

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO DE
COMPRESIÓN PLANA ACOPLADO A UNA MÁQUINA
DE TRACCIÓN**

PRESENTADO POR:

EVER ESAÚ MARTÍNEZ SÁNCHEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO DE
COMPRESIÓN PLANA ACOPLADO A UNA MÁQUINA
DE TRACCIÓN**

Presentado por :

EVER ESAÚ MARTÍNEZ SÁNCHEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, noviembre de 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO DE COMPRESIÓN PLANA ACOPLADO A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN

Alumno: Ever Esaú Martínez Sánchez¹

Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan A. Berríos Ortiz²

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador. Tel. (503) 22-35-4235.

E-mail: 1 ever_z4@hotmail.com

2 jaberriosortiz@gmail.com

RESUMEN

Se ha realizado un diseño y construcción de un dispositivo de compresión plana para ser acoplado a una máquina de ensayos de tracción, para lo cual se recopiló información bibliográfica relacionada con los ensayos de tracción y compresión axial y teoría de compresión plana que incluye el estado de esfuerzo y deformaciones en compresión plana. También, se describieron los procesos de conformado de metales, con énfasis en la relación que existe entre la compresión plana y el proceso de laminación, y se describieron brevemente los efectos de incremento de la temperatura y fricción sobre ellos. El diseño y dimensionamiento de los elementos del dispositivo de compresión plana se realizó en base a los requerimientos de carga, garantizando la rigidez del dispositivo y la alineación correcta entre sus elementos. Se diseñó una guía de laboratorio para ensayos de compresión plana que incluye la ejecución de los ensayos y la elaboración de las curvas esfuerzo - deformación con el fin de consolidar los conocimientos del estudiante en este tema.

DEDICATORIA

A:

Mi padre: Manuel Martínez

Mi madre: Ada Sánchez

Abuelos: Concepción Martínez
y
Hortensia Arabia

Ever Esaú Martínez Sánchez

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por todos los esfuerzos, sacrificios y todo el apoyo que me brindaron hasta el día de hoy.

A mis abuelos, porque siempre estuvieron a mi lado y por entregarme todo su cariño.

A todo los docentes que han contribuido en mi formación académica.

A mi asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por ayuda y muy satisfactoria asesoría durante la elaboración de mi Trabajo de Graduación.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido a mi desarrollo como estudiante y a los que han contribuido a culminar este Trabajo de Graduación.

Ever Esaú Martínez Sánchez

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1. Deformación elástica y plástica.....	3
1.2. Esfuerzo y deformación nominales.....	4
1.3. Ensayo de tracción y diagrama esfuerzo - deformación nominal	6
1.3.1. Propiedades obtenidas del ensayo de tracción.....	8
1.3.2. Esfuerzo real y deformación real	12
1.4. Ensayos de compresión	14
1.4.1. Ensayo de compresión axial.....	15
1.4.2. Ensayo de compresión plana	16
1.5. Criterios de cedencia y estado de esfuerzo en compresión plana	18
1.5.1. Criterio de cedencia de Tresca	19
1.5.2. Criterio de cedencia de von Mises	20
1.5.3. Estado de esfuerzos en compresión plana	22
1.6. Conformado de metales	24
1.6.1. Procesos de deformación volumétrica.....	26
1.6.2. Trabajo de láminas metálicas.....	27
1.6.3. Temperatura en el conformado de metales	29
1.6.3. Fricción en el conformado de metales	32
1.7. Endurecimiento por deformación	34
2. DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE COMPRESIÓN PLANA	37
2.1. Diseño del espécimen para compresión plana.....	37
2.2. Diseño de los elementos del dispositivo de compresión plana.....	41
2.2.1. Dimensionamiento	44
2.2.2. Materiales y costos de fabricación	56
2.3. Construcción	59

2.3.1. Barra deslizante.....	59
2.3.2. Placa superior.....	60
2.3.3. Placa inferior.....	61
3.3.4. Indentor.....	62
2.3.5. Cilindro deslizante.....	63
2.3.6. Base del espécimen de compresión.....	64
2.3.7. Soporte lateral del espécimen de compresión.....	65
3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANA.....	66
3.1. Determinación de la deformación máxima.....	66
3.2. Curvas de esfuerzo - deformación.....	68
4. MANUALES DE USO Y MANTENIMIENTO.....	76
4.1 Manual de uso.....	76
4.2. Mantenimiento.....	81
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	85
REFERENCIAS.....	86
ANEXOS.....	87
Anexo A: Planos de construcción del dispositivo de compresión plana.....	87
Anexo B: Laboratorio de ensayos de compresión plana en cobre electrolítico.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Criterios de cedencia de Tresca y von Mises para diferentes sistemas de esfuerzos.	22
Tabla 1.2. Valores típicos de temperatura y coeficiente de fricción en trabajo en frío, en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización [6].	33
Tabla 1.3. Valores característicos del coeficiente de resistencia K y del exponente de endurecimiento por deformación, n, para metales seleccionados.....	36
Tabla 2.1. Materiales en bruto para la fabricación de los elementos del dispositivo de compresión plana	58
Tabla 3.1. Resultados de la primera serie de ensayos para obtener la deformación máxima.	68
Tabla 3.2. Segundo grupo de especímenes, primer ensayo.	69
Tabla 3.3. Segundo grupo de especímenes, segundo ensayo.	70
Tabla 3.4. Segundo grupo de especímenes, tercer ensayo.....	71
Tabla 3.5. Segundo grupo de especímenes, cuarto ensayo.....	72
Tabla 3.6. Segundo grupo de especímenes, quinto ensayo.....	73
Tabla 3.7. Segundo grupo de especímenes, sexto ensayo.	74
Tabla 4.1. Programa de mantenimiento del dispositivo de compresión plana.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Alargamiento de una barra cilíndrica. a) La barra sin ninguna fuerza y b) la barra sujeta a la fuerza de tracción uniaxial F , que alarga la barra desde una longitud l_0 hasta l [1].	4
Fig. 1.2. Máquina para ensayos a tracción, con registro de fuerza y de deformación se registran en una computadora [1].	6
Fig. 1.3. Esquema del funcionamiento de una máquina de ensayos de tracción. Mediante un cabezal móvil, en la prueba de tracción se aplica una fuerza unidireccional en la probeta [2].	7
Fig. 1.4. Diagrama esfuerzo - deformación nominal correspondiente a una aleación de aluminio [2].	7
Fig. 1.5. Curvas de esfuerzo - deformación nominal. a) Determinación del límite elástico nominal al 0.2% de deformación en hierro fundido gris. b) Esfuerzo de cedencia superior e inferior que describe el comportamiento mecánico de acero de bajo carbono [2].	10
Fig. 1.6. Estricción de una probeta de acero dulce. Después de soportar la tracción uniaxial a tracción hasta casi la fractura, la sección transversal decreció en dicho punto [1].	11
Fig. 1.7. Comparación entre curva esfuerzo-deformación real y curva esfuerzo - deformación nominal de un acero de bajo carbono [1].	14
Fig. 1.8. Deformación en el ensayo de compresión axial. a) Pandeo, b) Cizallamiento, c) Doble abarillamiento, d) Abarillamiento, e) Compresión homogénea, f) Inestabilidad en la compresión debido al ablandamiento por deformación del material [3].	16
Fig. 1.9. Equipo para ensayos de compresión plana tipo Ford [4].	17
Fig. 1.10. Ejemplos de condiciones de deformación plana [4].	18
Fig. 1.11. Sistema de esfuerzos en deformación plana.	23
Fig. 1.12. Clasificación de las operaciones de conformado de metales [6].	25
Fig. 1.13. Procesos básicos de deformación volumétrica: a) rolado, b) forjado, c) extrusión y d) estirado. El movimiento relativo se indica por v , y las fuerzas se indican por F [6].	26
Fig. 1.14. Operaciones básicas en el trabajo de láminas metálicas: a) doblado, b) estirado y c) corte; 1) al primer contacto del punzón con la lámina y 2) después del corte. La fuerza y el movimiento relativo se indican por F y v [6].	29
Fig. 1.15. Curva esfuerzo - deformación reales en escala log-log [6].	35
Fig. 2.1. Carga aplicada al espécimen de compresión plana.	39
Fig. 2.2. Ejemplo de dispositivo de compresión plana.	43

Fig. 2.3. Dibujo de conjunto del dispositivo de compresión plana. Placa superior (1), placa inferior (2), barra deslizante (3), cilindro deslizante (4), indentor (5), soporte lateral de espécimen (6), base de espécimen (7).	45
Fig. 2.4. Placa superior: a) Vista superior, y b) Vista inferior.	46
Fig. 2.5. Vista superior, a) y vista inferior, b) de la placa inferior.....	48
Fig. 2.6. Indentor: a) Vistas de planta, y b) Vistas de inferior.	50
Fig. 2.7. Base del espécimen de compresión. a) Vistas de planta, y b) Vista superior.	52
Fig. 2.8. Soporte lateral del espécimen de compresión. a) Vista de planta, b) Vista lateral.	55
Fig. 3.1. Curva esfuerzo - deformación del primer espécimen ensayado.....	69
Fig. 3.2. Curva esfuerzo - deformación del segundo espécimen ensayado.....	70
Fig. 3.3. Curva esfuerzo - deformación del tercer espécimen ensayado.....	71
Fig. 3.4. Curva esfuerzo - deformación del cuarto espécimen ensayado.....	72
Fig. 3.5. Curva esfuerzo - deformación del quinto espécimen ensayado.	73
Fig. 3.6. Curva esfuerzo - deformación del sexto espécimen ensayado.	74
Fig. 3.7. Superposición de las curvas esfuerzo - deformación.	75
Fig. 4.1. Especimen de compresión correctamente colocado en el dispositivo de compresión plana.	78
Fig. 4.2. Dispositivo de compresión ensamblado. Las marcas deben coincidir para que los elementos se alineen correctamente.....	79
Fig. 4.3. Dispositivo de compresión acoplado a la máquina de ensayos de tracción - compresión.	79
Fig. 4.4. Extensómetro instalado y configurado para iniciar el ensayo de compresión plana.	80
Fig. 4.5. Extracción de los tornillos cónicos para remover los soportes laterales del espécimen.....	80
Fig. 4.6. Especimen de compresión plana después de ser ensayado.	81

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- a: Alto del espécimen de compresión.
- A_0 : Área de sección transversal inicial.
- A_b : Área de contacto de la base con el espécimen de compresión
- A_{ch} : Área interna del cilindro hidráulico en mm^2 , y
- A_f : Área de la sección transversal en la superficie de la fractura.
- A_i : Área mínima de la sección transversal de la probeta.
- A_i : Área máxima de contacto entre el indentor y el espécimen e compresión.
- A_{pi} : Área de contacto de la placa inferior con el asiento semiesférico de la máquina.
- A_{pi-b} : Área de contacto entre la placa inferior y la base del espécimen de compresión.
- A_{ps} : Área de contacto de la placa superior con la máquina de ensayos de tracción.
- A_{ps-i} : Área de contacto entre el indentor y la placa superior.
- A_{sl} : Área de contacto entre el soporte lateral y el espécimen de compresión.
- b: Ancho del espécimen de compresión.
- C: Constante.
- E: Módulo de elasticidad o módulo de Young.
- F: Fuerza media de tracción uniaxial.
- F_{ch} : Fuerza entregada por el cilindro hidráulico en N.
- $F_{m\acute{a}x}$: Carga máxima entregada por la máquina de ensayos de tracción.
- K: Coeficiente de resistencia.
- L: Longitud de muestra luego de ser alargada por la fuerza uniaxial a tracción.
- l: Largo del espécimen de compresión.
- l_0 : Longitud inicial de la muestra.
- l_0 : Longitud inicial de la muestra.
- l_f : Distancia entre las marcas calibradas después de la ruptura del material.
- l_i : Longitud instantánea durante el ensayo.
- $l_{m\acute{a}x}$: Longitud del espécimen con 40% de deformación.
- n: Exponente de endurecimiento por deformación.

- n_b : Factor de seguridad de la base del espécimen de compresión
- n_i : Factor de seguridad del indentor.
- P_{ch} : Presión en el cilindro hidráulico en MPa, leída en el manómetro,
- S : Esfuerzo nominal.
- S_0 : Esfuerzo de fluencia.
- S_1 : Esfuerzo en la dirección principal 1.
- S_2 : Esfuerzo en la dirección principal 2.
- S_3 : Esfuerzo en la dirección principal 3.
- S_b : Esfuerzo entre la base y el espécimen de compresión a carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.
- S_{mi} : Esfuerzo máximo entre el indentor y el espécimen de compresión a carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.
- S_{pi} : Esfuerzo entre la placa inferior con el asiento semiesférico a carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.
- S_{pi-b} : Esfuerzo entre la placa inferior y la base del espécimen de compresión a carga máxima, $F_{m\acute{a}x}$.
- S_{ps} : Esfuerzo entre la placa superior y la máquina de ensayos de tracción para la carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.
- S_{ps-i} : Esfuerzo entre la placa superior y el indentor, para la carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.
- S_{sl} : Esfuerzo entre cada soporte lateral y el espécimen de compresión a carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.
- S_t : Esfuerzo real.
- ϵ : Deformación nominal.
- $\epsilon_{lateral}$: Deformación lateral.
- $\epsilon_{longitudinal}$: Deformación longitudinal.
- ϵ_t : Deformación real.
- $T_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo cortante máximo.

INTRODUCCIÓN

La tecnología avanza continuamente, y a su vez los requerimientos de diseño y de construcción de elementos o componentes de máquinas y sistemas mecánicos, por lo cual se hace necesario estudiar e investigar propuestas de mejora de materiales y procesos para nuevas aplicaciones con el fin de optimizar los costos. Así, muchos procesos de metalistería tienen lugar bajo un estado de deformación plana, que se presenta cuando la deformación de un material en una dirección principal es cero, como es el caso del proceso de laminación. Para este fin, desde hace varios años se utilizan métodos de pruebas de materiales para determinar sus propiedades mecánicas, las cuales son necesarias para certificar la calidad y comportamiento de los metales. Por lo tanto, nace la necesidad de estudiar los estados de esfuerzo, el estado de deformación en compresión plana y ensayar especímenes de compresión plana, esperando que los resultados ayuden a comprender el comportamiento de los materiales de interés.

En el primer capítulo se presentan los fundamentos teóricos acerca de los ensayos de tracción y compresión axial y las propiedades obtenidas a partir de estos ensayos. Luego, se presenta la teoría básica referente al ensayo de deformación plana, su estado de esfuerzos y deformaciones, con el objetivo de diseñar y construir un dispositivo que permita realizar ensayos de compresión por deformación plana. También, se presenta teórica básica del conformado de metales, la clasificación y características principales de los procesos, y por último se presenta brevemente el efecto de la temperatura y la fricción en el conformado de metales.

En el segundo capítulo se presenta el diseño y dimensionamiento del dispositivo de compresión plana. Utilizando las expresiones deducidas del estado de esfuerzo y deformación se dimensionan los espécimen de compresión y los elementos del dispositivo de compresión plana. Este dispositivo de compresión se acopla a una máquina de ensayos de tracción y

compresión cuya capacidad máxima es de 5 T, la cual está ubicada en los laboratorios del Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Se presentan los costos de fabricación del dispositivo y el proceso de construcción del mismo.

El tercer capítulo trata acerca de la realización de ensayos de compresión plana en especímenes de cobre electrolítico y la interpretación de los resultados obtenidos. Para ello se realizaron ensayos para determinar la deformación máxima de los especímenes de compresión y un grupo más de ensayos para elaborar las curvas de esfuerzo - deformación.

En el cuarto capítulo se presentan las guías de uso y mantenimiento del dispositivo de compresión plana, debido a que el uso adecuado y el mantenimiento regular del mismo garantizarán su conservación y una vida larga para sus elementos.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se definen los conceptos básicos de esfuerzo y deformación, con intentos especiales en metales, se describe el ensayo de tracción utilizado para determinar algunas de las propiedades mecánicas de los materiales, importantes en la industria manufacturera. Se continúa con la descripción de los ensayos de compresión axial y plana. Finalmente, se presenta la deformación por compresión plana, una variante de la compresión axial, donde la deformación en una de las direcciones principales es igual a cero, y se presenta el estado de esfuerzos correspondientes a esta condición.

1.1. DEFORMACIÓN ELÁSTICA Y PLÁSTICA

Cuando se somete una pieza de metal a una fuerza de tracción uniaxial se produce la deformación del metal. Si el metal recupera sus dimensiones originales cuando se elimina la fuerza, se considera que el metal ha sufrido una deformación elástica. La cantidad de deformación elástica que puede soportar un metal es pequeña pues durante la deformación elástica, los átomos del metal se desplazan de sus posiciones originales, pero sin llegar a alcanzar nuevas posiciones. De este modo, cuando la fuerza sobre el metal deformado elásticamente se suprime, los átomos del metal vuelven a sus posiciones iniciales y el metal recupera su forma original. Si el metal se deforma tanto que no puede recuperar completamente sus dimensiones originales, se considera que ha sufrido una deformación plástica. Durante la deformación plástica, los

átomos del metal se desplazan continuamente desde sus posiciones iniciales hasta otras nuevas [1].

1.2. ESFUERZO Y DEFORMACIÓN NOMINALES

Considerando una barra cilíndrica de longitud l_0 y área de la sección transversal A_0 sujeta a una fuerza de tracción uniaxial F , como la que se presenta en la Fig. 1.1.

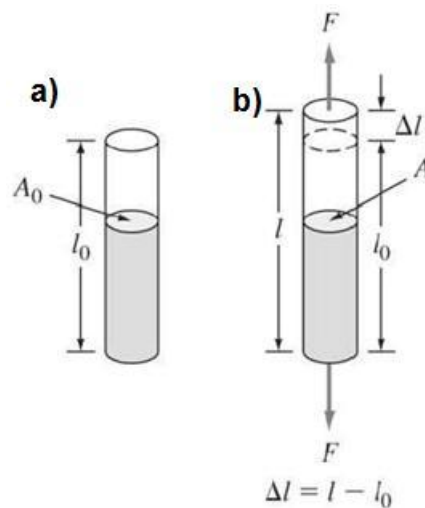


Fig. 1.1. Alargamiento de una barra cilíndrica. a) La barra sin ninguna fuerza y b) la barra sujeta a la fuerza de tracción uniaxial F , que alarga la barra desde una longitud l_0 hasta l [1].

Por definición, el esfuerzo nominal o de ingeniería sobre la barra es igual a la fuerza media de tracción (F) sobre la barra dividida por el área de su sección transversal (A_0). Por lo tanto:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (1.1)$$

donde:

S = esfuerzo nominal,

F = fuerza media de tracción uniaxial y

A_0 = área de sección transversal original.

Las unidades de esfuerzo nominal son Newton por metro cuadrado (N/m^2) o pascales (Pa) en el sistema internacional y libras fuerzas por pulgada cuadrada ($lb/pulg^2$, o psi) en el sistema inglés, [1].

Cuando una fuerza de tracción uniaxial se aplica a una barra, como la que se presenta en la Fig. 1.1, se produce un alargamiento de la barra en la dirección de la fuerza. Dicho desplazamiento se conoce como deformación. Por definición, la deformación nominal o unitaria es la relación entre el cambio en la longitud de una muestra en la dirección en que se aplica la fuerza y la longitud original, así:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

donde:

ε = deformación nominal,

l_0 = longitud inicial de la muestra y

l = longitud de muestra luego de ser alargada por la fuerza uniaxial de tracción.

Así, la deformación nominal es una magnitud adimensional, y comúnmente se determina sobre una pequeña longitud llamada longitud entre marcas, normalmente 2 pulg en los ensayos de tracción [1].

1.3. ENSAYO DE TRACCIÓN Y DIAGRAMA ESFUERZO - DEFORMACIÓN NOMINAL

El ensayo de tracción se utiliza para evaluar la resistencia de los metales y aleaciones. En este ensayo, una probeta de metal se estira a velocidad constante hasta la fractura. En la Fig. 1.2 se presenta una fotografía de una máquina moderna para ensayos de tracción, en la Fig. 1.3 se ilustra esquemáticamente cómo se realiza el ensayo a tracción. En la Fig. 1.4 se presenta un diagrama esfuerzo - deformación nominal para una aleación de aluminio, donde además se indican las propiedades mecánicas que se obtienen con el ensayo de tracción.



