencia del cambio de velocidad en los esfuerzos. *Vedia et al* (2002)

El intervalo de velocidad utilizado para este estudio, no tiene influencia en el comportamiento del material, y esto se observa por la similitud que presentan las curvas, lo cual se atribuye a que se consideró un solo orden magnitud para las velocidades, basando las mismas en lo que establecen las normas ASTM E-9 y por limitaciones impuestas por la máquina de ensayo. Sin embargo, según *Vedia y Svoboda* (2002), la velocidad afecta la curva esfuerzo-deformación verdadera no sólo según el orden magnitud utilizado, sino bajo las condiciones de temperatura en las que se trabaje, tal y como se muestra en la figura 5.1, en donde se aprecia que para una temperatura de 298 K la variación del esfuerzo es muy pequeña. Por ello, es posible afirmar que una de las variables que también influyó en que no existieran grandes

variaciones en el proceso, es la temperatura de trabajo, la cual corresponde a 298,15 K (25°C), aproximadamente.

En función a los resultados obtenidos, el comportamiento del material describe una tendencia lineal, tanto en la zona elástica como en la zona plástica. Lo anterior concuerda con la teoría como un material linealmente elástico con endurecimiento lineal en la zona plástica, existiendo proporcionalidad entre los valores de deformación y esfuerzo. Los valores obtenidos que describe la ecuación característica del material para cada relación de esbeltez, presentan un grado de correlación que permite asegurar que la tendencia asumida es la correcta ya que son cercanos a la unidad. Por medio del error se comprobó que la variación que existe entre los valores experimentales son aceptables a nivel estadístico, ya que los mismos presentan un valor por debajo del 15% del promedio, comprobándose que la caracterización obtenida para cada condición, representa el comportamiento real del material cuando está sometido a cargas compresivas. Este criterio es respaldado por García (2009), donde establece que una variabilidad de los valores entre 10% y 33% es aceptable, basando sus estudios en estadística descriptiva.

El efecto de la relación de esbeltez es notable, ya que se aprecia cómo a medida que aumenta esta relación para una misma velocidad, los esfuerzos que se generan en la zona elástica son mayores a medida que avanza la deformación, y esto puede atribuirse a que las probetas con una mayor longitud pueden acumular más energía, por poseer una mayor concentración de moléculas y partículas internas, en el cual al aplicarle la carga, conlleva a que por efecto de endurecimiento por deformación, sea necesario aplicar mayores esfuerzos, y es por ello que en la zona elástica con relaciones de esbeltez altas, se observa una mayor pendiente que con una relación baja. En la zona plástica el material a distintas relaciones de esbeltez presenta una misma tendencia, pero se aprecia que a medida que aumenta  $L/D$  el intervalo

de deformación que se obtiene disminuye. Esto es debido a que con probetas cilíndricas, aún ligeras excentricidades en las cargas o platos de compresión que no estén completamente paralelos ocasionan esfuerzos no axiales, que deforman la probeta en otras direcciones, generando un efecto de inestabilidad mejor conocido como pandeo. Este origina un estado de esfuerzos triaxial, provocando que el ensayo fuese detenido ya que la carga aplicada sobre el material no es unidireccional.

A través de los ensayos de tracción realizados se obtuvo que el comportamiento del material bajo esfuerzos de tracción, luego de la corrección por estricción de Bridgman, presenta una tendencia lineal tanto en la zona elástica como plástica, lo cual concuerda con el comportamiento del material bajo cargas compresivas y, a su vez, con el modelo teórico de un material deformado linealmente en la zona elástica y con endurecimiento lineal en la zona plástica. El esfuerzo de fluencia obtenido a compresión, resulta mayor que el de tracción en una proporción de 1.026. Por otra parte, el criterio de Von Mises, establece que el esfuerzo de fluencia a compresión siempre será mayor que el de tracción en una relación de 1.155, sin embargo, esto resulta del análisis de una compresión plana, según reportó Ramírez (2003) en su trabajo. Para este caso como se trabajó con compresión cilíndrica, el estado de esfuerzo es el mismo que el de tracción pero en sentido contrario, lo que conlleva a que a los esfuerzos de fluencia sean iguales, sin embargo, se observa que en la relación obtenida experimentalmente existe un incremento, el cual es posible asegurar que se debe al efecto de la fricción presente en el ensayo.

En lo referente a la composición química, se realizó un análisis para la determinación de la pureza del cobre estudiado. Este arrojó un resultado de 97.29% de cobre, lo cual representa que el material tiene un bajo contenido de otros elementos foráneos, constituyendo estos un 2.71%, lo cual es bastante

aceptable para dar soporte a futuras investigaciones en donde se trabaje con cobre.

# CAPÍTULO 6

## *Conclusiones*

---

---

- Relaciones de esbeltez bajas garantizan que el estado de esfuerzo aplicado a las probetas en su eje longitudinal, sea siempre unidireccional, con lo cual se evita que cualquier tipo de excentricidad entre la probeta y la mordaza afecte el comportamiento real del metal, permitiendo obtener un intervalo de deformación amplio. Esto es de gran importancia, ya que posiciona al ensayo de compresión como una mejor alternativa sobre los ensayos de tracción, al proporcionar mayor información sobre la máxima deformación que admite un material.
- La curva característica que se obtuvo, se ajusta a los comportamientos teóricos de materiales sometidos a procesos de deformación, comportándose como un material linealmente elástico con endurecimiento lineal en la zona plástica, lo que representa que existirá proporcionalidad entre los valores de esfuerzo y deformación verdadera, en donde los resultados que se obtengan por medio de estas ecuaciones presentarán un error por debajo del 15%, el cual es aceptable para definir el comportamiento real del material.
- Es posible por medio del procedimiento de corrección de Bridgman, obtener un incremento significativo en el intervalo de deformaciones

cuando se realiza el ensayo de tracción, ya que el mismo permite corregir el efecto que ocasiona la estricción localizada durante el ensayo en muestras de sección circular, alcanzando mayores deformaciones que los ensayos de compresión.

- El intervalo de velocidad utilizado para el estudio de la misma, no influyó de forma significativa en el comportamiento real de material sometido a cargas compresivas, lo que se debe a que se trabajó en un solo orden de magnitud.
- El estudio de la fricción por medio de los lubricantes ensayados, revela que con coeficientes de fricción en el orden de las centésimas, generados entre la probeta y los platos de las mordazas, no afecta de manera significativa el comportamiento del material. De esta manera se afirma que para tales coeficientes, los datos esfuerzo-deformación no es necesario corregirlos, ya que la diferencia de su valor con respecto al real no es significativo.
- Los lubricantes evaluados permiten que la fricción generada entre la probeta y los platos de las mordazas disminuya, garantizando un mejor desempeño del ensayo. De dichos lubricantes el que mejor corrige este efecto es el aceite de almendras, por generar un coeficiente de fricción menor.
- La composición química del cobre arrojó un 97,29% de pureza, por lo que es posible afirmar que los resultados obtenidos con base en cada una de las variables estudiadas son representativos al comportamiento de un cobre, proporcionando información de gran validez a futuras investigaciones sobre el comportamiento del cobre puro sometido a esfuerzos compresivos.

- De los tres parámetros estudiados la lubricación y la relación de esbeltez son los que más afectaron al comportamiento real del cobre, es por ello que el diseño de la práctica se basa en dicho estudio, permitiendo a los estudiantes evaluar efectos que pudieran generarse durante la realización del ensayo como: la fricción, abarrilamiento, pandeo y otros, contribuyendo con esto a su formación académica.

# CAPÍTULO 7

## *Recomendaciones*

---

---

- Durante la realización de la práctica es recomendable trabajar con relaciones de esbeltez de 2 y 3, ya que las mismas aparte de ser más fáciles de mecanizar permiten observar y estudiar el efecto de abarrilamiento y pandeo que pudiera presentarse durante el ensayo.
- Las superficies tanto de los extremos de la probeta y los platos de compresión deben estar pulidas y totalmente paralelas entre sí, de manera de proveer una superficie lisa, en donde el lubricante forme una película delgada, disminuyendo la fricción y evitando inestabilidades en el proceso de compresión.
- Estudiar el uso de cavidades en los extremos de las probetas de compresión cilíndrica para la retención de lubricante, analizando en qué medida afecta el comportamiento real del material.
- Con el intervalo de velocidad estudiado no se obtuvo una variación significativa en cuanto al comportamiento del material, por lo que para futuras investigaciones en donde se estudie el efecto de dicha variable, se recomienda utilizar órdenes de magnitud mayores para poder observar con mayor amplitud la influencia de este parámetro bajo esfuerzos a compresión.

- Realizar en la práctica de tracción un ensayo con probetas cilíndricas, en donde los estudiantes puedan aplicar el método propuesto por Bridgman, para la corrección por estricción de la curva esfuerzo vs deformación.
- Diseñar un software que permita a los estudiantes manipular los datos resultantes de la máquina de una manera más sencilla, para obtener el comportamiento de un material sometido a compresión en forma directa.

# *Referencias*

---

---

- ASM International, (2000). Mechanical Testing and Evaluation. ASM Handbook, 8.
- ASTM International, (2004). Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. Book of ASTM Standards, E 8M-04.
- ASTM International, (1989). Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. Book of ASTM Standards, E 9-89a.
- Askeland, D., (1998). Ciencia e Ingeniería de los materiales. 3ra Edición. Libro. México: International Thomson Editores.
- Cabello, S., & Torres M., (2008). Ensayos de compresión y torsión: una alternativa en la obtención de curvas esfuerzo-deformación efectiva de materiales metálicos dúctiles. Congreso Iberoamericano de metalurgia. Colombia.
- Callister, W. (1995). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Libro. México: Editorial Reverte.