Fig. 1.2. Máquina para ensayos a tracción, con registro de fuerza y de deformación se registran en una computadora [1].

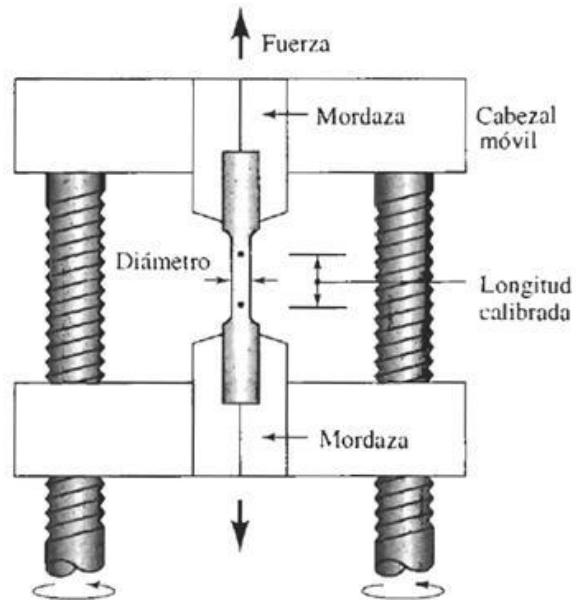


Fig. 1.3. Esquema del funcionamiento de una máquina de ensayos de tracción. Mediante un cabezal móvil, en la prueba de tracción se aplica una fuerza unidireccional en la probeta [2].

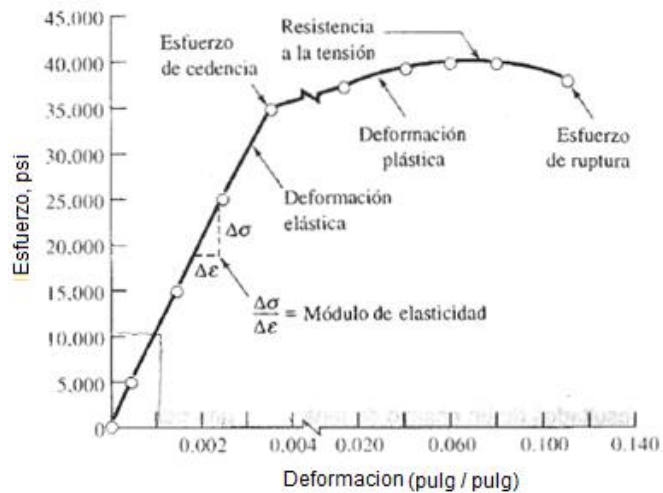


Fig. 1.4. Diagrama esfuerzo - deformación nominal correspondiente a una aleación de aluminio. Se indican los puntos correspondientes a las propiedades obtenidas del ensayo. El punto de cedencia indica el inicio de deformación plástica [2].

1.3.1. PROPIEDADES OBTENIDAS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones que tienen interés para el diseño estructural en ingeniería, y que pueden obtenerse a partir del ensayo de tracción, son:

a. Módulo de elasticidad:

En la primera parte del ensayo de tracción, el metal se deforma elásticamente. Es decir, si la fuerza que actúa sobre la probeta se suprime, esta volverá a su longitud inicial. Para los metales, la máxima deformación elástica suele ser inferior a 0.5%. En general, los metales y aleaciones presentan una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la región elástica del diagrama nominal que se describe por la ley de Hooke [1]:

$$S = E \cdot \varepsilon \quad (1.3)$$

o

$$E = \frac{S}{\varepsilon}$$

donde:

E = módulo de elasticidad o módulo de Young, y

ε = deformación unitaria o nominal.

El módulo de elasticidad está relacionado con la fuerza del enlace entre los átomos del metal o aleación. Además se puede notar que en la región elástica del diagrama nominal, el valor del módulo no varía con el incremento del esfuerzo [1].

Por lo tanto, la relación de Poisson, μ , relaciona la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo simple a tracción o compresión, con la deformación lateral que ocurre simultáneamente, así [2]:

$$\mu = \frac{-\epsilon_{\text{lateral}}}{\epsilon_{\text{longitudinal}}} \quad (1.4)$$

donde:

$\epsilon_{\text{longitudinal}}$ = deformación longitudinal, y

$\epsilon_{\text{lateral}}$ = deformación lateral.

b. Límite elástico nominal o esfuerzo de cedencia:

El límite elástico es un valor muy importante para el diseño en ingeniería, pues es el valor de esfuerzo al que un metal o aleación presenta una deformación plástica definida. Debido a que no existe un punto definido de la curva esfuerzo - deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación plástica, se determina el límite elástico como el esfuerzo al que se produce una deformación elástica definida. En muchas ocasiones se determina el límite cuando se produce una deformación de 0.2 % [1].

El límite elástico a 0.2 % de deformación, también denominado límite elástico nominal a 0.2 %, se determina a partir del diagrama nominal, como se presenta en la Fig. 1.5a. Así, se traza una línea paralela a la porción inicial de la curva esfuerzo - deformación, pero desplazada a 0.002 mm/mm (pulg/pulg) o 0.2 % del origen. El esfuerzo de cedencia nominal de 0.2 % es el esfuerzo al cual dicha línea interseca la curva esfuerzo - deformación [2].

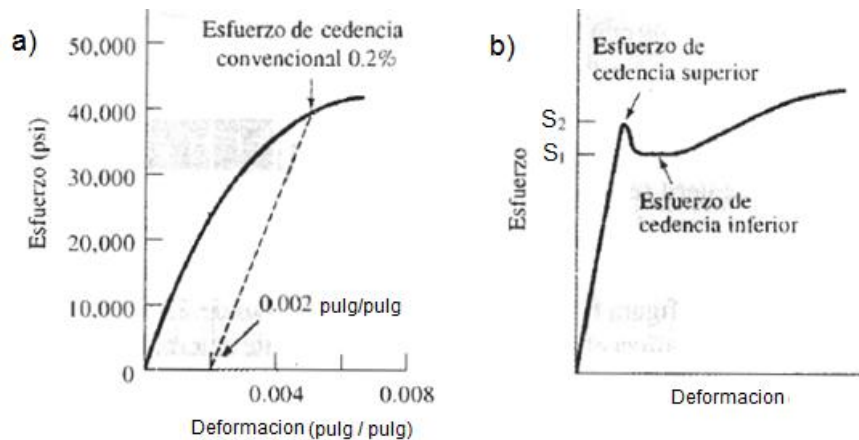


Fig. 1.5. Diagramas de esfuerzo - deformación nominal. a) Determinación del límite elástico nominal al 0.2 % de deformación, trazando una recta paralela a la porción inicial de la curva para un hierro fundido gris. b) Esfuerzo de cedencia superior e inferior que describe el comportamiento mecánico de acero de bajo carbono [2].

El diagrama esfuerzo - deformación para ciertos aceros de bajo carbono presentan un esfuerzo de cedencia o límite elástico doble, tal como se presenta en la Fig. 1.5b. Así, para ello se espera que el material se deforme plásticamente al esfuerzo inferior S_1 . Sin embargo, los pequeños átomos intersticiales de carbono agrupados alrededor de las dislocaciones interfieren con el deslizamiento, elevando el esfuerzo de fluencia o límite de elasticidad a S_2 . Por lo que sólo después de haber aplicado un esfuerzo mayor S_2 , empiezan a deslizarse las dislocaciones. Después de que se inicia el deslizamiento en S_2 , las dislocaciones se alejan de los agrupamientos de átomos de carbono y continúan moviéndose muy aprisa bajo el esfuerzo S_1 , menor [2].

c. Resistencia a la tracción:

El esfuerzo obtenido de la fuerza máxima aplicada es la resistencia a la tracción nominal, que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo - deformación nominal. En los materiales dúctiles, la deformación no se mantiene uniforme. En cierto momento, una región se deforma más que otras y ocurre una reducción local de importancia en la sección recta, como se presenta en la

Fig. 1.6. Esta región localmente deformada se conoce como zona de estricción o encuellamiento. Dado que el área de la sección transversal en este punto se hace más pequeña, se requiere una fuerza menor para continuar su deformación, y se reduce el esfuerzo nominal, calculado a partir del área original (A_0) [2].

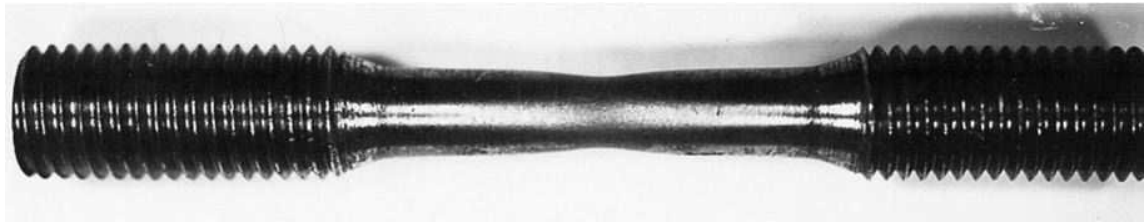


Fig. 1.6. Estricción de una probeta de acero dulce. Después de soportar la tracción uniaxial a tracción hasta casi la fractura, la sección transversal decreció en dicho punto [1].

d. Ductilidad:

La ductilidad mide el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse. Se puede medir la distancia entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo. El porcentaje de alargamiento representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura, así:

$$\% \text{ de alargamiento} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \% \quad (1.5)$$

donde:

l_f = distancia entre las marcas calibradas después de la ruptura del material [2].

Un segundo método para medir la ductilidad es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo. El porcentaje de reducción en área expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba, así:

$$\% \text{ de reducción de área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \quad (1.6)$$

donde:

A_f = área de la sección transversal en la superficie de la fractura [2].

El porcentaje de reducción en el área, como el porcentaje de alargamiento, es una medida de la ductilidad del metal. El porcentaje de reducción en el área se puede disminuir si existen defectos como inclusiones y/o porosidad en la muestra metálica [2].

1.3.2. ESFUERZO REAL Y DEFORMACIÓN REAL

El esfuerzo nominal se calcula dividiendo la fuerza aplicada (F) a una probeta de tracción por el área de su sección inicial, A_0 como se presenta en la Ec. 1.1. No obstante, dado que la sección transversal de la probeta cambia continuamente durante el ensayo de tracción, el esfuerzo nominal así calculado no es preciso. Además, durante el ensayo de tracción y después de se produzca la estricción de la probeta (ver Fig. 1.6), el esfuerzo nominal disminuye mientras la deformación aumenta, formándose un máximo en la curva esfuerzo - deformación nominal (ver Fig. 1.7). Por lo tanto, una vez iniciada la estricción durante el ensayo de tracción, el esfuerzo real es mayor que el esfuerzo nominal. El esfuerzo real y la deformación real se definen en las Ecs. 1.7 y 1.8 [1].

$$S_t = \frac{F}{A_i} \quad (1.7)$$

donde:

S_t = esfuerzo real,

F = fuerza uniaxial aplicada sobre la muestra, y

A_i = área mínima de la sección transversal de la probeta.

$$\epsilon_t = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (1.8)$$

donde:

ϵ_t = deformación real,

l_0 = longitud inicial de la muestra,

l_i = longitud instantánea durante el ensayo.

Si se admite que el volumen de la sección calibrada de la probeta se mantiene constante durante el ensayo, entonces $l_0 \cdot A_0$ será igual a $l_i \cdot A_i$.

También:

$$\frac{l_i}{l_0} = \frac{A_0}{A_1}$$
$$\epsilon_t = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_1}$$

En la Fig. 1.7 se comparan las curvas de esfuerzo - deformación nominal y esfuerzo - deformación real de un acero de bajo carbono [1].

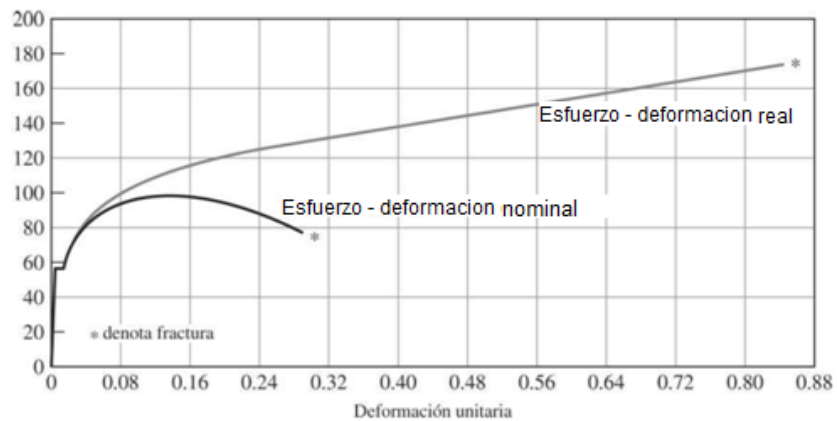


Fig. 1.7. Comparación entre curva esfuerzo-deformación real y curva esfuerzo - deformación nominal de un acero de bajo carbono. La curva nominal llega al punto máximo correspondiente a resistencia a la tracción, luego decrece debido a que la fuerza disminuye, mientras que en la curva real el esfuerzo sigue en aumento debido a la disminución del área de sección en la probeta [1].

En ingeniería, el diseño no se basa en el esfuerzo real hasta llegar a la fractura, sino hasta que se excede el límite elástico y el material empieza a deformarse. Los ingenieros utilizan en diseño mecánico el límite elástico nominal de 0.2% con factores de seguridad adecuados. No obstante, algunas veces, es necesario utilizar las curvas esfuerzo - deformación real en investigación [1].

1.4. ENSAYOS DE COMPRESIÓN

El ensayo de compresión es un ensayo técnico utilizado para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión. En la mayoría de los casos se realiza con hormigones y metales, sobre todo en aceros. En esta sección se presentan dos tipos de ensayos de compresión: axial y plana.

1.4.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL

El ensayo de compresión axial consiste en la aplicación de una carga distribuida, en las superficies tanto superior como inferior de un espécimen de sección transversal circular o rectangular. A pesar de que este ensayo es sumamente utilizado hoy en día, presenta varios inconvenientes durante su ejecución. Una de las principales limitaciones es la fricción que pueda existir entre el espécimen y las superficies de la máquina que se encontrarán en contacto con el mismo; este problema puede ser solventado mediante una adecuada lubricación, obteniendo así el mismo esfuerzo de fluencia que los ensayos de tracción, con pequeñas deformaciones. Sin embargo, a medida que aumenta la deformación, la capa de lubricante disminuye restringiendo la expansión del espécimen en la zona que está en contacto con la máquina. Esta condición provoca un ensanchamiento en la zona media del espécimen, produciendo un estado de esfuerzo - deformación no uniforme. Éste fenómeno es conocido como abarrilamiento y es la razón por la cual este ensayo no admite grandes deformaciones [3].

Otro fenómeno que puede ocurrir en este ensayo es el pandeo del espécimen. Si éste se presenta, el esfuerzo calculado a partir de las cargas registradas en la prueba será incorrecto. Sin embargo, el riesgo de pandeo puede reducirse tomando una especial atención a la alineación del equipo, una correcta fabricación del espécimen como especifica la norma y tomando en consideración la fricción entre el espécimen y las superficies de la máquina con las que estará en contacto. La fricción y la geometría del espécimen, pueden ser responsables de otras irregularidades que pudieran presentarse en el ensayo de compresión axial, tal como se presenta en la Fig. 1.8 [3].

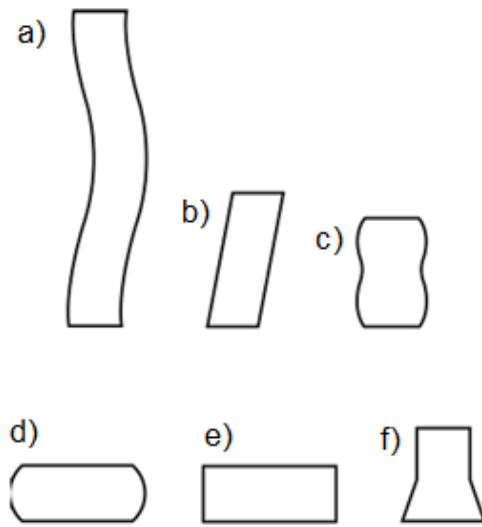


Fig. 1.8. Deformación en el ensayo de compresión axial. a) Pandeo, b) Cizallamiento, c) Doble abarrilamiento, d) Abarrilamiento, e) Compresión homogénea, f) Inestabilidad en la compresión debido al ablandamiento por deformación del material [3].

1.4.2. ENSAYO DE COMPRESIÓN PLANA

El ensayo de compresión con deformación plana fue propuesto y puesto en marcha por primera vez por Orowan en 1943 como una modificación del ensayo de compresión axial, logrando simular de esta forma el comportamiento de metales sometidos a procesos de laminación. Watts y Ford en 1952 y 1955 respectivamente, usaron el ensayo de compresión plana para determinar el fuerza de fluencia de metales a través de su compresión mediante dos placas paralelas completamente lisas. En la Fig. 1.9 se presenta un equipo para ensayo de compresión plana tipo Ford. Mediante este ensayo se comprobó que la microestructura generada en metales deformados en ensayos de compresión plana es muy similar a la microestructura presente después del proceso de

laminación, lo cual sugiere en principio que sería posible inferir el comportamiento del metal durante este proceso de conformado a través de ensayos de esta naturaleza. Así, en la Fig. 1.10 se presenta un esquema del ensayo y sus condiciones de deformación para tres casos diferentes [3].

El ensayo de compresión plana tipo Ford presenta ventajas sobre otros ensayos, tales como el de tracción y compresión axial. Este puede ser utilizado para obtener información a grandes porcentajes de deformación [3].

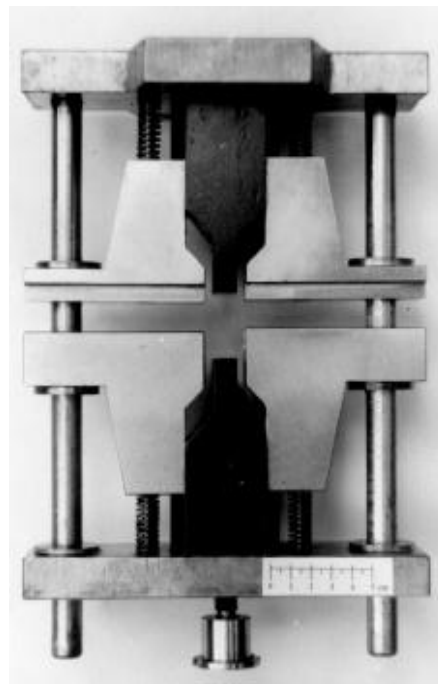


Fig. 1.9. Equipo para ensayos de compresión plana tipo Ford [4].

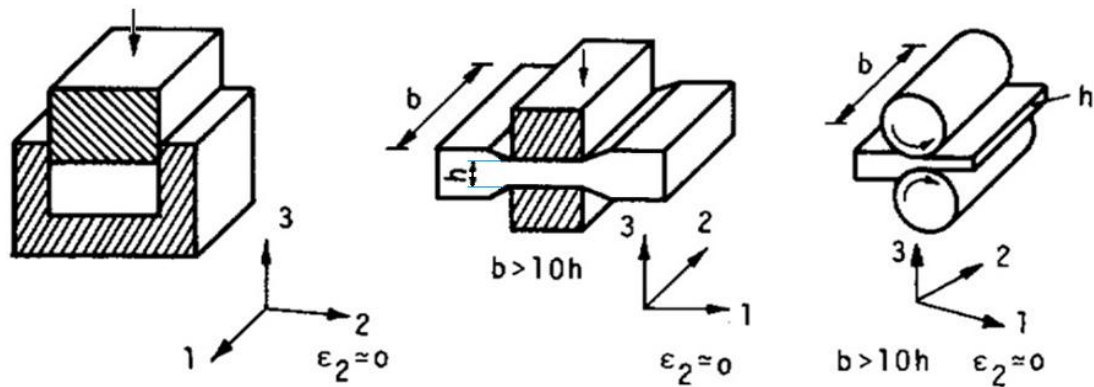


Fig. 1.10. Ejemplos de condiciones de deformación plana [4].