- Devincenzi, G., Di Rado, G., & González, L. Implementación de herramientas didácticas interactivas para la enseñanza de graduación en ingeniería. Tesis de grado no publicada. Universidad nacional del nordeste (UNNE), Argentina.
- Del Pópolo, M. (2005). Guía de Trabajos Prácticos N° 3 Ensayo de Compresión. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Argentina.
- Del Viso, J., Carmona, J., & Ruiz, G. (2008). Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. *Journal of Cement and Concrete Research*, 88(2008), 386–395.
- Dieter, G. (1988). *Mechanical Metallurgy*. Libro. Londres: McGraw-Hill.
- Diot, S., Guines, D., Gavrus, A., & Ragneau, E. (2006). Two-step procedure for identification of metal behavior from dynamic compression tests. *International Journal of Impact Engineering*, 34(7), 1163-1184.
- García, F., (2009). Estadísticas descriptivas. Hospital Sergio E. Bernales, <http://www.slideshare.net/freddygarcia/estadisticas-descriptivas-presentation>. Fecha de consulta: 12-04-2009.
- Goglio, L., Peroni, L., Peroni, M., & Rossetto, M. (2008). High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 28(2008), 329–339.
- Manisekar, K., & Narayanasamy, R. (2007). Effect of friction on barrelling in square and rectangular billets of aluminium during cold upset forging. *Journal of Materials and Design*, 28(2007), 592–598.

- Martínez & H., Cruz L., (2007). Simulación numérica del contacto deslizante para el sistema 2117-t4 / 19crni17.2 en compresión uniaxial. Dyna, Nro. 152, pp. 167-180.
- Ramírez, J., (2003). Bases teóricas para la conformación de materiales. Libro. Universidad de Carabobo.
- Richeton, J., Ahzi, S., Vecchio, K.S., Jiang, F.C., & Adharapurapu, R.R., (2006). Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield stress. International Journal of Solids and Structures 43 (2006) 2318–2335.
- Singh, A., Murty, G., & Sudhaker J. (1995). Stress-strain behaviour of nitrogen bearing austenitic stainless steels in the temperature range 298–473 K. Journal of Materials Science, 24(1995), 6316-6328.
- Torres, J., (2007). Software para la Enseñanza Didáctica de Mecánica de Materiales. Latin American and Caribbean Journal of Engineering Education, Vol. 2, No. 1, pp. 64-68.
- Williams, J.G., & Gamonpilas, C., (2008). Using the simple compression test to determine Young's modulus, Poisson's ratio and the Coulomb friction coefficient. International Journal of Solids and Structures.

# *Glosario de términos*

---

---

**Esfuerzo:** es la razón de una fuerza aplicada respecto al área sobre la que actúa.

**Deformación:** es el cambio relativo de las dimensiones o formas de un cuerpo como resultado de la aplicación de un esfuerzo.

**Elasticidad:** Un cuerpo elástico se define como aquel que puede recuperar su forma y tamaño original cuando la fuerza que lo deformó deja de actuar sobre él.

**Tensión:** grado de fuerza ejercida sobre un objeto dividida por el área transversal del mismo. El área transversal es el área de una sección transversal del objeto en un plano perpendicular a la dirección de la fuerza. La tensión generalmente es expresada en unidades de fuerza dividida por área, como  $\text{N/cm}^2$ .

**Ensayo de tracción:** consiste en someter una probeta normalizada a esfuerzos progresivos y crecientes en la dirección de su eje hasta que llegue a la deformación o la rotura correspondiente.

Ensayo de compresión: es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante esfuerzos de compresión progresivos en una probeta normalizada.

Zona elástica: es el área comprendida en un diagrama esfuerzo-deformación unitaria, por el trazo de la curva desde cero hasta el límite de elasticidad y por el valor de la abscisa, o sea la deformación correspondiente al límite elástico.

Zona plástica: es el área comprendida en un diagrama esfuerzo- deformación unitaria, por el trazo de la curva desde el límite elástico hasta el punto de ruptura y por el tramo de la abscisa comprendida desde el valor del límite elástico y el valor correspondiente al punto de ruptura.

Módulo de Young: es la constante de proporcionalidad entre la deformación elástica y el esfuerzo uniaxial, y representa la pendiente de la parte recta de la gráfica esfuerzo- Deformación unitaria.

Resistencia a la tensión: es el esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada.

Ductilidad: es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura.

Fricción: es la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática).

Esbeltez: relaciona la rigidez de la sección transversal de una pieza prismática con su longitud total. Se caracteriza por un parámetro adimensional que interviene en el cálculo de las tensiones y predice las inestabilidades elásticas de las barras.

Esfuerzo de cedencia: esfuerzo al cual el material comienza a deformarse plásticamente.

Lubricación: un lubricante es una sustancia que, colocada entre dos piezas móviles, no se degrada, y forma así mismo una película que impide su contacto, permitiendo su movimiento incluso a elevadas temperaturas y presiones.

La composición química: se refiere a qué sustancias están presentes en una determinada muestra y en qué cantidades.

El pandeo: es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal de compresión.

Absorbancia: es la cantidad de luz que es retenida por una muestra cuando es atravesada por un haz luminoso.

# *Apéndice*

---

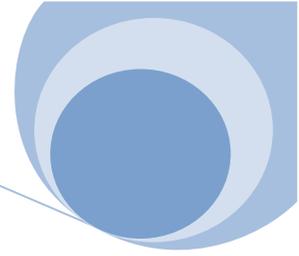
# ENSAYO DE COMPRESION CILINDRICA



Elaborado por:

Jesús Vecchione y Josué García

Emisión: 2009



# Ensayo de Compresión Cilíndrica

## **1. Objetivo General**

Estudiar el comportamiento mecánico de un material sometido a cargas compresivas bajo distintas relaciones de esbeltez y condiciones de lubricación.

## **2. Bases teóricas**

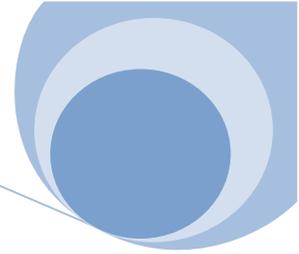
### **2.1 Introducción**

El exitoso empleo de metales en aplicaciones de ingeniería, se basa en la capacidad que posee el metal para cumplir con el diseño y con los requerimientos de servicio y para ser fabricado con las dimensiones adecuadas. La capacidad de un metal para satisfacer esas necesidades es determinada por las propiedades mecánicas y físicas del mismo.

Las cargas compresivas ocurren en una amplia variedad en las aplicaciones de los materiales, tales como construcciones de estructuras de acero y en soportes de concreto para puentes, al igual que en los procesos de fabricación de materiales, tales como durante el forjado y la laminación de una pieza. Caracterizar la respuesta del material a estas cargas requiere de ensayos que midan su comportamiento compresivo.

Bajo ciertas circunstancias, el ensayo de compresión pudiera tener ventajas sobre los otros ensayos. El ensayo de tracción es el más desarrollado y es ampliamente uno de los más utilizados para ensayar el comportamiento de un material, y puede ser utilizado para determinar todos los aspectos del comportamiento mecánico de un material bajo esfuerzos de tracción, incluyendo su deformación elástica, plástica, límite de fluencia, y sus propiedades a la ruptura. Sin embargo, la extensión de su deformación está limitada por la aparición de cuello de estrangulación.

Para determinar el comportamiento de los materiales bajo grandes esfuerzos en la zona plástica, las mediciones se deben realizar más allá del límite de estrangulación. Es por ello que los ensayos de compresión y torsión se presentan como una alternativa para superar esta limitación.



## 2.2 Modos de deformación en los ensayos de compresión

En la figura 1 se ilustra los modos de deformación que pueden ocurrir en los ensayos de compresión. El pandeo mostrado en la figura 1 ocurre cuando la relación de esbeltez (Longitud/Diámetro.  $L/D$ ) de la probeta es muy grande, y puede ser tratada por un análisis clásico de pandeo plástico y elástico. Estos análisis predicen que las probetas cilíndricas que tienen una relación de esbeltez,  $L/D$ , menor a 5 están exentas del pandeo y pueden ser utilizadas para ensayar tanto materiales dúctiles como frágiles.