1.5. CRITERIOS DE CEDENCIA Y ESTADO DE ESFUERZO EN COMPRESIÓN PLANA

El esfuerzo de cedencia o resistencia a la cedencia se puede determinar a partir de una curva de esfuerzo - deformación ya sea como un valor característico definido como el esfuerzo a 0.2 % de deformación permanente [4].

En la mayoría de procesos de conformación y corte, la deformación tiene lugar bajo estados más complejos de esfuerzo y, por lo tanto, es necesario poder predecir el estado de esfuerzo en el cual se inicia y mantiene la cedencia. Esto significa que se debe establecer un criterio de cedencia que permita considerar todas las combinaciones de esfuerzos que producirán flujo plástico. El establecimiento de un criterio de cedencia se basa en las siguientes suposiciones y observaciones empíricas [4]:

- Los metales son homogéneos, continuos e isotrópicos, es decir, tienen las mismas propiedades en todas direcciones.

- Los metales tienen el mismo esfuerzo de cedencia en compresión y tracción.
- Una presión hidrostática superpuesta no influye en la iniciación de la cedencia.

1.5.1. CRITERIO DE CEDENCIA DE TRESCA

Tresca propuso que el flujo plástico ocurre cuando el esfuerzo cortante máximo excede un valor crítico. El esfuerzo cortante máximo, es igual a un medio de la diferencia entre el más grande y el más pequeño esfuerzo principal, así [4]:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{S_1 - S_3}{2} \geq \text{constante } k = \tau_{\text{crit}} \quad (1.9)$$

donde:

$S_1 > S_2 > S_3$, y son los esfuerzos en las tres direcciones principales.

Este criterio implica que la cedencia es independiente del esfuerzo principal intermedio, lo cual no es estrictamente verdadero. A pesar de esto, la diferencia en términos de esfuerzos entre el criterio de Tresca y el criterio más correcto de von Mises nunca excede 15% [4].

La Ec. 1.9 se aplica para todos los sistemas de esfuerzos, lo que vuelve sencillo, por tracción simple, calcular el valor de la constante k . En este caso, el estado de esfuerzo en cedencia está dado por $S_1 = S_0$, $S_2 = S_3 = 0$. Así, se tiene entonces que [4]:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{S_1 - S_3}{2} = \frac{S_0}{2} \geq k \quad (= \tau_{\text{crit}})$$

donde:

$\tau_{\text{máx}}$ = Esfuerzo cortante máximo.

El esfuerzo cortante crítico está relacionado con el esfuerzo de cedencia en tracción simple por [4]:

$$k = \frac{S_0}{2}$$

esto es muy importante, ya que S_0 es la propiedad más fácil de obtener. Finalmente, el criterio de Tresca puede ser expresado así [4]:

$$S_1 - S_3 \geq S_0 \quad (1.10)$$

1.5.2. CRITERIO DE CEDENCIA DE VON MISES

Von Mises propuso un criterio de cedencia, en el cual estableció que la cedencia ocurre cuando el trabajo de deformación por unidad de volumen realizado por el sistema de esfuerzos excede un valor crítico para el material particular, expresado matemáticamente como [4]:

$$(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 \geq C$$

donde:

C = constante.

Ya que la constante C es la misma para todos los sistemas de esfuerzos, el ensayo de tracción simple puede ser usado para determinar C. En tracción uniaxial donde $S_1 = S_0$, $S_2 = S_3 = 0$, se tiene [4]:

$$(S_1)^2 + (S_1)^2 = 2(S_0)^2 = C$$

Finalmente, el criterio de von Mises puede ser expresado entonces como

$$(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 \geq 2(S_0)^2 \quad (1.11)$$

Para el estado de esfuerzo cortante puro, los criterios de Tresca y de von Mises dan diferentes resultados. El esfuerzo cortante puro es equivalente a $S_1 = k$, $S_2 = 0$, $S_3 = -k$ [4]:

$$\begin{aligned} \text{Tresca: } k + k &= S_0; \quad k = \frac{S_0}{2} \\ \text{von Mises: } 6k^2 &= 2S_0^2; \quad k = \frac{2S_0}{2\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Esto significa que el esfuerzo cortante crítico en cedencia difiere, como se mencionó previamente, por $2\sqrt{3} = 1.15$; esto es, el criterio de von Mises requiere un valor de esfuerzo cortante crítico 15% más alto para iniciar la cedencia que el criterio de Tresca. Para metales dúctiles se ha demostrado experimentalmente que el criterio de von Mises da la mejor concordancia, pero el criterio de Tresca es aplicado particularmente para el diseño mecánico, debido a su simplicidad [4].

1.5.3. ESTADO DE ESFUERZOS EN COMPRESIÓN PLANA

En la Tabla 1.1 se presentan los resultados de los criterios de cedencia de Tresca y de Von Mises para diferentes sistemas de esfuerzo. La abreviatura EP significa sistema de esfuerzos planos, donde uno de los esfuerzos principales es cero y EC significa sistema de esfuerzos cilíndricos, donde dos de los esfuerzos principales son iguales [4].

Tabla 1.1 Criterios de cedencia de Tresca y von Mises para diferentes sistemas de esfuerzos.

Esfuerzos principales			Criterios de cedencia	
S ₁	S ₂	S ₃	Von Mises	Tresca
S ₁	S ₁	0	EP S ₁ = S ₀	S ₁ = S ₀
S ₁	S ₂	0	EP S ₁ ² + S ₂ ² - S ₁ S ₂ = S ₀ ²	S ₁ = S ₀
S ₁	0	S ₁	EP S ₁ = $\frac{S_0}{\sqrt{3}}$	S ₁ = $\frac{S_0}{2}$
S ₁	0	S ₃	EP S ₁ ² + S ₃ ² - S ₁ S ₃ = S ₀ ²	S ₁ - S ₃ = S ₀
0	S ₂	S ₂	EP - S ₂ = S ₀	- S ₂ = S ₀
0	S ₂	S ₃	EP S ₂ ² + S ₃ ² - S ₂ S ₃ = S ₀ ²	- S ₃ = S ₀
S ₁	S ₃	S ₃	EC S ₁ - S ₃ = S ₀	S ₁ - S ₃ = S ₀

Muchos procesos de metalistería tiene lugar bajo un estado de deformación llamado deformación plana; es decir, la deformación en una dirección principal es cero (dirección 2 en las figuras). Esto significa que el flujo en todas partes es paralelo al plano (13) e independiente de la posición a lo largo de la normal (2) a este plano, como se observa en la Fig. 1.10 [4].

Cuando un material que está siendo deformado plásticamente presenta tendencia a fluir en todas las direcciones, una condición de deformación plana implica que el flujo en una dirección es impedido ya sea por la geometría del componente o por la máquina. Una condición de deformación plana ($\epsilon_1, \epsilon_2=0$,

ϵ_3) no implica que el esfuerzo S_2 , sea cero. Lo anterior se puede demostrar con las reglas de flujo que, así [5]:

$$S_2 = \frac{S_1 + S_3}{2} \quad (1.13)$$

Aplicando el Criterio de Tresca (ver Ec. 1.10):

$$S_1 - S_3 = S_0$$

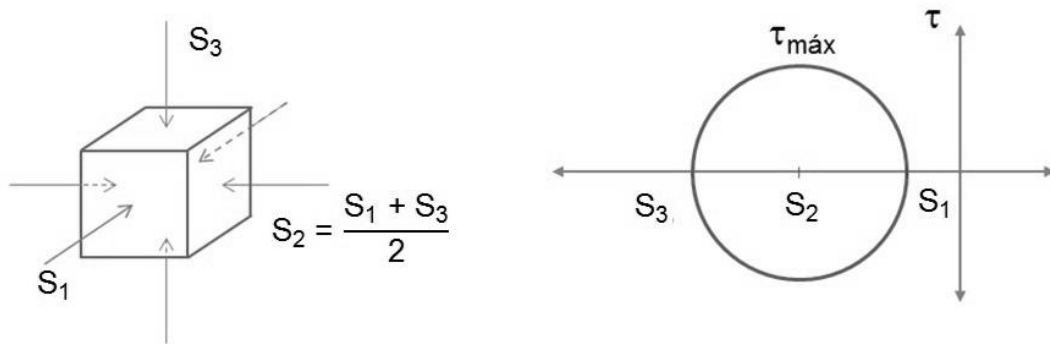


Fig. 1.11. Sistema de esfuerzos en deformación plana.

Aplicando el Criterio de von Mises (ver Ec. 1.11) y sustituyendo la expresión de S_2 de la Ec. 1.13 se tiene:

$$\begin{aligned} (S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 &= 2(S_0)^2 \\ \left(S_1 - \frac{S_1 + S_3}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_1 + S_3}{2} - S_3\right)^2 + (S_3 - S_1)^2 &= 2S_0^2 \\ \left(\frac{S_1 - S_3}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_1 - S_3}{2}\right)^2 + (S_3 - S_1)^2 &= 2S_0^2 \\ \frac{S_1^2}{4} - \frac{S_1 S_3}{2} + \frac{S_3^2}{4} + \frac{S_1^2}{4} - \frac{S_1 S_3}{2} + \frac{S_3^2}{4} + S_3^2 - 2S_1 S_3 + S_1^2 &= 2S_0^2 \\ \frac{6S_1^2}{4} - \frac{6S_1 S_3}{2} + \frac{6S_3^2}{4} &= 2S_0^2 \end{aligned}$$

$$\frac{3}{2}(S_1^2 - 2S_1 S_3 + S_3^2) = 2S_0^2$$

$$(S_1 - S_3)^2 = \frac{4}{3}S_0^2$$

$$S_1 - S_3 = \frac{2S_0}{\sqrt{3}} \quad (1.14)$$

Por otro lado, si las fuerzas de fricción son pequeñas y no se ejercen esfuerzos externos en la dirección 1 (por ejemplo, laminación y compresión por deformación plana), la Ec. 1.14 se modifica para convertirla en [5]:

$$-S_3 = \frac{2S_0}{\sqrt{3}} \quad (1.15)$$

1.6. CONFORMADO DE METALES

El conformado de metales incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. La deformación es el resultado del uso de una herramienta que generalmente es un troquel para formar metales, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del metal. Por lo tanto, el metal se deforma para tomar la forma que determina el troquel [6].

En general, se aplica el esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, algunos procesos de conformado estiran el metal, mientras que otros lo doblan y otros más lo cortan. Para formar exitosamente un metal, éste debe poseer ciertas propiedades. Las propiedades

convenientes para el conformado son por lo general una baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad. Estas propiedades las afecta la temperatura. La ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando aumenta la temperatura de trabajo. El efecto de la temperatura da lugar a la distinción entre trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización y trabajo en caliente. La velocidad de formación y la fricción son factores adicionales que afectan el desempeño del conformado de metales [6].

Los procesos de conformado se pueden clasificar en:

- Procesos de deformación volumétrica
- Procesos de trabajo de láminas metálicas.

Cada categoría incluye diferentes tipos de operaciones de conformado, como se indica en la Fig. 1.12 [6].

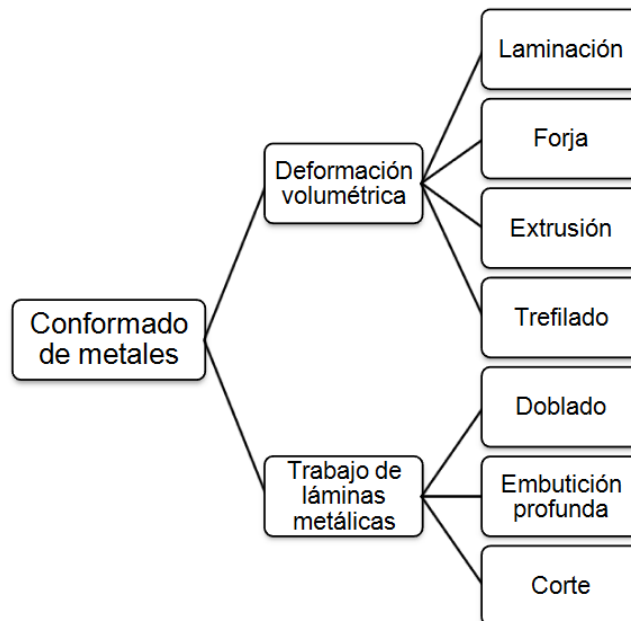


Fig. 1.12. Clasificación de las operaciones de conformado de metales [6].

1.6.1. PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

Los procesos de deformación volumétrica se caracterizan por deformaciones significativas y grandes cambios de forma, y la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. El término volumétrico describe a las piezas de trabajo que tienen esta baja relación de área - volumen. La forma del trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares. Las operaciones básicas en deformación volumétrica se ilustra en la Fig. 1.13 y se describen a continuación [6]:

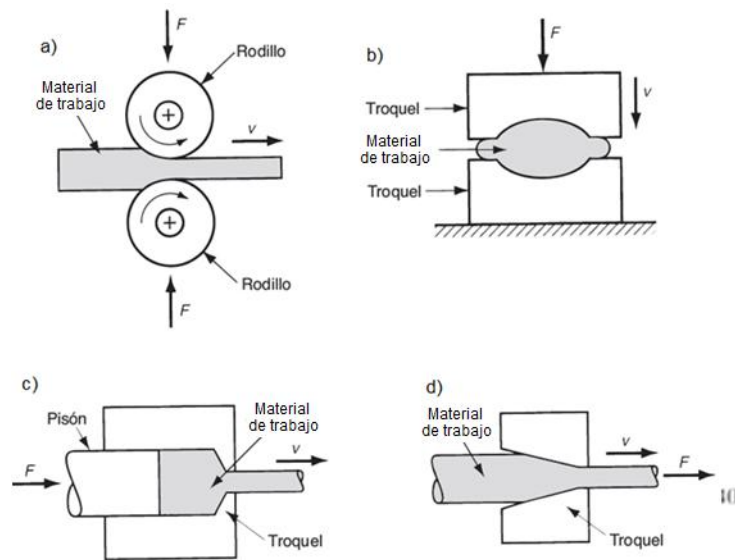


Fig. 1.13. Procesos básicos de deformación volumétrica: a) Laminado, b) forjado, c) extrusión y d) trefilado. El movimiento relativo se indica por v , y las fuerzas se indican por F [6].

- Laminado: Es un proceso de deformación por compresión en el cual el espesor de una plancha o placa se reduce por medio de dos herramientas cilíndricas opuestas llamadas rodillos. Los rodillos giran

para estirar y realizar el trabajo dentro de la abertura entre ellos y comprimirla [6].

- Forjado: En el forjado se comprime una pieza de trabajo entre dos troqueles opuestos, de manera que la forma del troquel se imprima para obtener el trabajo requerido. El forjado es un proceso tradicional de trabajo en caliente, pero muchos tipos de forjado se hacen también en frío [6].
- Extrusión: Es un proceso de compresión en el cual se fuerza el metal de trabajo a fluir a través de la abertura de un troquel para que tome la forma de la abertura de éste en su sección transversal [6].
- trefilado: En este proceso de conformado, el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando se tira del alambre a través de la abertura del troquel [6].

1.6.2. TRABAJO DE LÁMINAS METÁLICAS

Los procesos de trabajo de láminas metálicas son operaciones de conformado o preformado de láminas, tiras y rollos de metal. La razón entre el área superficial y el volumen del material inicial es alta; por lo que esta relación es un medio útil para distinguir la deformación volumétrica de los procesos de láminas metálicas. Prensado es el término que se aplica frecuentemente a las operaciones de láminas metálicas, debido a que las máquinas utilizadas para desempeñar estas operaciones son prensas (se usan también prensas de varios tipos en otros procesos de manufactura). La pieza producida en una operación de laminado metálico se llama frecuentemente estampado [6].

Las operaciones de láminas metálicas se ejecutan siempre en frío y se utiliza un juego de herramientas llamadas punzón y troquel. El punzón es la porción positiva y el troquel es la porción negativa del juego de herramientas. Las operaciones básicas de láminas metálicas se presentan en la Fig. 1.14 y se definen a continuación [6]:

- Doblado: El doblado implica la deformación de una lámina metálica o placa para que adopte un ángulo respecto a un eje recto, en la mayoría de los casos, como se observa en la Fig. 1.4a.
- Embutido: En el trabajo de láminas metálicas, el embutido se refiere a la transformación de una lámina plana de metal en una forma hueca o cóncava, como una copa, mediante el embutido del metal. Se usa un sujetador para mantener fija la plantilla, mientras el punzón empuja la lámina de metal, como se observa en la Fig. 1.14b.
- Corte: Este proceso queda de alguna manera fuera de lugar en la lista de procesos de deformación, debido a que implica más el corte que el conformado del metal. En esta operación se corta la pieza usando un punzón y un troquel, como se muestra en la Fig. 1.14c. Aunque éste no es un proceso de conformado, se incluye debido a que es una operación necesaria y muy común en el trabajo de láminas metálicas.

Los procesos misceláneos dentro de la clasificación del trabajo de láminas metálicas de la Fig. 1.12 incluye una de procesos de conformado relacionados que no utilizan herramientas de prensado y troquel. Como ejemplos de estos procesos se encuentran el conformado recto, doblado laminar, repujado y doblado de tubos [6].

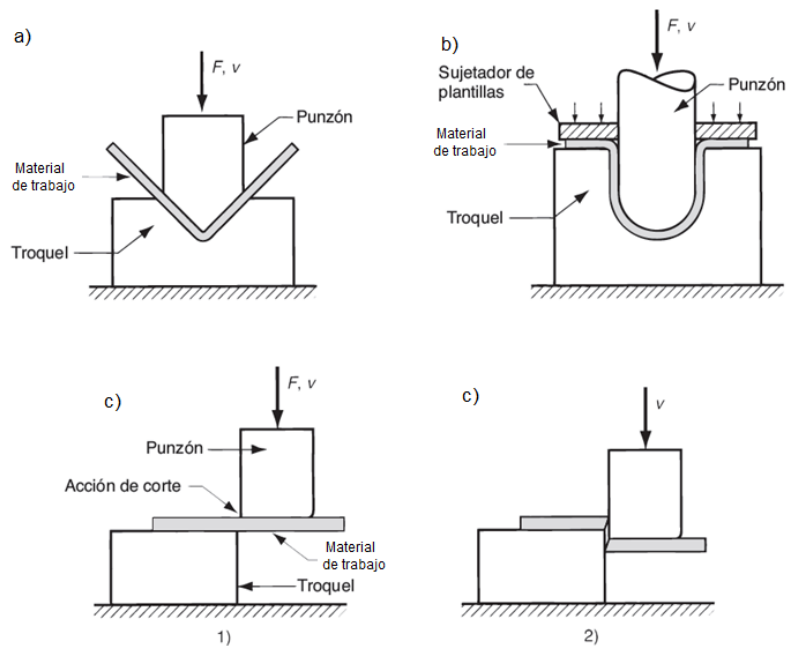


Fig. 1.14. Operaciones básicas en el trabajo de láminas metálicas: a) doblado, b) embutido y c) corte; 1) al primer contacto del punzón con la lámina y 2) después del corte. La fuerza y el movimiento relativo se indican por F y v [6].

1.6.3. TEMPERATURA EN EL CONFORMADO DE METALES

Tanto la resistencia como el endurecimiento por deformación se reducen a altas temperaturas. Además, la ductilidad se incrementa a altas temperaturas. Este cambio de propiedades es importante porque cualquier operación de deformación se puede alcanzar a temperaturas elevadas con fuerza y potencia menores. Existen tres intervalos de temperatura: trabajo en frío, caliente por debajo o por encima del punto de recristalización y se describen a continuación [6]:

a. Trabajo en frío:

También conocido como conformado en frío, es el conformado de metal que se realiza a temperatura ambiente o ligeramente arriba. Las ventajas significativas del conformado en frío comparado con el trabajo en caliente son:

- Proporcionar mejor precisión dimensional, lo que significa tolerancias más estrechas.
- Mejorar el acabado de la superficie.
- El endurecimiento por deformación aumenta la resistencia mecánica y la dureza de la pieza.
- El flujo de granos durante la deformación brinda la oportunidad de obtener propiedades direccionales convenientes en el producto resultante.
- Al no requerir calentamiento, se ahorran costos de horno y combustible, y se logran mayores velocidades de producción.