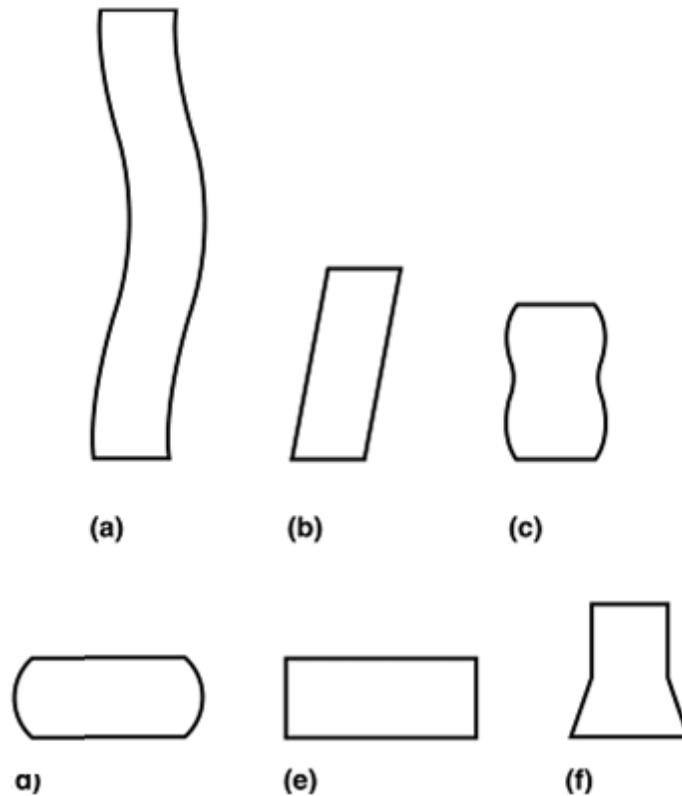
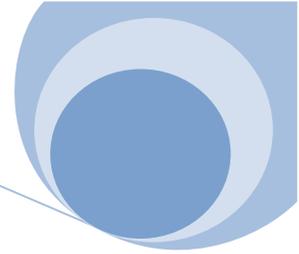
Experiencias prácticas con materiales dúctiles, por otro lado, demuestran que relaciones  $L/D$  tan pequeñas como 2.5 conllevan a repuestas a la deformación insatisfactorias. Para probetas cilíndricas, aun ligeras excentricidades en las cargas o platos de compresión que no estén completamente paralelos ocasionan esfuerzos que deforman a la probeta, tal como se muestra en la figura 1. Es por esto, que relaciones  $L/D$  menores son las que normalmente se utilizan para evitar el pandeo y así poder obtener mediciones certeras sobre el comportamiento de la deformación plástica del material bajo cargas compresivas.

La fricción es otra de las fuentes de deformaciones irregulares en los ensayos de deformación de materiales dúctiles. La fricción presente entre los extremos de la probeta y los platos de compresión impide el flujo lateral entre las superficies de contacto, lo cual origina el abarrilamiento de la superficie cilíndrica.

Bajo estas circunstancias, para relaciones  $L/D$  igual a 2, ocurre un doble abarrilamiento, tal como se muestra en la figura 1, relaciones más pequeñas conllevan a un abarrilamiento simple, como se muestra en la figura 1. Este abarrilamiento indica que la deformación no es uniforme (el esfuerzo y deformación varía a lo largo de toda la probeta), y tales ensayos no son válidos para la determinación de la mayoría de las propiedades plásticas y elásticas de un material.

Si los ensayos de compresión pueden ser llevados a cabo sin la presencia de fricción entre la probeta y los platos de compresión, el abarrilamiento no se produce, como se muestra en la figura 1, y la deformación que se produce es uniforme. Por lo cual para medir la mayoría de las propiedades de un material sometido a compresión, esta es la configuración que se debe adoptar.

Una forma final de deformación irregular en la compresión uniaxial es una inestabilidad que es lo opuesto a la estricción que ocurre en el ensayo de tracción. En este caso, la inestabilidad ocurre debido a procesos de ablandamiento del material y forma una rápida y localizada expansión, como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Modos de deformación bajo compresión. (a) Pandeo, cuando  $L/D > 5$ . (b) Distorsión, cuando  $L/D > 2.5$ . (c) Doble abarrilamiento, cuando  $L/D > 2.0$  y existe fricción entre las superficies de contacto. (d) Abarrilamiento, cuando  $L/D < 2.0$  y existe fricción entre las superficies de contacto. (e) Compresión homogénea, cuando  $L/D < 2.0$  y no existe fricción entre las superficies de contacto. (f) Compresión inestable, debido procesos de ablandamiento del material. (ASM Internacional, 2000)

### 2.3 Determinación del factor de fricción

Primeramente se determina la altura instantánea por medio de la siguiente ecuación.

$$h = h_0 - d \tag{Ec. 1}$$

Donde:

$h$ : Altura instantánea

$h_0$ : Altura inicial

d: desplazamiento de la máquina.

Luego se determina el área instantánea de la sección transversal de la probeta.

$$A_i = \frac{A_0 \cdot h_0}{h_i} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

Ai: Área de contacto

Ao: Área inicial de la muestra

ho: Altura inicial de la muestra

hi: Altura instantánea de la muestra

Por medio de esta altura es posible determinar la deformación nominal o de ingeniería que sufre el material por medio de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{h}{h_0} - 1 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

e: Deformación nominal

h: Altura instantánea

h<sub>0</sub>: Altura inicial

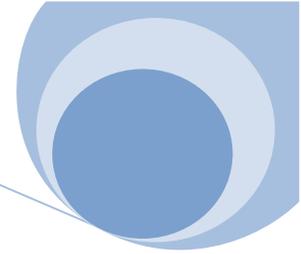
$$\bar{P} = \frac{F_i}{A_i} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