Debido a esta combinación de ventajas, se han creado muchos procedimientos de conformado en frío para operaciones importantes de producción en serie de piezas pequeñas. Estos procedimientos proporcionan tolerancias estrechas y buenas superficies, minimizando la cantidad de maquinado [6]. No obstante, existen desventajas o limitaciones asociadas con las operaciones de conformado en frío:

- Se requiere mayores potencia y fuerzas para desempeñar las operaciones,
- Se debe tener cuidado para asegurar que las superficies de la pieza de trabajo inicial están libres de incrustaciones y suciedad,
- La ductilidad y el endurecimiento por deformación del metal de trabajo limitan la cantidad de conformado que se puede hacer sobre la pieza. En algunas operaciones debe recocerse el metal para permitir la realización de

conformados posteriores. En otros casos el metal no es lo suficientemente dúctil para ser trabajado.

Para superar el problema de endurecimiento por deformación y reducir los requerimientos de fuerza y potencia, muchas operaciones de conformado se ejecutan a temperaturas elevadas [6].

b. Trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización:

Debido a que las propiedades de deformación plástica se mejoran normalmente con el aumento de la temperatura en la pieza de trabajo, las operaciones de conformado se realizan algunas veces a temperaturas algo más elevadas que la temperatura ambiente, pero por debajo de las temperaturas de recristalización. Se aplica el término trabajo en caliente a este segundo intervalo de temperatura. La línea divisoria entre el trabajo en caliente y el trabajo en frío se expresa frecuentemente en términos de la temperatura de fusión del metal o aleación. La línea divisoria usual es de $0.4 \cdot T_m$, donde T_m es la temperatura absoluta de fusión del metal particular [6].

Menores resistencias y endurecimiento por deformación, así como la mayor ductilidad del metal a temperaturas intermedias confieren al trabajo por debajo de la temperatura de recristalización las siguientes ventajas sobre el trabajo en frío [6]:

- Fuerzas más bajas y menores requerimientos de potencia;
- Son posibles trabajos más intrincados; y
- Se puede eliminar o reducir la necesidad de recocido.

c. Trabajo en caliente:

También llamado conformado en caliente, implica la deformación a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización. La temperatura de recristalización de un metal es aproximadamente la mitad de su punto de fusión en la escala absoluta. En la práctica, el trabajo en caliente se lleva a cabo usualmente a temperaturas por encima de $0.5T_m$. El metal de trabajo se suaviza más conforme la temperatura se incrementa más allá de $0.5T_m$, mejorando así la ventaja del trabajo en caliente por arriba de este nivel. Sin embargo, el proceso de deformación genera el calor que incrementa la temperatura de trabajo en algunas regiones de la pieza. Esto puede causar la fusión en estas regiones, lo cual es altamente indeseable. Las incrustaciones en la superficie de trabajo se aceleran también a temperaturas más altas. Por consiguiente, las temperaturas de trabajo en caliente se mantienen normalmente dentro del intervalo de $0.5 \cdot T_m$ a $0.75 \cdot T_m$ [6].

La ventaja más significativa del trabajo en caliente es la capacidad de producir deformaciones plásticas sustanciales del metal, más de las que son posibles con el trabajo en frío o el trabajo que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recristalización [6].

1.6.3. FRICCIÓN EN EL CONFORMADO DE METALES

La fricción en el conformado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta y el material de trabajo, y a las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones. En la

mayoría de los procesos de conformado, la fricción es inconveniente por las siguientes razones [6]:

- Retarda el flujo del metal en el trabajo, ocasionando esfuerzos residuales y algunas veces defectos en las piezas fabricados.
- Se incrementan las fuerzas y la potencia para desempeñar la operación.
- El desgaste de las herramientas puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, lo cual da por resultado piezas defectuosas y el remplazo de las herramientas.

Si el coeficiente de fricción llega a ser lo suficientemente grande, ocurre una condición conocida como adherencia. La adherencia en el trabajo de metales (también llamada fricción por adherencia) es la tendencia de las dos superficies en movimiento relativo apegarse una a la otra en lugar de deslizarse. Esto significa que el esfuerzo de fricción entre las superficies excede al esfuerzo de flujo cortante del metal de trabajo, ocasionando que el metal se deforme por un proceso de corte por debajo de la superficie, en lugar de que ocurra un deslizamiento entre las superficies. La adherencia ocurre en las operaciones de conformado de metal y es un gran problema en el laminado [6].

Tabla 1.2. Valores típicos de temperatura y coeficiente de fricción en trabajo en frío, en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización [6].

Categoría	Intervalo de temperatura	Coeficiente de fricción
Trabajo en frío	$\leq 0.3 \cdot T_m$	0.1
Trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización	$0.3 \cdot T_m - 0.5 \cdot T_m$	0.2
Trabajo en caliente por encima de la temperatura de recristalización	$0.5 \cdot T_m - 0.75 \cdot T_m$	0.4 - 0.5

1.7. ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

En la Fig. 1.7 se observa que en la región plástica el esfuerzo se incrementa en forma continua hasta que comienza el encuellamiento. Cuando esto pasaba en la curva de esfuerzo - deformación nominal, su utilidad se perdía porque para calcular el esfuerzo se había utilizado un valor de área que se sabía erróneo. Ahora, cuando el esfuerzo verdadero también se incrementa, no se puede ignorar tan a la ligera. Lo que eso significa es que el metal se está haciendo más resistente conforme la deformación aumenta. Esta propiedad se denomina endurecimiento por deformación, y que tienen casi todos los metales en mayor o menor grado [6].

El endurecimiento por deformación, o endurecimiento por trabajo, como se le denomina con frecuencia, es un factor importante en ciertos procesos de manufactura, en particular en la laminación del metal. Ahora se examinará el comportamiento de un metal en función de cómo lo afecta esta propiedad. Si la parte de la curva esfuerzo - deformación verdaderos que representa la región plástica se graficará en escala log-log, el resultado sería una relación lineal, como se observa en la Fig. 1.15. Debido a que con esta transformación de los datos se genera una línea recta, la relación entre el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera en la región plástica se expresa como [6]:

$$S = k \cdot \epsilon^n \quad (1.16)$$

donde:

K = Coeficiente de resistencia, y

n = Exponente de endurecimiento por deformación.

Esta ecuación se llama curva de flujo, y proporciona una aproximación buena del comportamiento de los metales en la región plástica, inclusive de su capacidad de endurecerse por deformación. La constante K en MPa (o lb/pulg²), y es igual al valor del esfuerzo verdadero para un valor igual a 1 de la deformación verdadera. El parámetro n es la pendiente de la recta que se observa en la Fig 1.15. Su valor está directamente relacionado con la tendencia de un metal para endurecerse con el trabajo en frío. En la Tabla 1.3 se dan valores comunes de K y n para metales seleccionados [6].

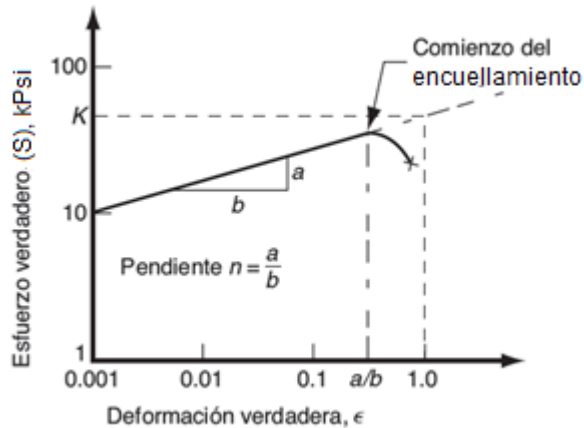


Fig. 1.15. Curva esfuerzo - deformación reales en escala log-log [6].

El encuellamiento en un ensayo de tracción y en operaciones de laminado de metales que estiran la pieza de trabajo se relaciona estrechamente con el endurecimiento por deformación [6].

Tabla 1.3. Valores característicos del coeficiente de resistencia K y del exponente de endurecimiento por deformación, n, para metales seleccionados.

Material	Coeficiente de resistencia, K		Exponente de endurecimiento por deformación, n
	MPa	Lb/pulg ²	
Aluminio puro cocido	175	25000	0.20
Aleación de aluminio, templada	240	35000	0.15
Aleación de aluminio, tratada térmicamente*	400	60000	0.10
Cobre puro, templado	300	45000	0.50
Cobre, aleación: latón	700	100000	0.35
Acero bajo C, templado	500	75000	0.25
Acero alto C, templado	850	125000	0.15
Acero aleado, templado	700	100000	0.15
Acero inoxidable auténtico templado	1200	175000	0.40

* Los valores K y n varían con la composición, el tratamiento térmico y el endurecimiento por trabajo.

2. DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE COMPRESIÓN PLANA

En este capítulo se inicia diseñando los especímenes de compresión plana, definiendo variables geométricas, y calculando esfuerzos de fluencia necesarios para que se pueda llevar a cabo el ensayo de compresión plana en condiciones ideales.

Después se definirán las variables de diseño del dispositivo de compresión plana, tomando como punto de partida los esfuerzos y dimensiones calculados para los especímenes de compresión diseñados previamente. Para ello se consideran las variables geométricas, materiales, cargas, costo monetario y factibilidad para la fabricación.

Finalmente se presentan los costos, selección de materiales y las dimensiones en bruto de los materiales utilizados para la fabricación de los diferentes elementos del dispositivo.

2.1. DISEÑO DEL ESPÉCIMEN PARA COMPRESIÓN PLANA

A diferencia del ensayo de compresión axial, los ensayos de compresión plana no están normalizados, como se expuso en el capítulo anterior, pero esto no es necesariamente una desventaja, puesto que los especímenes, equipos y accesorios necesarios para los ensayos de compresión plana pueden diseñarse en base a los recursos disponibles, tanto tecnológicos como recursos económicos. Como desventaja, los resultados de los ensayos no pueden ser comparados directamente con otros estudios, pero si las curvas de esfuerzo -

deformación, las cuales se podrán obtener mediante el dispositivo que se está diseñando y construyendo en el presente trabajo.

Las variables a considerar para el diseño del espécimen de compresión plana son los siguientes: Materiales, geometría y cargas. Las variables anteriores no son independientes una de la otra de modo que se presentan a continuación datos de importancia que serán usados para el diseño de los especímenes:

a) Material:

Los especímenes serán fabricados de cobre electrolítico, adquiridos en Abasteinsa y cuya hoja técnica presenta que la resistencia a la tracción de este material en estado recocido es de 215 MPa y trabajado en frío de 340 MPa. Se cuenta también con valores de resistencia a la fluencia, de 68 MPa en estado recocido y 275 MPa trabajado en frío. El cobre electrolítico se puede trabajar en frío hasta el 40%.

b) Geometría y Carga:

Como se presentó en las Figs. 1.3 y 1.8, la geometría para las probetas de tracción y compresión axial poseen secciones transversales cilíndricas, y esta geometría funciona bien dada la naturaleza de ensayo.

Debido a que en los ensayos de compresión plana solamente en uno de los ejes principales la deformación es cero, una sección transversal cuadrada o rectangular es la más adecuada para los especímenes a ensayar, tal como se presentó en la Fig. 1.10.

La carga máxima aplicable en los ensayos no puede exceder la capacidad de la máquina de tracción donde se instalará el dispositivo de compresión plana, esto es de 49030 N (5 T). A este valor de carga se le aplicará un factor de seguridad, para evitar accidentes, acortar la vida útil de los

componentes o en el peor de los casos, fallas en el sistema hidráulico donde sea necesario sustituir elementos costosos.

En la Fig. 2.1 se presentan las dimensiones de un espécimen de compresión, donde a es el alto, b es el ancho y l es el largo, los ejes principales y la carga aplicada F . Como se expuso en el capítulo 1, idealmente la deformación en la dirección 2 es igual a cero, que corresponde a las superficies o soportes laterales del dispositivo de compresión que hacen contacto con el espécimen de compresión y que se consideran indeformables. Se debe aclarar que siempre existirá deformación en la dirección principal 2, pero esta es pequeña, no será tomada en cuenta en el diseño, pero si calculada y especificada cuando se realicen los ensayos.

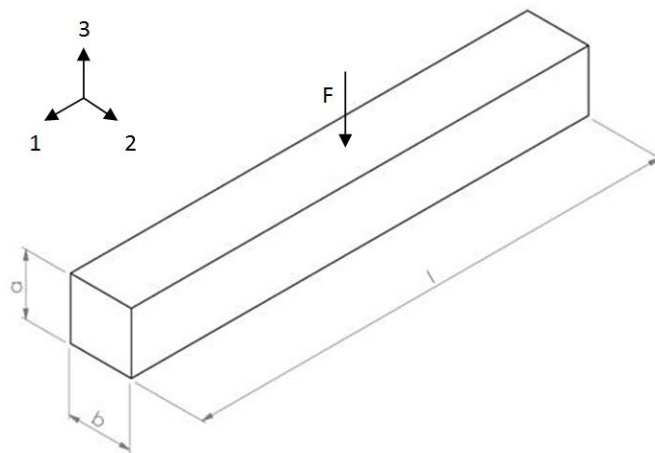


Fig. 2.1. Esquema de la carga aplicada al espécimen de compresión plana, sus dimensiones y ejes principales.

Las dimensiones del espécimen de compresión se calcularán para que cumplan dos condiciones, que a los especímenes se les pueda realizar un trabajo en frío del 40% y que la carga necesaria para la deformación no supere la capacidad de la máquina de tracción.

A medida que el material se deforma en frío también se endurece, así el esfuerzo necesario para continuar deformándolo aumenta hasta tener un valor de ~275 MPa, correspondiente al 40% de trabajo en frío.

Utilizando la Ec. 1.1 se puede calcular la superficie máxima sobre la cual se puede lograr deformación plástica en un espécimen de cobre electrolítico, con la carga máxima soportada por la máquina de tracción, así:

$$A = \frac{F}{S}$$
$$A = \frac{49030 \text{ N}}{275 \text{ MPa}}$$
$$A = 178.29 \text{ mm}^2$$

El valor del área obtenido también debe ser el producto de cualquier combinación de las variables ancho y largo. Luego de un corto proceso de iteración, se han seleccionado las siguientes dimensiones para el espécimen de compresión:

$$a = 4 \text{ mm}$$

$$b = 4 \text{ mm}$$

$$l = 30 \text{ mm}$$

donde:

a = alto, mm;

b = ancho, mm; y

l = largo, mm.

2.2. DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO DE COMPRESIÓN PLANA

El dispositivo de compresión plana tiene dos elementos de mayor importancia, que son el indentor y el canal guía, encargados de realizar la deformación en las direcciones deseadas y limitarla en una tercera dirección. Estos elementos están directamente relacionados con los especímenes de compresión plana.

Para que se cumpla satisfactoriamente la función, es necesario hacer consideraciones adicionales a las cargas, como la correcta alineación del indentor con el canal guía y el espécimen, la rigidez necesaria para evitar deformaciones no deseadas que puedan afectar los ensayos, evitar el deterioro de algunos elementos por efecto de la corrosión.

Las variables a tomar en cuenta para el diseño del dispositivo son las siguientes: limitaciones geométricas, materiales, cargas y esfuerzos, alineación, fabricación y costo, los cuales son:

a. Limitaciones geométricas:

El dispositivo de compresión plana se acoplará a la máquina de ensayos de tracción - compresión de la EIM, por lo que deben considerarse las limitaciones geométricas de la máquina; es decir, el tamaño del dispositivo debe ser adecuado para ser acoplado sin interferencia alguna y que cumpla los requerimientos de carga para garantizar su rigidez y correcto funcionamiento.

Tomando como referencia las dimensiones de la máquina de ensayos, cuya geometría limita las máximas dimensiones que puede tener el dispositivo de compresión, esto es 110 mm de espacio libre entre las barras deslizantes atornilladas a la placa. Entre el asiento semiesférico y el apoyo superior de las probetas de compresión existe un espacio de 87 mm en la vertical [7].

b. Alienación:

Se debe garantizar la correcta alineación entre el indentor y el canal guía para minimizar errores en los ensayos. Además, de alterar los resultados del ensayo, una desalineación entre los elementos puede ocasionar deformación plástica e inclusive fractura de algunas de las piezas del dispositivo o de la máquina de ensayos de tracción o daño a sus componentes hidráulicos.

En las Figs. 1.9 y 2.2 se presentan ejemplos de dispositivos de compresión plana que poseen configuraciones sencillas y prácticas para garantizar la alineación entre sus elementos, sin la necesidad de dispositivos o equipos adicionales, puesto que una vez son ensamblados y alineados, mantienen la alineación. Con esto presente, se tiene como objetivo lograr un diseño sencillo, con pocas partes móviles, de fácil fabricación y funcional.

c. Cargas y esfuerzos:

Cuando se lleven a cabo los ensayos de compresión plana, la máquina de ensayos de tracción transfiere la carga al dispositivo de compresión, carga que se traduce en esfuerzos en todos los elementos del dispositivo, siendo el indentor y el canal guía los de mayor sollicitación debido a que las áreas de contacto con los especímenes son muy pequeñas, comparadas a las áreas donde el dispositivo entra en contacto con la máquina de ensayos de tracción.

Otro factor importante es que los materiales seleccionados no solo no deben fallar, sino que además no deben deformarse durante los ensayos, de lo contrario, los resultados no serán fiables. Por lo anterior, es necesario que los esfuerzos máximos en los elementos no superen el límite de fluencia de los materiales.

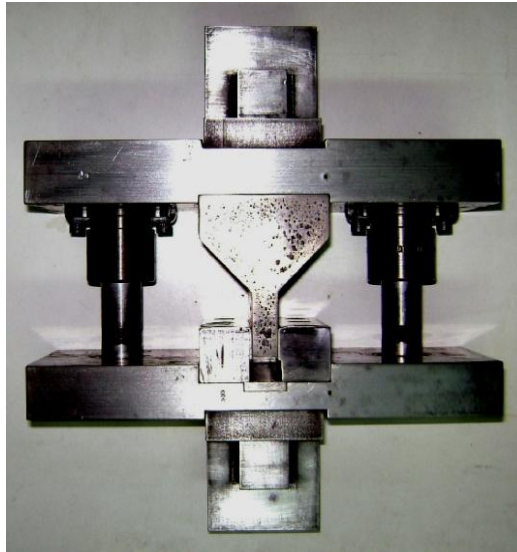


Fig. 2.2. Ejemplo de dispositivo de compresión plana.

d. Materiales:

La selección de los materiales para los elementos del dispositivo no está limitado por los esfuerzos a los que serán sujetos, serán tomados en cuenta otros factores que intervienen en la fabricación, los cuales son la disponibilidad en el mercado, rigidez, resistencia a la corrosión, maquinabilidad, geometrías disponibles y costo.

e. Fabricación y costos:

Un buen diseño tiene en consideración los procesos de fabricación para cada uno de sus componentes, lo que implica la disponibilidad de equipos y herramientas adecuadas para obtener las geometrías y acabados adecuados, que a su vez están relacionados íntimamente con los materiales seleccionados para los elementos debido a que cada material requiere cierta potencia y tipo de herramienta para el maquinado.

Los costos de fabricación siempre deben considerarse en un proyecto, pues los recursos económicos son limitados y con base a ellos se debe realizar un buen diseño y una selección adecuada de materiales.

2.2.1. DIMENSIONAMIENTO

Conociendo las dimensiones de los especímenes de compresión y las variables de diseño, se procede a dimensionar el dispositivo de compresión plana. Este dimensionamiento toma en cuenta las limitaciones geométricas de la máquina de ensayos de tracción y requerimientos de alineación como variables principales, porque en base al dimensionamiento se realiza la selección posterior de los materiales para cada elemento del dispositivo.

Se debe aclarar que las figuras, cálculos y planos presentados son los correspondientes al dispositivo tal como fue construido, dado que al diseño presentado originalmente fue modificado para facilitar su maquinado y garantizar su funcionamiento en las condiciones requeridas.

En la Fig. 2.3 se presenta un dibujo de conjunto del dispositivo de compresión plana y en ella están indicados cada uno de sus elementos. Los planos de conjunto y detalles se encuentran en el anexo A. Así, a continuación se presentan los cálculos de los esfuerzos a los que están sometidos cada uno de sus elementos y se finaliza con la selección de materiales para cada elemento:

A) PLACA SUPERIOR:

La placa superior recibe directamente la carga de la máquina de ensayos de tracción - compresión y la transfiere hacia el indente. En la placa superior también serán atornillados los cilindros deslizantes, pero estos no reciben una carga significativa, ya que su fin es mantener la alineación.

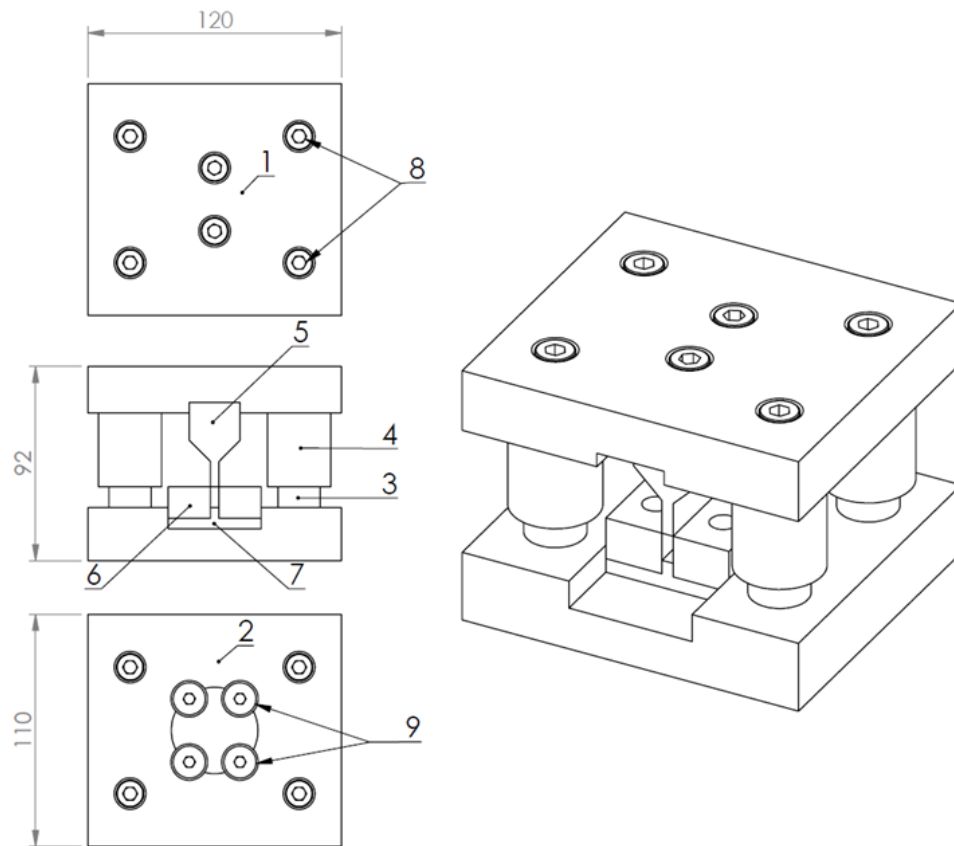


Fig. 2.3. Dibujo de conjunto del dispositivo de compresión plana. 1 Placa superior, 2 placa inferior, 3 barra deslizante, 4 cilindro deslizante, 5 indente, 6 soporte lateral de espécimen, 7 base de espécimen, 8 tornillo M8x1.25, 9 Tornillo cabeza cónica M8x1.25.

Los esfuerzos más altos se produce en las áreas de contacto con la máquina de ensayos de tracción - compresión, esto es en el apoyo superior de

las probetas de compresión y el indente, como se puede observar en la Fig. 2.4.

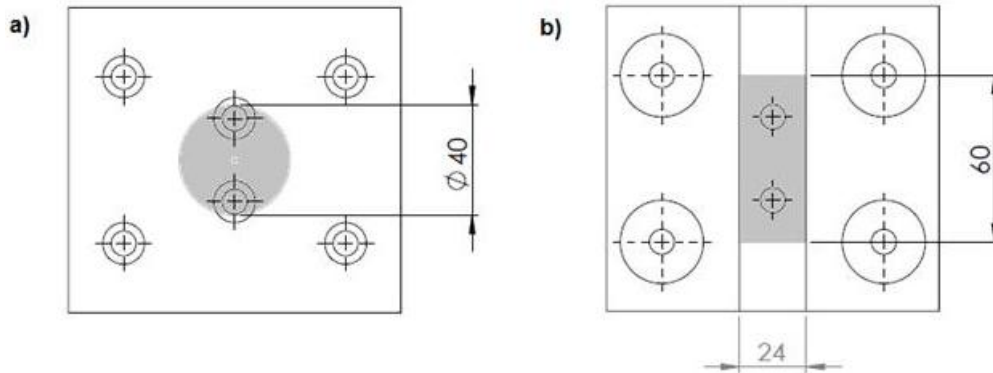


Fig. 2.4. Placa superior: a) Vista superior, y b) Vista inferior. Las áreas sombreadas son las sujetas a mayor esfuerzo.

$$S_{ps} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_{ps}}$$

$$F_{m\acute{a}x} = 5 T = 49030 \text{ N}$$

$$A_{ps} = \pi r^2 = \pi(20 \text{ mm})^2$$

$$A_{ps} = 1256.64 \text{ mm}^2$$

$$S_{ps} = \frac{49030 \text{ N}}{1256.64 \text{ mm}^2}$$

$$S_{ps} = 39.01 \text{ MPa}$$

donde:

A_{ps} = área de contacto de la placa superior con la máquina de ensayos de tracción.

S_{ps} = esfuerzo entre la placa superior y la máquina de ensayos de tracción para la carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.

Considerando que la carga se trasfiere íntegramente al indente, se tiene que el esfuerzo de contacto entre la placa superior y el indente es:

$$S_{ps-i} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_{p-i}}$$

$$A_{ps-i} = (24 \text{ mm})(60 \text{ mm})$$

$$A_{p-i} = 240 \text{ mm}^2$$

$$S_{ps-i} = \frac{49030 \text{ N}}{240 \text{ mm}^2}$$

$$S_{ps-i} = 204.29 \text{ MPa}$$

donde:

A_{ps-i} = \u00e1rea de contacto entre el indedor y la placa superior.

S_{ps-i} = esfuerzo entre la placa superior y el indedor, para la carga m\u00e1xima $F_{m\acute{a}x}$.

N\u00f3tese que el l\u00edmite el\u00e1stico del acero AISI-1020 es de 390 MPa [9], lo que garantiza que el elemento no sufrir\u00e1 deformaciones significativas cuando se aplique la carga.

B) PLACA INFERIOR

De igual forma que la placa superior, la m\u00e1quina de ensayos de tracci\u00f3n - compresi\u00f3n aplica la carga directamente a la placa inferior, y esta la transfiere a la base del esp\u00e9cimen de compresi\u00f3n y los soportes laterales.

El dispositivo debe alinearse correctamente con la m\u00e1quina de ensayos, as\u00ed, la placa inferior fue dise\u00f1ada con un vaciado para ajustarse al asiento semiesf\u00e9rico de la m\u00e1quina, cuya funci\u00f3n es garantizar alineaci\u00f3n entre la m\u00e1quina y es dispositivo de compresi\u00f3n, y que la carga aplicada sea vertical.

Las \u00e1reas que estar\u00e1n sujetas a mayores esfuerzos son las de contacto con la base del esp\u00e9cimen de compresi\u00f3n, y con el asiento semiesf\u00e9rico de la m\u00e1quina. Por lo tanto, las \u00e1reas de contacto se presentan en la Fig. 2.5, y los esfuerzos son:

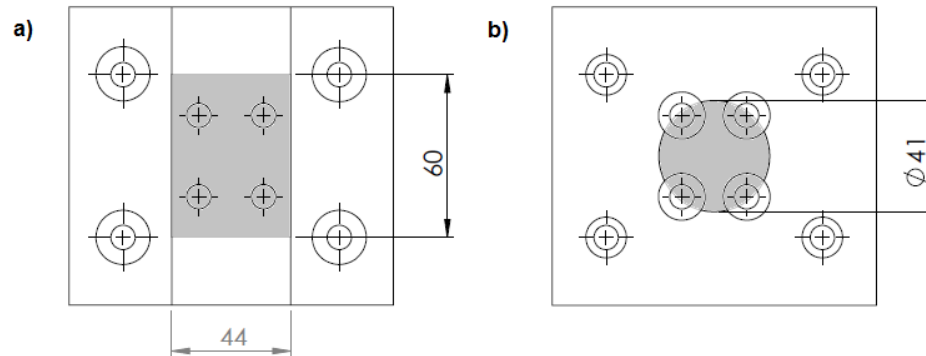


Fig. 2.5. Placa inferior: a) vista superior, b) vista inferior. Las áreas sombreadas indican las sujetas a mayores esfuerzos

$$S_{pi} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_{pi}}$$

$$F_{m\acute{a}x} = 49030 \text{ N}$$

$$A_{pi} = \pi r^2 = \pi(20.5 \text{ mm})^2$$

$$A_{pi} = 1320.25 \text{ mm}^2$$

$$S_{pi} = \frac{49030 \text{ N}}{1320.25 \text{ mm}^2}$$

$$S_{pi} = 37.13 \text{ MPa}$$

donde:

A_{pi} = \u00e1rea de contacto de la placa inferior con el asiento semiesf\u00e9rico de la m\u00e1quina.

S_{pi} = esfuerzo entre la placa inferior con el asiento semiesf\u00e9rico a carga m\u00e1xima

$F_{m\acute{a}x}$.

$$S_{pi-b} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_{pi}}$$

$$F_{m\acute{a}x} = 49030 \text{ N}$$

$$A_{pi-b} = (60 \text{ mm})(44 \text{ mm})$$

$$A_{pi-b} = 2640 \text{ mm}^2$$

$$S_{pi-b} = \frac{49030 \text{ N}}{2640 \text{ mm}^2}$$

$$S_{pi-b} = 18.57 \text{ MPa}$$

donde:

A_{pi-b} = área de contacto entre la placa inferior y la base del espécimen de compresión.

S_{pi-b} = esfuerzo entre la placa inferior y la base del espécimen de compresión a carga máxima, $F_{m\acute{a}x}$.

Por lo anterior, el material seleccionado para la placa inferior es un acero al carbono AISI 1020.

C) INDENTOR:

El indentor es uno de los elementos de mayor importancia en el dispositivo de compresión plana, debido a que éste actúa directamente sobre el espécimen a ensayar. Este elemento afecta directamente los resultados de los ensayos, y para minimizar los errores, el indentor no debe sufrir deformaciones apreciables; esto es, que se pueda considerar rígido a carga máxima en los ensayos.

La fricción juega un papel importante en estos ensayos, creando resistencia para que el material fluya y se deforme, lo que hace necesaria una mayor potencia en la máquina para vencer la fricción. La fricción se puede reducir si el acabado superficial de las superficies en contacto con los especímenes, y el espécimen mismo posean acabados finos, tipo espejo por ejemplo.

Se puede utilizar lubricación de forma interrumpida o cíclica, así antes de iniciar el ensayo lubricar e ejecutar el ensayo hasta cierta deformación; luego, desmontar el espécimen y lubricar el indentor y el canal; posteriormente, continuar con el ensayo de esta forma interrumpido hasta obtener el porcentaje de trabajado en frío requerido o alcanzar la carga máxima de la máquina.

En la Fig. 2.6 se presentan dos vistas del indentor, donde el área de contacto con los especímenes de compresión es variable, debido al alargamiento que esta última sufre, tal y como se calculó en la sección correspondiente al dimensionamiento de los especímenes, se ha calculado un porcentaje de alargamiento del 40%.

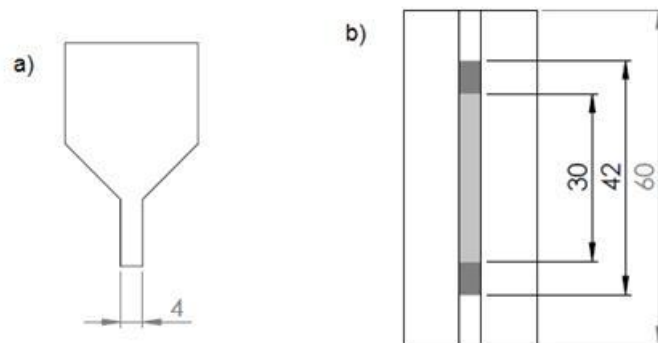


Fig. 2.6. Indentor: a) vista de planta, y b) vista inferior. El sombreado claro indica el área cuando el espécimen no se ha deformado. El sombreado oscuro indica el área del espécimen a máxima deformación.

El esfuerzo máximo se presenta cuando se aplica la carga máxima de 5 T, y el área correspondiente a esta condición, donde se ha calculado una deformación del espécimen del 40%; es decir, desde 30 mm a 42 mm, es:

$$A_i = (b)(l_{\text{máx}}) = (4)(42 \text{ mm})$$

$$A_i = 168 \text{ mm}^2$$

donde:

A_i = área máxima de contacto entre el indedor y el espécimen e compresión.

b = ancho del espécimen de compresión.

$l_{m\acute{a}x}$ = longitud del espécimen con 40% de deformación.

Por lo tanto, el esfuerzo máximo es

$$S_{mi} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_i}$$
$$S_{mi} = \frac{49030 \text{ N}}{168 \text{ mm}^2}$$
$$S_{mi} = 291.84 \text{ MPa}$$

donde:

S_{mi} = esfuerzo máximo entre el indedor y el espécimen de compresión a carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.

Para alargar la vida de este elemento tan importante, se pretende seleccionar un material con resistencia a la corrosión. El acero inoxidable 302 tiene un límite de fluencia de 276 MPa [9], lo que indica que el material sufrirá deformación plástica.

Como alternativa al acero inoxidable se tienen aceros aleados, entre estos acero están el AISI 4140 y AISI 4340, los cuales están disponibles en el mercado nacional y poseen cierta resistencia a la corrosión, y cuyos límites de fluencia son de 655 y 855 MPa [9], respectivamente, los cuales son superiores a los requerimientos de carga para el indedor. El acero AISI 4140 es de menor costo, y el factor de seguridad al seleccionar este material es

$$n_i = \frac{S_y}{S_{mi}} = \frac{655 \text{ MPa}}{291.84 \text{ MPa}}$$

$$n_f = 2.24$$

donde: n_f es el factor de seguridad a carga máxima para el acero AISI 4140 seleccionado. Nótese que su estado es bonificado.

D) BASE DEL ESPÉCIMEN DE COMPRESIÓN

La base y los soportes laterales en conjunto dan forma al canal donde se colocarán los especímenes de compresión. Al igual que el indentor, las superficies en contacto con los especímenes de compresión, deben tener un acabado superficial fino, y la rigidez suficiente para minimizar deformaciones.

En la Fig. 2.7 se observan las vistas de la base del espécimen de compresión, donde el área de contacto es variable a medida que se aplica la carga. A carga máxima el área de contacto es

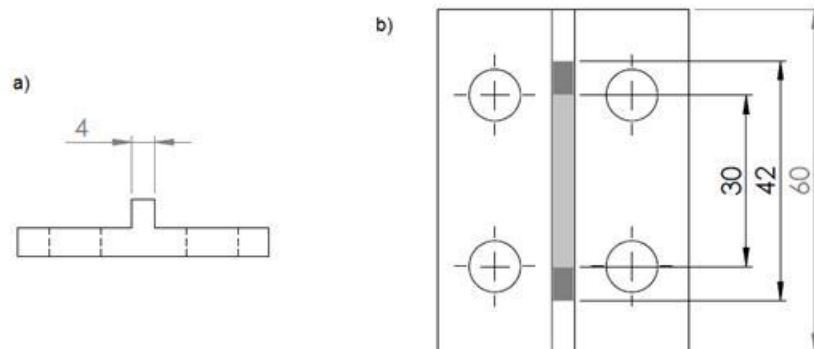


Fig. 2.7. Base del espécimen de compresión. a) vista de planta, y b) vista superior. El sombreado claro indica el área cuando el espécimen no se ha deformado. El sombreado oscuro indica el área del espécimen a máxima deformación

$$A_b = (b)(l_{m\acute{a}x})$$

$$A_b = (4 \text{ mm})(42 \text{ mm})$$

$$A_b = 168 \text{ mm}^2$$

donde:

A_b = área de contacto de la base con el espécimen de compresión.

b = ancho del espécimen de compresión.

$l_{m\acute{a}x}$ = longitud del espécimen con 40% de deformación.

Por lo tanto, es esfuerzo máximo es:

$$S_b = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_b}$$
$$S_b = \frac{49030 \text{ N}}{168 \text{ mm}^2}$$
$$S_b = 291.84 \text{ MPa}$$

donde:

S_b = esfuerzo entre la base y el espécimen de compresión a carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.

De igual manera que para el indente, fabricar la base del espécimen de compresión de acero inoxidable AISI 302 no es posible, por lo que se selecciona el acero aleado AISI-4140, y cuyo factor de seguridad es

$$n_b = \frac{S_y}{S_{mi}} = \frac{655 \text{ MPa}}{291.84 \text{ MPa}}$$
$$n_b = 2.24$$

donde:

n_b = factor de seguridad de la base del espécimen de compresión.

E) SOPORTE LATERAL DEL ESPÉCIMEN DE COMPRESIÓN:

En la Fig. 2.8 se presentan las vistas de uno de los soportes laterales del espécimen de compresión. Utilizando la ecuación de constancia de volumen, Ec 2.1, se puede calcular el área de contacto del soporte lateral con el espécimen de compresión correspondiente a carga máxima, así [4]:

$$V_1 = V_2 = a_1 \cdot b_1 \cdot l_1 = a_2 \cdot b_2 \cdot l_2 \quad (2.1)$$

donde: a_1 , b_1 y l_1 son las dimensiones del espécimen de compresión antes de aplicar la carga, y a_2 , b_2 y l_2 son las dimensiones del espécimen de compresión a carga máxima. Además $b_1 = b_2$ ya que la deformación en la dirección principal 2 es cero.

Entonces:

$$a_1 \cdot l_1 = a_2 \cdot l_2$$

La expresión anterior indica que para el caso de compresión plana, donde la deformación en la dirección principal 2 es considerada cero, el área lateral se mantiene constante desde el inicio hasta el final del ensayo, por lo tanto:

$$\begin{aligned} A_{sl} &= a_1 \cdot l_1 \\ A_{sl} &= (4 \text{ mm})(30 \text{ mm}) \\ A_{sl} &= 120 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

donde:

A_{sl} = área de contacto entre el soporte lateral y el espécimen de compresión.

Los esfuerzos en los soportes laterales, correspondientes a la dirección principal 2 (ver, Fig. 1.1), los cuales se distribuyen entre ambos soportes laterales, así:

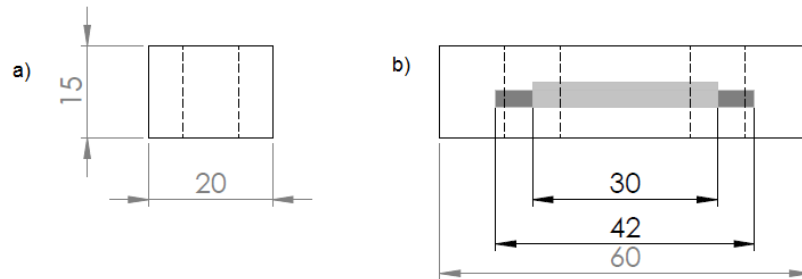


Fig. 2.8. Soporte lateral del espécimen de compresión. a) vista de planta, b) vista lateral. El sombreado claro indica el área del espécimen sin deformación. El sombreado oscuro indica el área del espécimen a deformación máxima.

$$S_{sl} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{2A_{sl}}$$

$$S_{sl} = \frac{49030 \text{ N}}{2(120 \text{ mm}^2)}$$

$$S_{sl} = 204.29 \text{ MPa}$$

donde:

S_{sl} = esfuerzo entre cada soporte lateral y el espécimen de compresión a carga máxima $F_{m\acute{a}x}$.

El esfuerzo resultante en los soportes laterales es inferior al límite de fluencia del acero inoxidable AISI 304, lo que indica que los elementos no se deformarían permanentemente, pero, para minimizar la deformación, se prefiere el uso del acero AISI 4140.

Los soportes laterales serán sujetados con tornillos M8x1.25, que no serán dimensionados por cortante debido a que los soportes laterales se

apoyan en la placa inferior, de modo que la carga se transfiere a la placa inferior, dejando a los tornillos la función de unión de las partes y facilitan el ensamble y desensamble del dispositivo antes y después de realizados los ensayos de compresión plana.