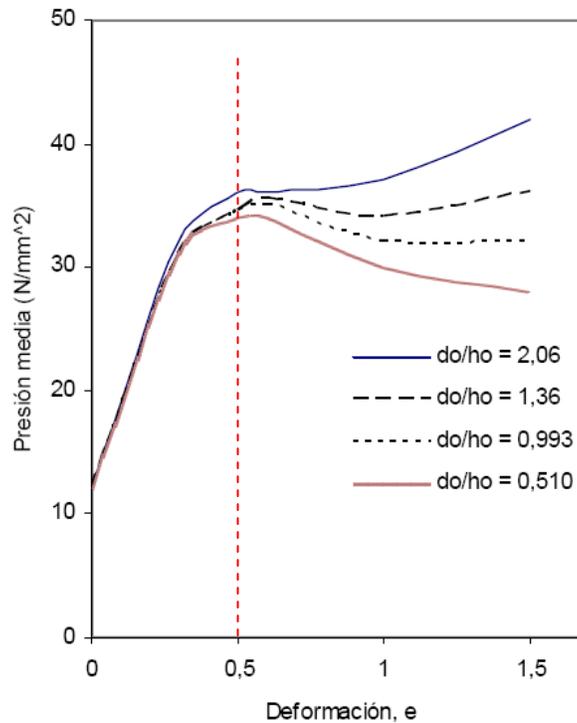
$\bar{P}$ : Esfuerzo verdadero

Fi: Fuerza de deformación

Ai: Área de contacto



Una vez obtenidos los valores de  $\bar{P}$  y  $e$  se grafican los mismos para distintas relaciones de esbeltez (L/D), y se interceptan bajo una deformación constante. Tal como se muestra en la figura 2.

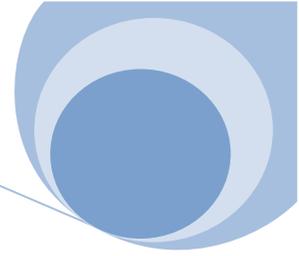


**Figura 2.** Curva presión media vs inverso de L/D. (Cabello y Torres, 2008)

De esta intercepción resultan una serie de puntos de  $\bar{P}$  experimentales que al graficarlos junto con su valor correspondiente del inverso de la relación de esbeltez (D/L) generan una curva con tendencia rectilínea, de donde se obtienen los valores del punto de corte con el eje de  $\bar{P}$  representado por  $\sigma$  y el valor de la pendiente  $m$ , correspondiente a la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \sigma + \frac{\mu \cdot \sigma}{3} \left[ \frac{1}{1+e} \right]^{3/2} \cdot \frac{d_0}{h_0} \quad (\text{Ec. 5})$$

A partir de la ecuación 6, sustituyendo los valores de  $m$  y  $\sigma$ , se despeja el coeficiente de fricción  $\mu$  para cada lubricante, tal como se muestra a continuación:



$$\mu = \frac{m \cdot 3}{\sigma \cdot \left[ \frac{1}{1+e} \right]^{3/2}} \quad (\text{Ec. 6})$$

## 2.4 Obtención de la curva esfuerzo-deformación efectiva de compresión

Del ensayo de compresión cilíndrica se obtienen valores de fuerza y desplazamiento, los cuales deben ser procesados considerando el efecto que ocasiona dicha compresión sobre el material, con la intención de determinar el comportamiento mecánico del mismo, el cual se rige por la curva esfuerzo deformación efectiva. Para la determinación de esta curva es necesario lo siguiente:

Primeramente se determina la altura instantánea por medio de la siguiente ecuación.

$$h = h_0 - d \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

h: Altura instantánea

$h_0$ : Altura inicial

d: desplazamiento de la máquina

Por medio de esta altura es posible determinar la deformación nominal o de ingeniería que sufre el material por medio de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{h}{h_0} - 1 \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

e: Deformación nominal

h: Altura instantánea

$h_0$ : Altura inicial

Una vez que se obtiene la deformación nominal entonces es posible determinar la deformación real.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (\text{Ec. 9})$$

Luego se determina el esfuerzo nominal, por medio de la fuerza y el área instantánea.

$$S = \frac{F_i}{A_i} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

S: Esfuerzo nominal

Fi: Fuerza de deformación

Ai: Área de contacto

Ahora es necesario determinar el esfuerzo verdadero que viene expresado en términos de la presión media la cual se riges con la siguiente ecuación.

$$\bar{P} = S \cdot (1 + e) \quad (\text{Ec. 11})$$

Al haberse determinado la presión media es posible obtener el esfuerzo verdadero tomando en consideración el efecto de la fricción por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{\bar{P}}{\left(1 + \frac{\mu d_0}{3 h_0} \cdot \left[\frac{1}{1+e}\right]^{\frac{3}{2}}\right)} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

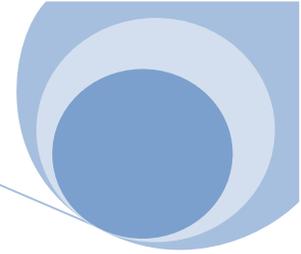
$\bar{P}$  : Presión media

e: Deformación nominal

$h_0$  : Altura inicial

$d_0$  : Diámetro inicial

$\mu$ : coeficiente de fricción



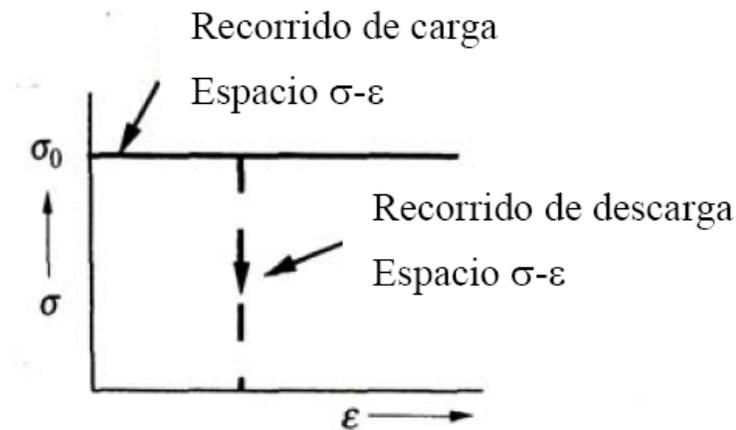
## 2.5 Formas típicas de las curvas esfuerzo-deformación efectiva

Las curvas esfuerzo-deformación idealizadas para una tasa de deformación constante y sus ecuaciones, las cuales son comúnmente utilizadas en plasticidad, se citan a continuación:

- Material rígido y perfectamente plástico, se muestra en la figura 4 y el comportamiento es descrito por:

$$\sigma = \sigma_0 \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde  $\sigma_0$  es el esfuerzo de fluencia

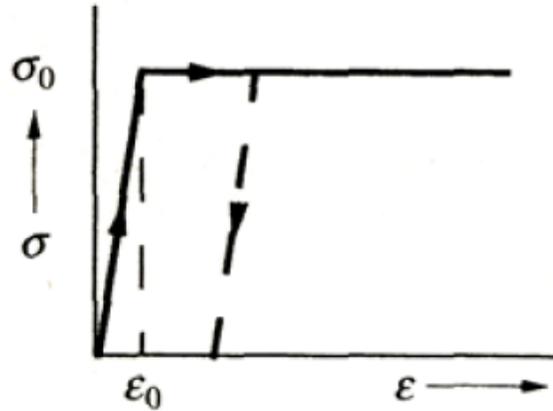
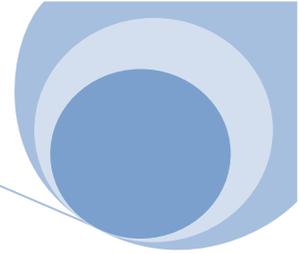


**Figura 3.** Material rígido y perfectamente plástico.

- Material linealmente elástico y perfectamente plástico, como el mostrado en la figura 5 y cuyo comportamiento es descrito por:

$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon && \text{Desde esfuerzo 0 hasta } \sigma_0 \\ \sigma &= \sigma_0 && \text{A partir de } \sigma_0 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 14})$$

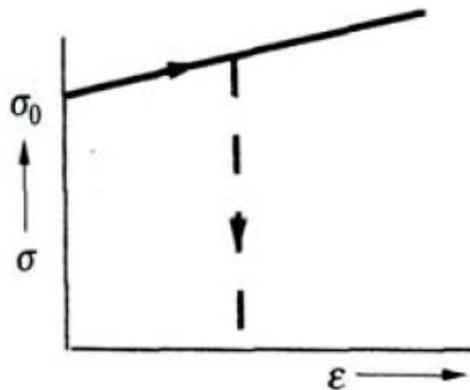
Donde E es el módulo de elasticidad.



**Figura 4.** Material linealmente elástico y perfectamente plástico.

- Material rígido con endurecimiento lineal en zona plástica, como se muestra en la figura 6, descrito por:

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon \quad (\text{Ec. 15})$$

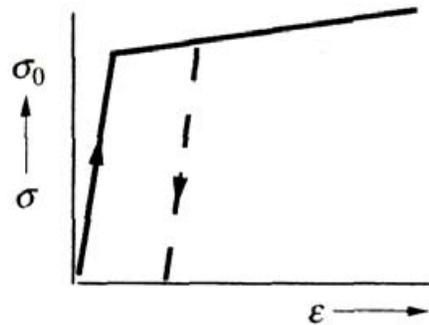
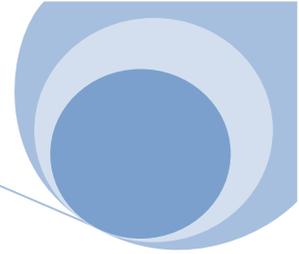


**Figura 5.** Material rígido con endurecimiento lineal en la zona plástica.

- Material linealmente elástico y con endurecimiento lineal en zona plástica, como se observa en la figura 7, descrito por:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Desde esfuerzo 0 hasta } \sigma_0$$