F) CILINDROS Y BARRAS DESLIZANTES:

Estos dos elementos están encargados de guiar a las placas superior e inferior cuando se aplica la carga, garantizando la alineación entre el indentor acoplado a la placa superior y la base junto a soportes laterales del espécimen de compresión acoplados a la placa inferior.

Las superficies en contacto precisan un acabado fino para minimizar la fricción, y para mantener ese acabado se debe seleccionar un material resistencia a la corrosión, y así también minimizar su mantenimiento. Por lo anterior, el material seleccionado para estos elementos es un acero inoxidable AISI 304.

El juego máximo entre estos elementos es de 0.1 mm, valor muy pequeño pero necesario para evitar errores en los ensayos debido a movimientos no deseados del indentor sobre los especímenes. Estos elementos no reciben carga directa.

2.2.2. MATERIALES Y COSTOS DE FABRICACIÓN

En las secciones anteriores se seleccionaron materiales con base a su resistencia mecánica y requisitos de aplicaciones, como lo fueron los aceros

inoxidables y aceros aleados. A continuación se presenta una breve descripción de cada acero seleccionado y sus usos comunes, así:

a) Acero aleado AISI 4140.- Es un acero para maquinaria de medio carbono aleado con cromo y molibdeno de alta templeabilidad y buena resistencia a la fatiga, abrasión e impacto. Este acero puede ser nitrurado para darle mayor resistencia a la abrasión. Es susceptible al endurecimiento por tratamiento térmico. Es utilizado para fabricación de piñones pequeños, tijeras, tornillo de alta resistencia, espárragos, guías, seguidores de leva, ejes reductores, cinceles [8].

b) Acero inoxidable AISI 304.- Es el más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300. Tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado. Se puede usar para aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte. Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas. La resistencia a la corrosión es excelente, resistiendo una amplia variedad de ambientes corrosivos incluyendo productos de petróleo calientes o con vapores de combustión de gases. Sus aplicaciones son muy variadas, se destacan los equipos para procesamiento de alimentos, enfriadores de leche, intercambiadores de calor, contenedores de productos químicos, tanques para de vinos y cervezas, partes para extintores de fuego [8].

c) Acero AISI 1020.- Es un acero fácil de conformar, responde bien al trabajo en frío y al tratamiento térmico de cementación, su soldabilidad es adecuada. Por su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para elementos de maquinaria. Se utiliza mucho en la condición de cementado donde la resistencia al desgaste y el tener un núcleo tenaz es importante. Se

puede utilizar completamente endurecido mientras se trate de secciones muy delgadas. Se puede utilizar para ejes de secciones grandes y que no estén muy esforzados. Otros usos incluyen engranes ligeramente esforzados con endurecimiento superficial, pines endurecidos superficialmente, piñones, cadenas, tornillos, componentes de maquinaria, prensas y levas [8].

Por último, en Tabla 2.1 se presentan los costos totales de materiales y mano de obra para la fabricación del dispositivo de compresión plana. También, se presentan las dimensiones en bruto utilizados en la fabricación de cada elemento del dispositivo de compresión plana y los especímenes de compresión.

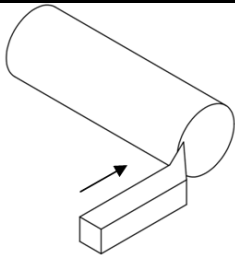
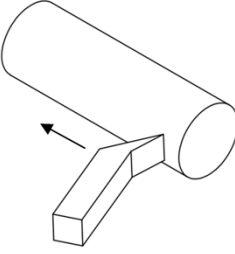
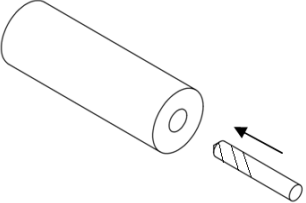
Tabla 2.1. Materiales en bruto para la fabricación de los elementos del dispositivo de compresión plana

Elemento	Cantidad	Material	Dimensiones en bruto	Costo
Placa superior	1	AISI 1020	∅ 6 x 7/8 pulg	\$24.55
Placa inferior	1	AISI 1020	∅ 6 x 1 pulg	\$28.29
Indentor	1	AISI 4140	∅ 60 x 65 mm	\$50.93
Barra deslizante	4	AISI 304	∅ 1 ³ / ₁₆ pulg x 60 mm	\$81.06
Cilindro deslizante	4	AISI 304	∅ 7/8 pulg x 60 mm	\$67.00
Base del espécimen de compresión	1	AISI 4140	∅ 75 mm x 25 mm	\$35.66
Soporte lateral del espécimen de compresión	2	AISI 4140	∅ 25 mm x 65 mm	\$24.96
Especímen de compresión plana	6	Cobre electrolítico	1/4 pulg x 1 pulg x 100 mm	\$19.25
Tornillos M8x1.25	14	-	-	\$4.20
Costo total de materiales = \$335.90				
Costo de fabricación = \$125.00				
Costo total = \$460.90				

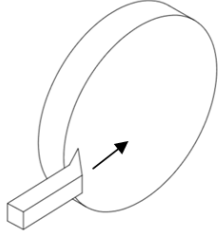
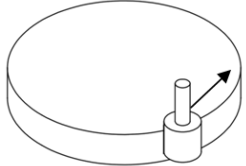
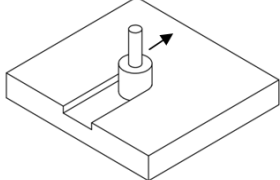
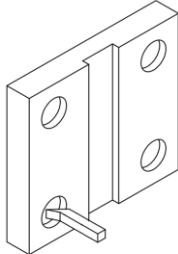
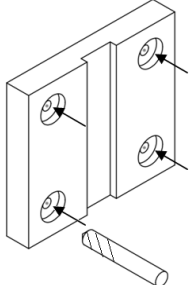
2.3. CONSTRUCCIÓN

En las secciones siguientes se presentan de forma sencilla y gráfica el procedimiento seguido para la fabricación del dispositivo de compresión. Además, en el anexo A se presentan los planos de fabricación en los cuales se puede observar el ensamblaje del dispositivo.

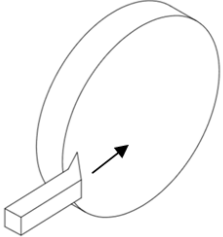
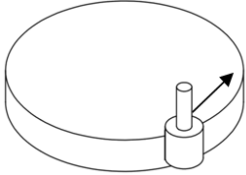
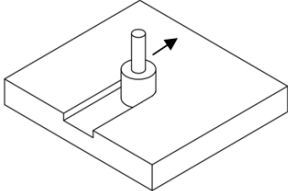
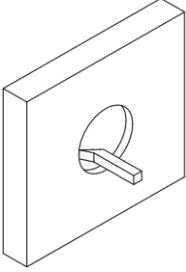
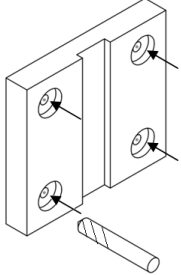
2.3.1. BARRA DESLIZANTE

Operación	Herramienta y equipo	Esquema
<ul style="list-style-type: none">- Montar en el torno.- Refrentar extremos del cilindro.	<ul style="list-style-type: none">- Torno.- Buril.- Calibrador.	
<ul style="list-style-type: none">- Cilindrar hasta 20 mm.	<ul style="list-style-type: none">- Torno.- Buril.- Calibrador.	
<ul style="list-style-type: none">- Taladrar agujero.- Fabricar rosca.	<ul style="list-style-type: none">- Taladro.- Broca de 7 mm.- Machuelo 8x1.25 mm	

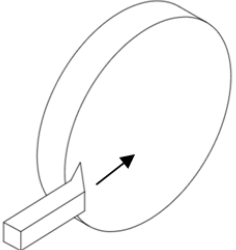
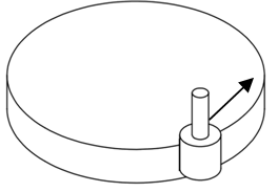
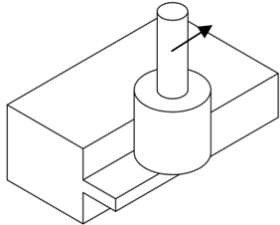
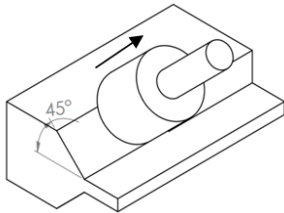
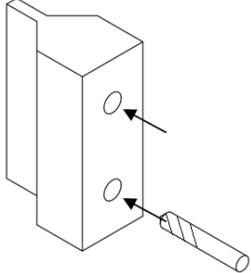
2.3.2. PLACA SUPERIOR

Operación	Herramienta y equipo	Esquema
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Refrentar ambas caras del disco. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno - Buril - Calibrador 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en fresadora. - Fresar a 90° para obtener un rectángulo de 110 x 120 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora - Fresa - Calibrador 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en la fresadora. - Maquinar el canal de 24 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora - Fresa - Calibrador 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Maquinar las cajas de los tornillos. - Maquinar las cajas de los cilindros de \varnothing 30 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno - Buril - Calibrador de interiores 	
<ul style="list-style-type: none"> - Taladrar agujeros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Taladro. - Broca de 8 mm 	

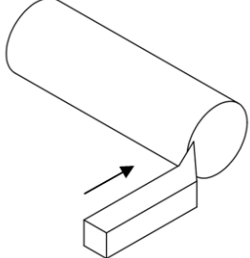
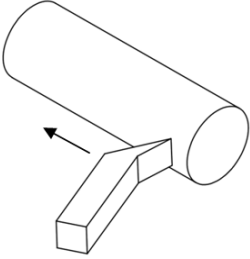
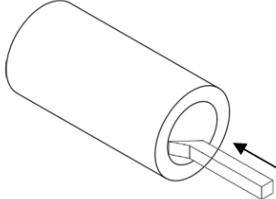
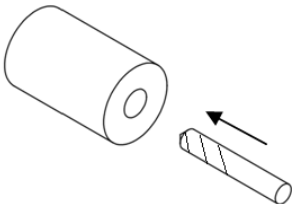
2.3.3. PLACA INFERIOR

Operación	Herramienta y equipo	Esquema
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Refrentar ambas caras del disco. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno. - Buril. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en fresadora. - Maquinar a 90° para obtener un rectángulo de 110 x 120 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora. - Fresa. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en la fresadora. - Maquinar el canal de 44 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora. - Fresa. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Maquinar las cajas de los tornillos. - Maquinar las cajas de las barras de 20 mm. - Maquinar el vaciado inferior de \varnothing 41 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno. - Buril. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Taladrar agujeros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Taladro. - Broca de 8 mm. 	

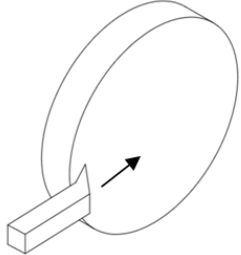
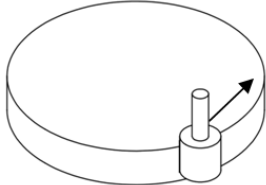
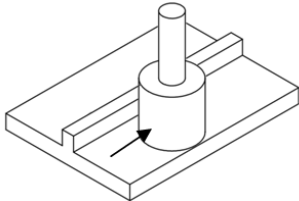
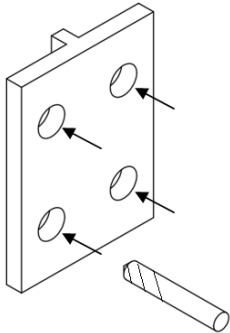
3.3.4. INDENTOR

Operación	Herramienta y equipo	Esquema
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Refrentar ambas caras del disco. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno. - Buril. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en fresadora. - Maquinar a 90° para obtener un rectángulo de 40 x 60 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora. - Fresa. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en la fresadora. - Maquinar hasta obtener la sección a 4 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora. - Fresa. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en la fresadora. - Maquinar a 45° 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora. - Fresa. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Taladrar agujeros. - Fabricar roscas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Taladro. - Broca de 7 mm. - Machuelo 8x1.25 mm. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Pulido semiautomático de la superficie de contacto del indentor con es espécimen de compresión 	<ul style="list-style-type: none"> - Alúmina. - Pulidora con disco de lana. 	

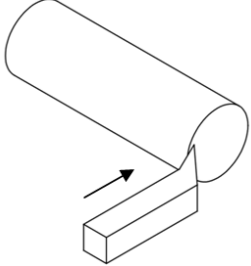
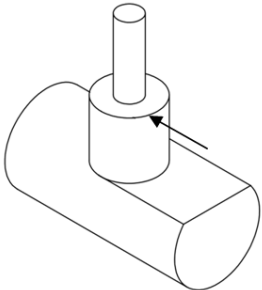
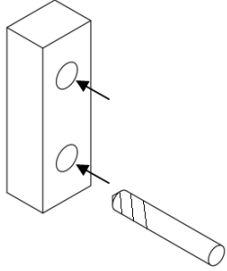
2.3.5. CILINDRO DESLIZANTE

Operación	Herramienta y equipo	Esquema
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Refrentar extremos del cilindro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno. - Buril. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Cilindrar hasta 30 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno. - Buril. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Maquinar agujero de 20 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno. - Buril. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Taladrar agujero de 12 mm. - Fabricar rosca 	<ul style="list-style-type: none"> - Taladro. - Broca de 7 mm. - Machuelo 8 x 1.25mm 	

2.3.6. BASE DEL ESPÉCIMEN DE COMPRESIÓN

Operación	Herramienta y equipo	Esquema
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Refrentar ambas caras del disco. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno. - Buril. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en fresadora. - Maquinar a 90° para obtener un rectángulo 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora. - Fresa. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en la fresadora. - Maquinar horizontalmente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora. - Fresa. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Taladrar agujeros 	<ul style="list-style-type: none"> - Taladro. - Broca de 8mm 	
<ul style="list-style-type: none"> - Pulido semiautomático de la superficie de contacto de la base con el espécimen de compresión 	<ul style="list-style-type: none"> - Alúmina. - Pulidora con disco de lana. 	

2.3.7. SOPORTE LATERAL DEL ESPÉCIMEN DE COMPRESIÓN

Operación	Herramienta y equipo	Esquema
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en el torno. - Refrentar extremos del cilindro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torno. - Buril. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Montar en fresadora. - Maquinar a 90° para obtener un rectángulo de 15x20 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fresadora. - Fresa. - Calibrador. 	
<ul style="list-style-type: none"> - Taladrar agujeros - Fabricar rosca 	<ul style="list-style-type: none"> - Taladro. - Broca de 7 mm. - Machuelo 8 x 1.25mm 	
<ul style="list-style-type: none"> - Pulidos semiautomático de la superficie de contacto del soporte con el espécimen de compresión 	<ul style="list-style-type: none"> - Alúmina. - Pulidora con disco de lana. 	

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANA

En el marco teórico se expuso la teoría acerca de los ensayos de compresión plana, donde la deformación en uno de las direcciones principales es cero. También, en el capítulo de diseño se dimensionaron los especímenes de compresión esperando un alargamiento o porcentaje de trabajo en frío de 40%, cuando la máquina entrega la carga máxima de 5 T.

En términos prácticos, cuando se ejecutan ensayos de compresión plana existe deformación en todas las direcciones, incluyendo deformación lateral, o en la dirección 2, el cual en el diseño se consideró como cero. Así, estas deformaciones serán determinadas con la primera serie de ensayos.

Se presentan ensayos a carga máxima, para determinar la deformación máxima real que se puede obtener en los ensayos, debido a que, como se verá más adelante, la máquina de ensayos de tracción - compresión no está trabajando a su capacidad máxima.

Después de calcular la deformación lateral y el alargamiento máximo, se presenta una segunda serie de ensayos con el fin de elaborar las curvas de esfuerzo - deformación para el cobre electrolítico.

3.1. DETERMINACIÓN DE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA

La primera serie de ensayos fue pensado para determinar la deformación máximo que sufren los especímenes de compresión a carga máxima y para comprobar y mejorar la metodología para los ensayos.

La lectura en el manómetro acoplado a la bomba hidráulica indica la presión del fluido hidráulico, convertida por el cilindro hidráulico en una fuerza que se transfiere de la máquina de ensayos, al dispositivo de compresión y finalmente a al espécimen de compresión. Por lo tanto, se puede calcular la fuerza aplicada y el esfuerzo real en el espécimen de compresión utilizando la Ec. 3.1, así:

$$P_{ch} = \frac{F_{ci}}{A_{ch}} \quad (3.1)$$
$$F_{ch} = (P_{ch})(A_{ch})$$

donde:

P_{ch} = presión en el cilindro hidráulico en MPa, leída en el manómetro,

A_{ch} = Área interna del cilindro hidráulico en mm^2 , y

F_{ch} = Fuerza entregada por el cilindro hidráulico en N.

Nótese que el área interna del cilindro hidráulico, A_{ch} , es constante y es un valor de diseño del mismo, igual a 638.7 mm^2 [3]. Entonces la ecuación para calcular la fuerza entregada por el cilindro hidráulico, Ec. 3.2, es:

$$F_{ch} = 638.7P_{ch} \text{ [N]} \quad (3.2)$$

Siguiendo los pasos del manual de uso del dispositivo, se realizaron cinco ensayos con el fin de calcular la deformación máxima de los especímenes de compresión y la carga máxima entregada por la máquina. Los resultados se presentan en la Tabla 3.1, donde la deformación vertical leída en el extensómetro es Δv (no confundir con la deformación nominal vertical) y el porcentaje de alargamiento se calcula como en la Ec. 1.5.

Tabla 3.1. Resultados de la primera serie de ensayos para obtener la deformación máxima.

Δ_v , mm	P_{ch}		F_{ch} , N	% de alargamiento	ϵ_2 , mm/mm
	psi	MPa			
0.52	6500	44.83	28633	9.88	0.0343
0.60	6500	44.83	28633	9.16	0.0370
0.43	6500	44.83	28633	9.35	0.0167
0.62	6500	44.83	28633	4.84	0.0224
0.28	6500	44.83	28633	5.95	0.0393

En cada uno de los ensayos, la presión máxima que entregó la bomba hidráulica fue ~6500 psi, lo que se traduce en una fuerza de 28627 N, que es el 59% de la carga que debería entregar el cilindro hidráulico. Por lo anterior, el porcentaje de alargamiento es inferior respecto al valor de diseño.

Los porcentajes de alargamiento y la deformación vertical tienen una variación debido a pequeñas diferencias en las dimensiones de los especímenes de compresión porque algunos de ellos se lijaron más de lo deseable para obtener el acabado superficial requerido. La deformación lateral del espécimen varió de 0.0167 a 0.0393 m/mm lo que se traduce en una deformación máxima de 3.93 %.

3.2. CURVAS DE ESFUERZO - DEFORMACIÓN

En la segunda serie de ensayos, se deformaron seis especímenes de compresión. Se presentan tablas con los resultados, y posteriormente se presentan las curvas esfuerzo - deformación. Utilizando las Ecs. 1.1-1.2, 2.2 y 3.2 se calculan: la fuerza aplicada, esfuerzos y deformaciones reales para cada punto.

Tabla 3.2. Segundo grupo de especímenes, primer ensayo.