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon \quad \text{A partir de } \sigma_0 \quad (\text{Ec. 16})$$



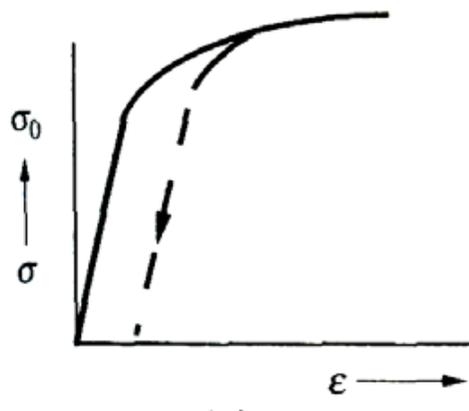
**Figura 6.** Material rígido con endurecimiento lineal en la zona plástica.

- Material elástico lineal con endurecimiento plástico no lineal (elasto-plástico), como se muestra en la figura 8 y descrito como:

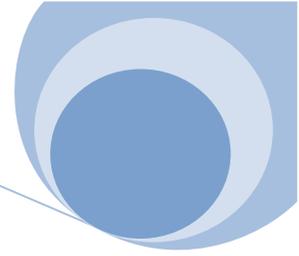
$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Desde esfuerzo 0 hasta } \sigma_0$$

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad \text{a partir de } \sigma_0 \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde  $0 < n < 1$



**Figura 7.** Material elástico lineal con endurecimiento plástico no lineal.



### **3. Objetivos**

- Definir y establecer el ensayo mecánico como metodología para la obtención del comportamiento mecánico de un material.
- Determinar los coeficientes de fricción para cada lubricante.
- Determinar las curvas  $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$  por el ensayo de compresión.
- Corregir las curvas  $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$  por efecto de fricción.
- Comparar las curvas antes y después de la corrección por fricción.
- Comparar las curvas  $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$  obtenidas a compresión, con una de un ensayo de tracción precedente, cuando se le ha aplicado la corrección de Bridgman.
- Identificar el modelo teórico que mejor se ajusta al comportamiento del material.
- Analizar los efectos de esbeltez y lubricación en el comportamiento del material.

### **4. Actividad práctica**

#### **4.1 Materiales y equipos**

- Maquina de ensayos Galdabini (Capacidad de 20000 Ton)
- Dos (2) probetas de compresión, con una relación de esbeltez L/D de 2.
- Dos (2) probetas de compresión, con relación de esbeltez L/D de 3.
- Vernier
- Bisulfuro de molibdeno y aceite de almendras

#### **4.2 Procedimiento**

##### *4.2.1 Actividad 1. Ensayo de compresión cilíndrica*

- Medir las dimensiones iniciales de las probetas.

- Realizar dos ensayos de compresión cilíndrica con relaciones de esbeltez de 2 y 3, aplicando bisulfuro de molibdeno en los extremos de las probetas y en las caras de las mordazas de la máquina. Utilizando una velocidad de 6 mm/min.
- Realizar dos ensayos de compresión cilíndrica con relaciones de esbeltez de 2 y 3, aplicando aceite de almendras en los extremos de las probetas y en las caras de las mordazas de la máquina. Utilizando una velocidad de 6 mm/min.
- Registre los datos del ensayo y tome nota de las observaciones del mismo.
- Analice la influencia de la relación de esbeltez y el lubricante utilizado sobre el comportamiento del material.

#### 4.2.2 Actividad 2. *Determinación del coeficiente de fricción (ensayo de compresión)*

- Para este caso es necesario seguir los pasos que están descritos en la sección 2.3, en donde se especifica la manera correcta de obtener el mismo.
- Deben utilizarse los datos resultantes del ensayo de compresión para cada lubricante.
- Analizar los coeficientes de fricción obtenidos.

#### 4.2.3 Actividad 3. *Obtención de la curva esfuerzo-deformación efectiva (ensayo de compresión)*

- Seguir el procedimiento descrito en la sección 2.4, tabular los resultados obtenidos.
- Graficar la curva esfuerzo-deformación efectiva sin corregir el efecto de la fricción, tomando como parámetros los calculado por medio de la ecuaciones Ec. 9 y Ec. 11.
- Graficar la curva esfuerzo-deformación efectiva corregida, tomando como parámetros los calculado por medio de la ecuaciones Ec. 9 y Ec. 12.
- Comparar ambas curvas analizando el efecto de la fricción.
- Determinar el modelo teórico que mejor se ajusta al comportamiento del material, indicando las ecuaciones características correspondientes. Analizar.
- Comparar las curvas  $\bar{\sigma}$  vs  $\bar{\epsilon}$  corregidas por fricción, con una de un ensayo de tracción precedente, cuando se le ha aplicado la corrección de Bridgman.