Δ_v , mm	P_{ch}		F_{ch} , N	$\epsilon_3 \times 10^{-3}$, mm/mm	S, MPa
	psi	MPa			
0	0	0	0	0	0
0.03	500	3.45	2203.5	7.56	17.92
0.05	1000	6.90	4407.0	12.66	35.67
0.07	1500	10.34	6604.2	17.81	53.18
0.08	2000	13.79	8807.7	20.41	70.74
0.11	2500	17.24	11011.2	28.28	87.76
0.13	3000	20.69	13214.7	33.59	104.78
0.14	3500	24.14	15418.2	36.27	121.94
0.17	4000	27.59	17621.7	44.39	138.28
0.19	4500	31.03	19818.9	49.87	151.71
0.22	5000	34.48	22022.4	58.20	170.56
0.25	5500	37.93	24225.9	66.67	186.13
0.28	6000	41.38	26429.4	75.27	201.44
0.31	6500	44.83	28632.9	84.01	216.47

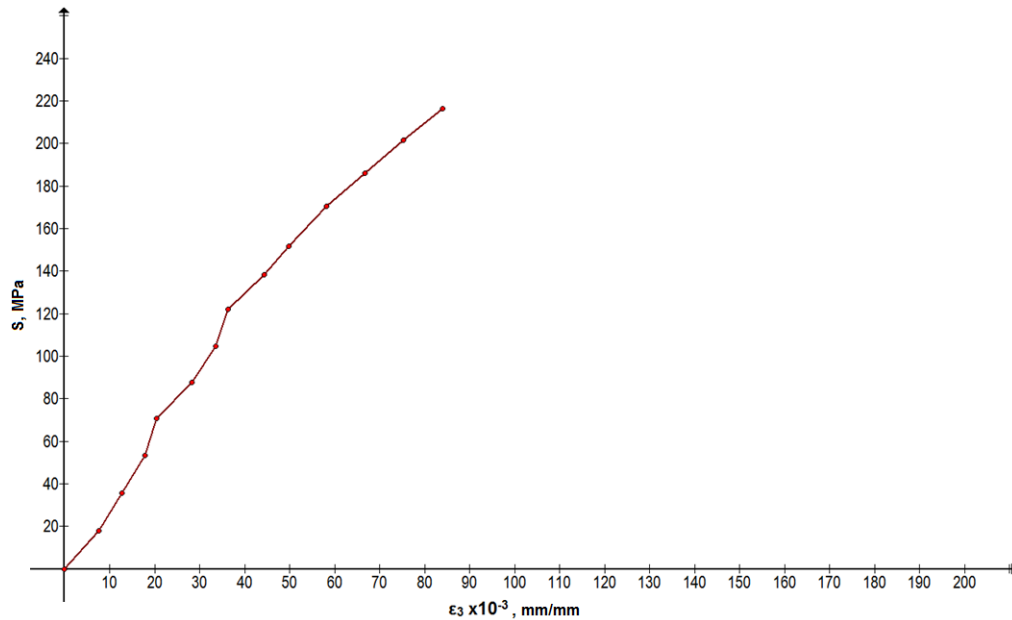


Fig. 3.1. Curva esfuerzo - deformación del primer espécimen ensayado.

Tabla 3.3. Segundo grupo de especímenes, segundo ensayo.

Δ_v , mm	P_{ch}		F_{ch} , N	$\epsilon_3 \times 10^{-3}$, mm/mm	S, MPa
	psi	MPa			
0	0	0	0	0	0
0.06	500	3.45	2203.5	15.23	17.96
0.12	1000	6.90	4407.0	30.93	35.36
0.14	1500	10.34	6604.2	36.27	52.72
0.16	2000	13.79	8807.7	41.67	69.95
0.18	2500	17.24	11011.2	47.12	86.99
0.23	3000	20.69	13214.7	61.01	103.03
0.25	3500	24.14	15418.2	66.67	119.58
0.28	4000	27.59	17621.7	75.27	135.57
0.33	4500	31.03	19818.9	89.92	145.59
0.37	5000	34.48	22022.4	101.9	165.33
0.41	5500	37.93	24225.9	114.2	179.87
0.45	6000	41.38	26429.4	126.8	194.04
0.49	6500	44.83	28632.9	139.6	207.85

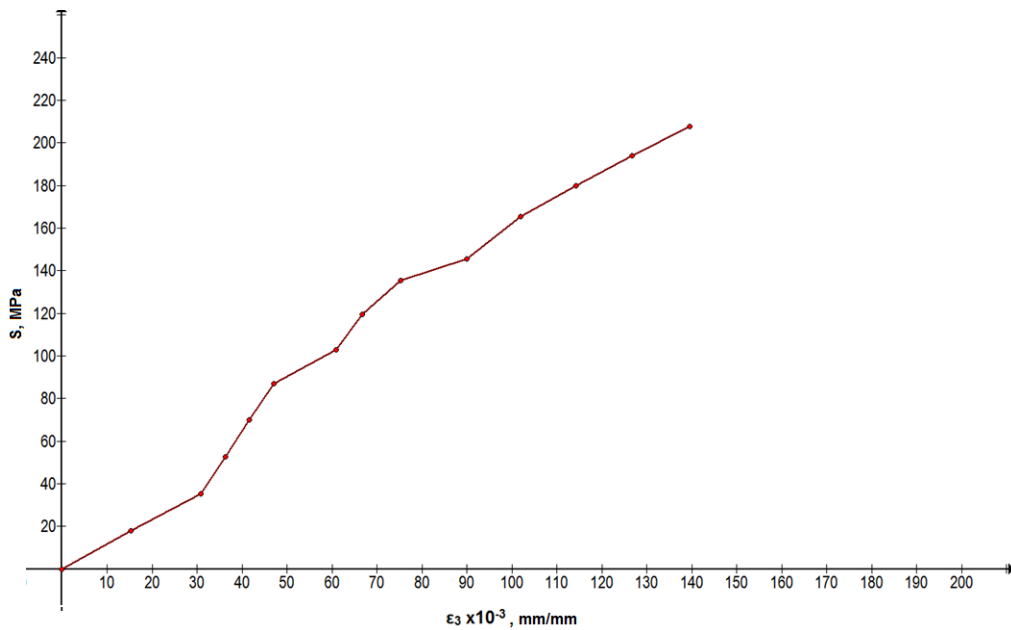


Fig. 3.2. Curva esfuerzo - deformación del segundo espécimen ensayado.

Tabla 3.4. Segundo grupo de especímenes, tercer ensayo.

Δ_v , mm	P_{ch}		F_{ch} , N	$\epsilon_3 \times 10^{-3}$, mm/mm	S , MPa
	psi	MPa			
0	0	0	0	0	0
0.01	500	3.45	2203.5	2.53	18.49
0.02	1000	6.90	4407.0	5.08	36.90
0.03	1500	10.34	6604.2	7.63	55.16
0.05	2000	13.79	8807.7	12.79	73.19
0.07	2500	17.24	11011.2	17.99	91.03
0.08	3000	20.69	13214.7	20.62	108.97
0.10	3500	24.14	15418.2	25.91	126.48
0.12	4000	27.59	17621.7	31.25	143.81
0.15	4500	31.03	19818.9	39.37	160.48
0.18	5000	34.48	22022.4	47.62	176.91
0.21	5500	37.93	24225.9	56.00	193.07
0.24	6000	41.38	26429.4	64.52	208.95
0.29	6500	44.83	28632.9	79.02	223.32

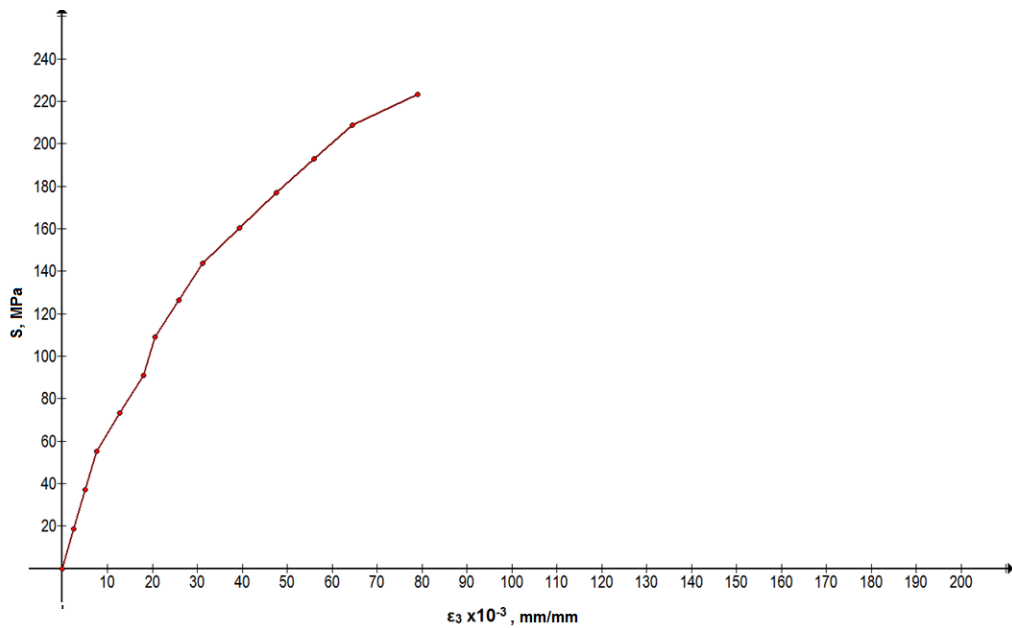


Fig. 3.3. Curva esfuerzo - deformación del tercer espécimen ensayado.

Tabla 3.5. Segundo grupo de especímenes, cuarto ensayo.

Δ_v , mm	P_{ch}		F_{ch} , N	$\epsilon_3 \times 10^{-3}$, mm/mm	S , MPa
	psi	MPa			
0	0	0	0	0	0
0.01	500	3.45	2203.5	2.55	18.75
0.03	1000	6.90	4407.0	7.69	37.30
0.06	1500	10.34	6604.2	15.50	55.46
0.09	2000	13.79	8807.7	23.44	73.40
0.11	2500	17.24	11011.2	28.80	91.28
0.13	3000	20.69	13214.7	32.21	108.97
0.16	3500	24.14	15418.2	42.44	126.13
0.19	4000	27.59	17621.7	50.80	143.01
0.22	4500	31.03	19818.9	59.93	159.55
0.27	5000	34.48	22022.4	73.77	174.89
0.30	5500	37.93	24225.9	82.64	190.81
0.35	6000	41.38	26429.4	97.76	205.29
0.40	6500	44.83	28632.9	113.31	219.29

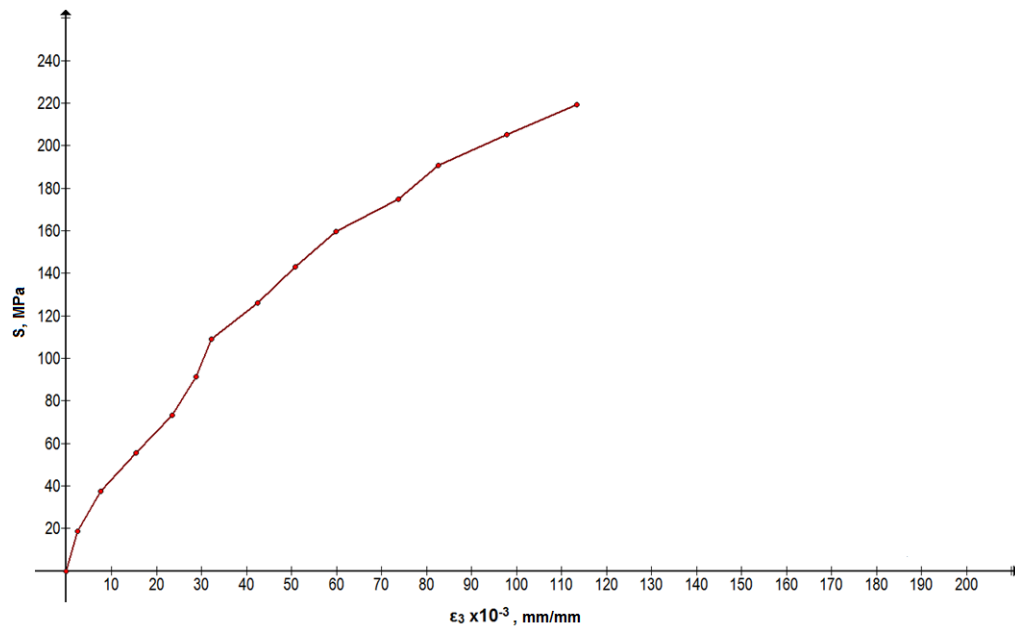


Fig. 3.4. Curva esfuerzo - deformación del cuarto espécimen ensayado.

Tabla 3.6. Segundo grupo de especímenes, quinto ensayo.

Δ_v , mm	P_{ch}		F_{ch} , N	$\epsilon_3 \times 10^{-3}$, mm/mm	S, MPa
	psi	MPa			
0	0	0	0	0	0
0.06	500	3.45	2203.5	15.50	18.29
0.12	1000	6.90	4407.0	31.50	36.02
0.17	1500	10.34	6604.2	45.21	53.27
0.21	2000	13.79	8807.7	56.45	70.28
0.26	2500	17.24	11011.2	70.84	86.69
0.29	3000	20.69	13214.7	79.67	103.18
0.33	3500	24.14	15418.2	91.67	119.07
0.38	4000	27.59	17621.7	107.04	134.19
0.43	4500	31.03	19818.9	122.85	148.80
0.48	5000	34.48	22022.4	139.13	162.98
0.56	5500	37.93	24225.9	166.17	175.13
0.60	6000	41.38	26429.4	180.18	188.79
0.65	6500	44.83	28632.9	198.17	201.46

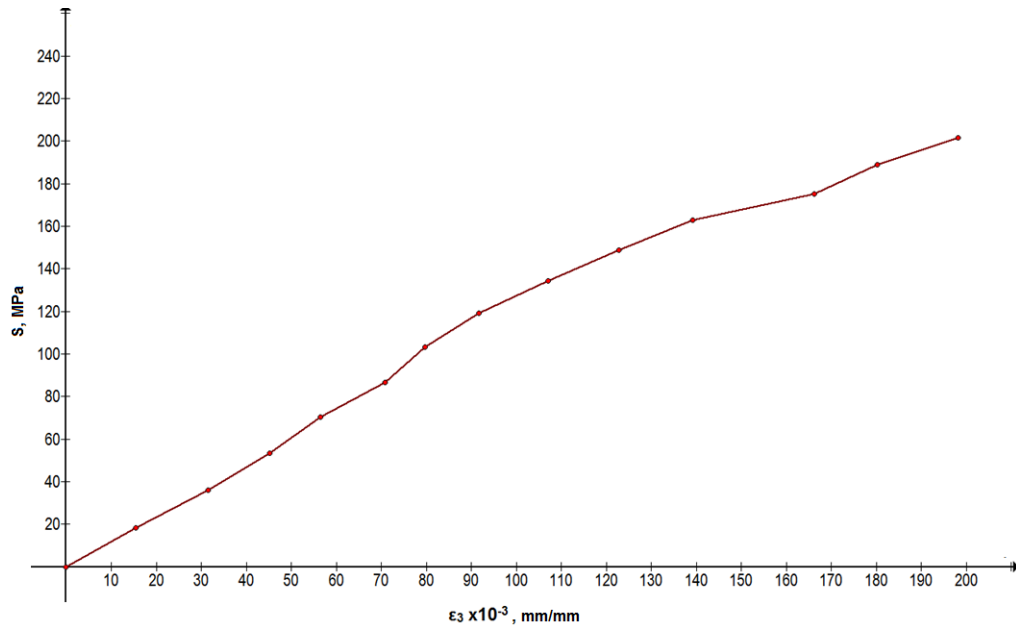


Fig. 3.5. Curva esfuerzo - deformación del quinto espécimen ensayado.

Tabla 3.7. Segundo grupo de especímenes, sexto ensayo.

Δ_v (mm)	P_{ch}		F_{ch} (N)	$\epsilon_3 \times 10^{-3}$ (mm/mm)	S (MPa)
	psi	MPa			
0	0	0	0	0	0
0.01	500	3.45	2203.5	2.57	18.82
0.04	1000	6.90	4407.0	10.36	37.35
0.08	1500	10.34	6604.2	20.94	55.39
0.13	2000	13.79	8807.7	34.48	72.90
0.17	2500	17.24	11011.2	45.58	90.17
0.19	3000	20.69	13214.7	51.21	107.64
0.21	3500	24.14	15418.2	56.91	124.91
0.24	4000	27.59	17621.7	65.57	141.60
0.27	4500	31.03	19818.9	74.38	157.95
0.30	5000	34.48	22022.4	83.33	174.06
0.35	5500	37.93	24225.9	98.59	188.81
0.38	6000	41.38	26429.4	107.95	204.25
0.42	6500	44.83	28632.9	120.69	218.76

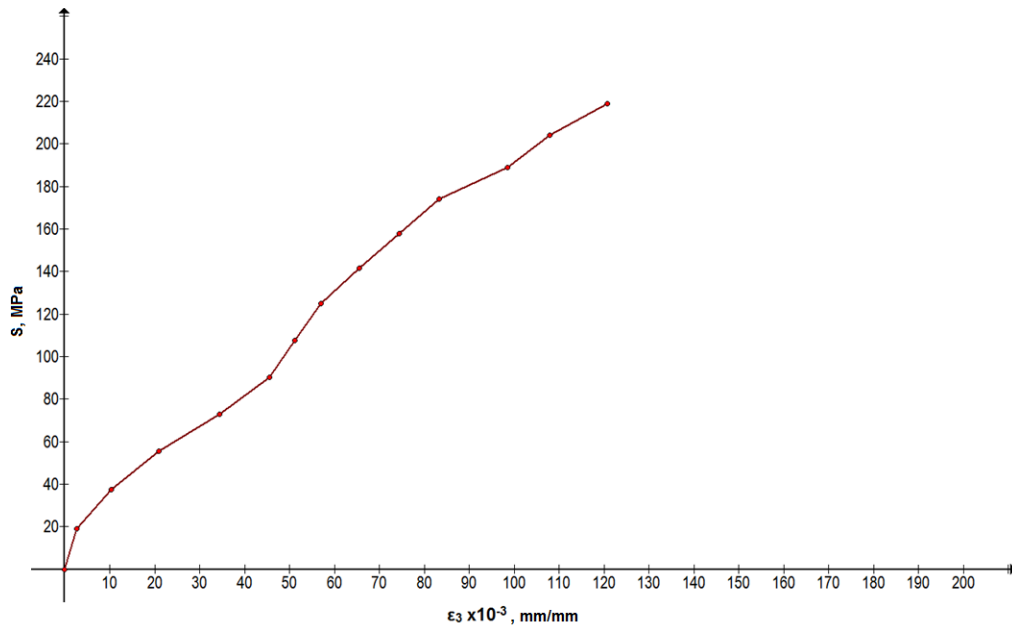


Fig. 3.6. Curva esfuerzo - deformación del sexto espécimen ensayado.

En la Fig. 3.7 se observa la superposición de las curvas esfuerzo - deformación de los ensayos realizados. Nótese que las curvas de los ensayos

tienen tendencias similares, excepto por la curva del ensayo cinco. Además, las curvas aparentan un leve desplazamiento en la horizontal, esto debido a que cuando se configuró el extensómetro, el punto de partida del ensayo no siempre fue el mismo, por lo tanto, las lecturas de extensómetro afectan los valores calculados de deformación ϵ_3 , y en cierta medida afectan los valores calculados correspondientes a los esfuerzos.

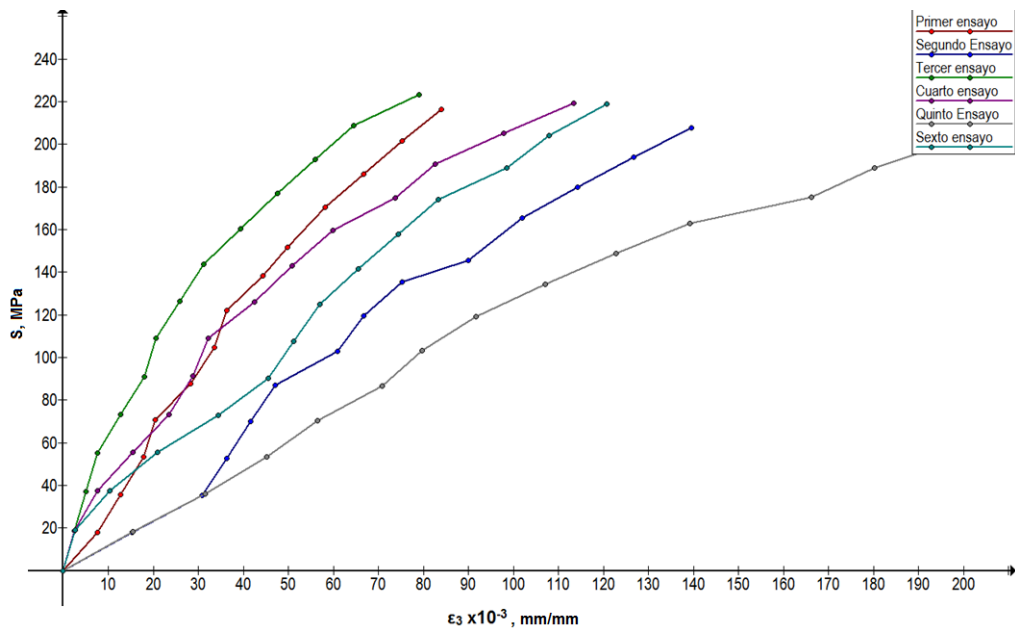


Fig. 3.7. Superposición de las curvas esfuerzo - deformación.

4. MANUALES DE USO Y MANTENIMIENTO

En este capítulo se presentan los procedimientos para realizar los ensayos de compresión plana con el dispositivo diseñado y construido en el presente trabajo, el cual se acopla a una máquina de tracción - compresión ubicada en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de esta Escuela de Ingeniería Mecánica. Para ello, la manipulación adecuada del dispositivo, del equipo hidráulico de la máquina de ensayos y el extensómetro garantizan que los resultados de los ensayos sean los esperados.

El mantenimiento preventivo y regular que se pueda realizar al dispositivo se traducirá en un alargamiento de la vida útil para cada uno de sus elementos, así, se continúa con el manual de mantenimiento del dispositivo de compresión plana.

4.1 MANUAL DE USO

Antes de realizar los ensayos de compresión plana, se deben revisar el manual de mantenimiento de la máquina de ensayos tracción - compresión y el manual de mantenimiento del dispositivo de compresión plana.

Al terminar el mantenimiento requerido, se pueden iniciar los ensayos de compresión plana. Así, el procedimiento es el siguiente:

1. Verificar el acabado del espécimen a ensayar y anotar sus dimensiones.
2. Colocar el espécimen en el canal del dispositivo, asegurándose de que quede centrado (ver, Fig. 4.1).

3. Ensamblar el dispositivo de compresión, verificando que las marcas coincidan en ambos sub ensambles, superior e inferior (ver, Fig. 4.2).
4. Verificar que el cilindro hidráulico esté completamente retraído, que la válvula de alivio de la bomba esté completamente cerrada y que el asiento semiesférico para los ensayos de compresión esté lubricado.
5. Acoplar el dispositivo a la máquina, colocándolo sobre el asiento semiesférico (ver, Fig. 4.3).
6. Extender el cilindro hidráulico lentamente hasta que la placa superior toque levemente el soporte de la máquina. Mover el dispositivo para que se alinee correctamente.
7. Instalar el extensómetro y colocar sus contactos entre la placa superior e inferior del dispositivo y definir el punto de inicio. Para más detalles, ver el manual del extensómetro y la Fig. 4.4.
8. Anotar los valores de la presión hidráulica y la deformación vertical leídos en el manómetro y el extensómetro.
9. Accionar la bomba de modo que la presión aumente a razón aproximada de 50 psi por segundo. Aumentar la presión a intervalos de 500 Psi y esperar de 30 a 45 segundos para aumentarla nuevamente.
10. Repetir los pasos 8 y 9 hasta llegar a la presión máxima entregada por la máquina.
11. Retirar el extensómetro.
12. Abrir lentamente la válvula de alivio de la bomba y desacoplar el dispositivo de compresión plana.
13. Desenroscar los 4 tornillos cónicos que sujetan los soportes laterales del espécimen a la placa inferior (ver, Fig. 4.5).

14. Remover el espécimen ensayado. Si el espécimen está muy ajustado, golpear suavemente los soportes laterales con un material blando hasta que sea liberado (ver, Fig. 4.6).
15. Limpiar la base y los soportes laterales del espécimen y atornillarlos nuevamente a la placa inferior.

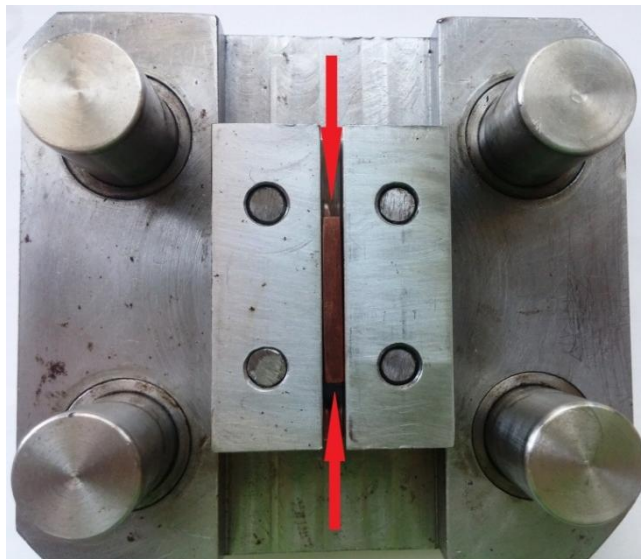


Fig. 4.1. Espécimen de compresión correctamente colocado en el dispositivo de compresión plana.



Fig. 4.2. Dispositivo de compresión ensamblado. Las marcas deben coincidir para que los elementos se alineen correctamente.

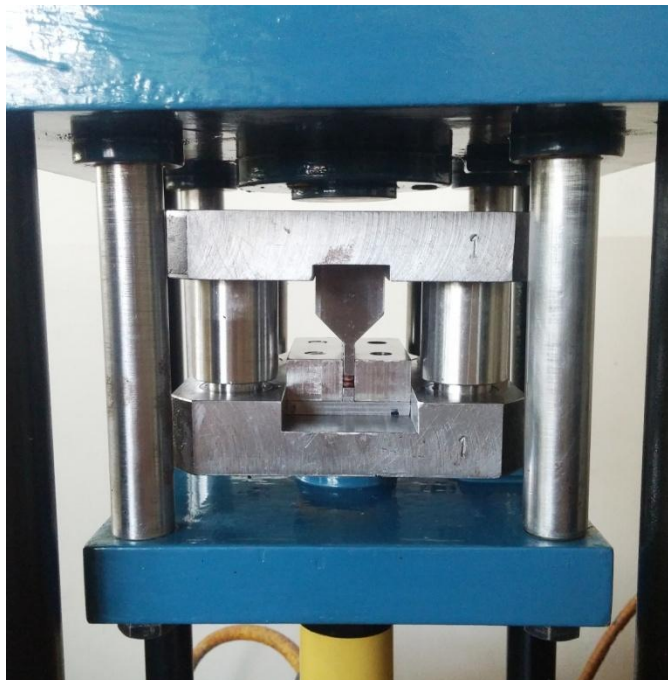


Fig. 4.3. Dispositivo de compresión acoplado a la máquina de ensayos de tracción - compresión.



Fig. 4.4. Extensómetro instalado y configurado para iniciar el ensayo de compresión plana.

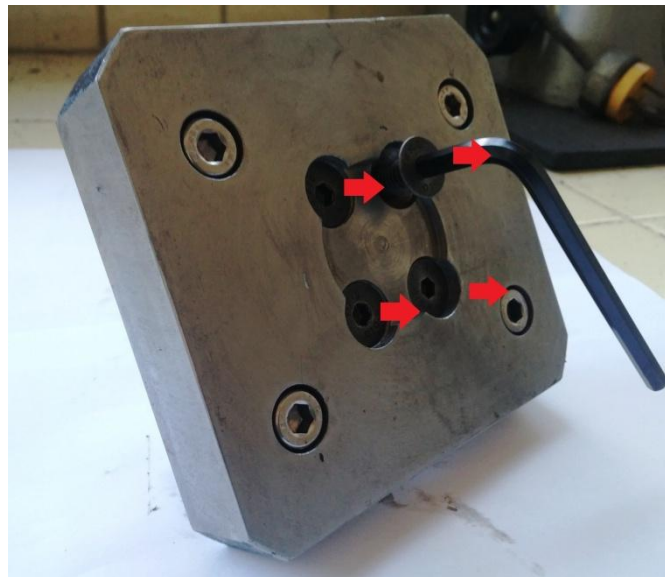


Fig. 4.5. Extracción de los tornillos cónicos para remover los soportes laterales del espécimen.

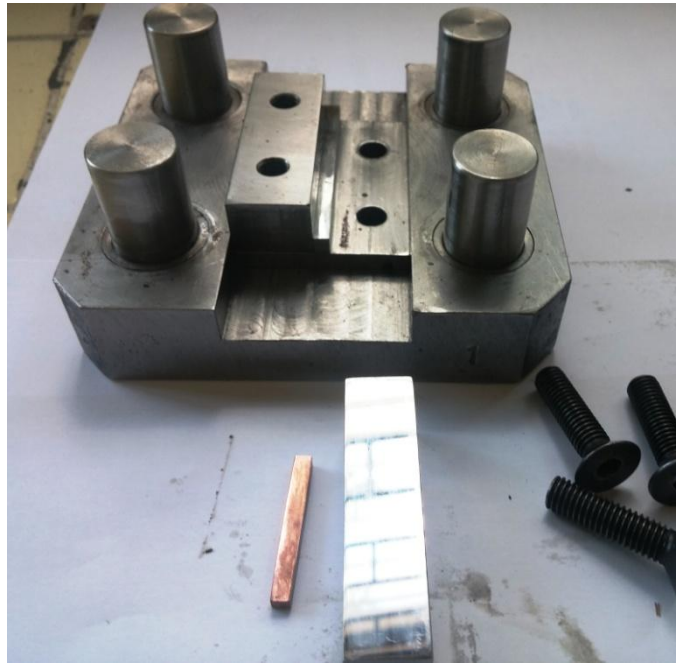


Fig. 4.6. Espécimen de compresión plana después de ser ensayado.

4.2. MANTENIMIENTO

La presente guía de mantenimiento se base principalmente en el mantenimiento preventivo para el dispositivo de compresión, que consiste en la ejecución de una serie de acciones con el objetivo de que el dispositivo se conserve en buenas condiciones, y en circunstancias ideales no sea necesario el reemplazo de ningún elemento a corto plazo.

El uso adecuado del dispositivo de compresión es un factor significativo para que los elementos se conserven en buenas condiciones, lo que hace importante que el manual de uso del dispositivo sea revisado y que cuando se realicen ensayos de compresión plana se sigan sus pasos como se describieron en la sección anterior.

El dispositivo de compresión posee una construcción robusta y sencilla, posee pocos elementos y solamente se pueden considerar elementos móviles como las barras deslizantes y los cilindros deslizantes. Los demás elementos deben ser protegidos del ambiente y cuidar sus acabados.

Por lo tanto, se plantean tres momentos para realizar el mantenimiento, que son: previo a ejecutar una serie de ensayos, posterior a la ejecución de ensayos y mantenimiento mensual, lo cual se detallados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Programa de mantenimiento del dispositivo de compresión plana.

MANTENIMIENTO	ACTIVIDAD
Previo a los ensayos	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar el acabado de las superficies en contacto con el espécimen de compresión: indentor, base y soportes laterales del espécimen. Si están rayadas u opacas, pulir con alúmina sobre un plato giratorio con paño afelpado, y en la dirección de la deformación. • Aplicar una fina película lubricante en las barras y cilindros deslizantes con WD-40.
Posterior a los ensayos	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar una fina capa lubricante a todos los elementos del dispositivo de compresión para minimizar el deterioro de las superficies no resistentes a la corrosión. • Almacenar en un lugar libre de polvo y humedad.
Mensual	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar el estado de los elementos del dispositivo. • Si existe corrosión en las placas, removerla con lija grado 600. • Si existe corrosión en las superficies pulidas del indentor, base o soportes laterales del espécimen, lijar suavemente con lija grado 1200 y después pulir con alúmina sobre un plato giratorio con paño afelpado, y en la dirección de la deformación. • Aplicar una fina capa lubricante a todos los elementos del dispositivo de compresión. • Almacenar el dispositivo de compresión plana en un lugar libre de polvo y humedad.

CONCLUSIONES

Habiendo finalizado el presente trabajo de graduación sobre el diseño y construcción de un dispositivo de compresión plana acoplado a una máquina de ensayos de tracción se puede concluir:

- ✓ El diseño del dispositivo de compresión se realizó aplicando los conceptos básicos del conformado de metales por trabajo en frío, que son el estado de esfuerzos y deformaciones en compresión plana. Además, el dispositivo de compresión fue diseñado de forma tal que si la potencia del equipo hidráulico y la máquina de ensayos aumenta a ~10 T, este pueda soportar mayores cargas y esfuerzos sin que la integridad de sus elementos se vea comprometida.
- ✓ La bibliografía que aborde la compresión plana y los equipos para realizar ensayos son escasos y las normativas para realizar ensayos y especímenes de compresión prácticamente inexistentes, por lo que las bases teóricas de compresión plana presentadas en este trabajo pueden servir como punto de partida para una investigación más profunda, que incluya más materiales y donde se involucren otras variables, como la fricción y efectos de temperatura en compresión plana.
- ✓ Los ensayos de compresión plana se realizaron exitosamente, obteniendo resultados aceptables del comportamiento del cobre electrolítico, teniendo pequeñas diferencias entre los cálculos realizados en la etapa de diseño y resultados obtenidos en los ensayos, como lo son pequeñas deformaciones laterales consideradas cero en etapa de diseño y porcentaje de alargamiento menor al calculado.

- ✓ En los ensayos de compresión plana para realizados los porcentajes de alargamiento calculados en el capítulo de diseño, se vieron limitados debido a que la máquina de ensayos de tracción no entrega su potencia máxima. En ensayos posteriores, y con la potencia adecuada, se podrán obtener curvas de esfuerzo - deformación más amplia y de la misma forma conocer el comportamiento del cobre electrolítico a deformaciones mayores.
- ✓ Siendo el dispositivo de compresión plana un elemento didáctico, se elaboró una guía de laboratorio donde nuevamente se presenta los conceptos básicos aplicados en compresión plana y que se espera se comprendan correctamente cuando los ensayos sean realizados y elaboradas las curvas de esfuerzo - deformación.

RECOMENDACIONES

Como resultado de la finalización del trabajo de graduación, a continuación se presentan algunas recomendaciones:

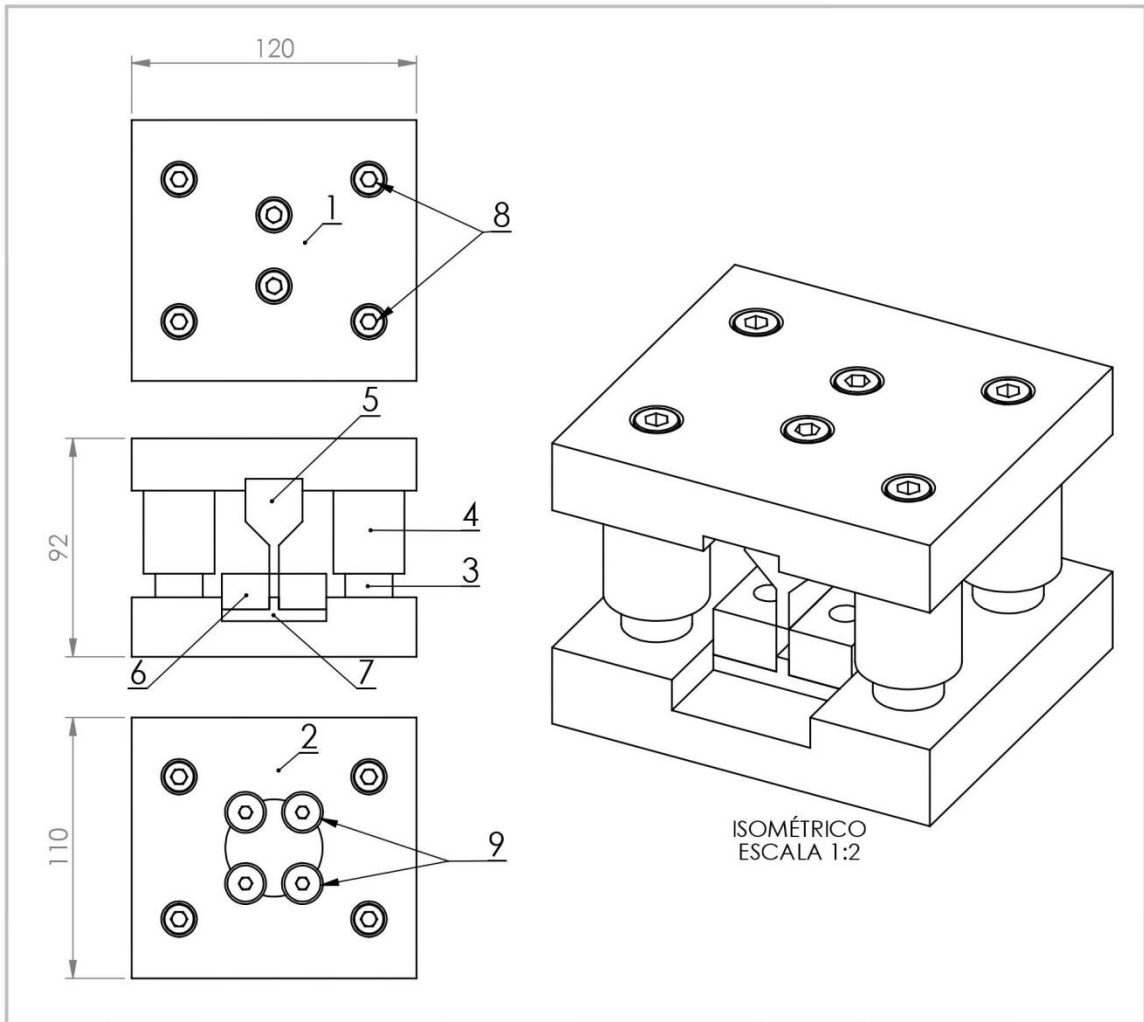
- ✓ Se recomienda realizar el mantenimiento del dispositivo de compresión y la máquina de ensayos de tracción tal y como se describe en sus guías de mantenimiento. Como todo elemento expuesto al ambiente, el dispositivo de compresión plana y la máquina de ensayos de tracción se deterioran con el tiempo si a estos no se les da el mantenimiento adecuado. El dispositivo de compresión posee elementos de acero inoxidable, lo que reduce el mantenimiento pero esto no significa que pueda dejarse en abandono mientras no sea utilizado.
- ✓ Se recomienda realizar más ensayos en cobre electrolítico y otros materiales blandos como el aluminio puro con el fin de verificar los resultados y extender el uso del dispositivo. Algunas variables a tomar en consideración son la velocidad con que se aplica la carga, el acabado superficial del espécimen, temperatura, lubricación y fricción.
- ✓ Con el fin de evitar obtener resultados erróneos en los ensayos de compresión plana se recomienda revisar los pasos del procedimiento de los ensayos previamente, leer los manuales de los instrumentos de medición, y dar el mantenimiento previo a los ensayos al dispositivo. La manipulación adecuada del equipo no solo se traduce en resultados correctos en los ensayos, sino en la conservación del equipo.

REFERENCIAS

- [1] Smith, William F. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México. Editorial McGraw-Hill. 4ta Edición.
- [2] Askeland, D. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México: International Thomsom Editores. 3ra Edición.
- [3] Jácome, L. y Rivas, C. (2009). *Diseño y construcción de un dispositivo para realizar ensayos de compresión plana tipo Ford a temperaturas moderadas*. Venezuela. Universidad central de venezuela.
- [4] Alting, Leo (1996). *Procesos para ingeniería de manufactura*. México. Alfaomega. 3ra Edición.
- [5] Beer, Feer, Johnston, DeWolf, Mazurek. (2009). *Mecánica de materiales*. México. Editorial McGraw-Hill. 5ta Edición.
- [6] Groover, Mikell P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico. Editorial McGraw-Hill. 3ra Edición.
- [7] Campos, J., Chavez, M. y Muñoz, C. (2001). *Diseño y construcción de una máquina para pruebas de tensión y compresión en materiales*. El Salvador. Universidad de El Salvador.
- [8] Abasteinsa. *Hojas técnicas de materiales*. El Salvador. San salvador.
- [9] Budynas, Richard G. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México. México D.F. Editorial McGraw Hill. Octava Edición.

ANEXOS

ANEXO A: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO DE COMPRESIÓN PLANA



9	Tornillo cabeza cónica M8x1.25x30	4	-
8	Tornillo cabeza hexagonal hueca M8x1.25x25	10	-
7	Base del espécimen de compresión	1	Acero AISI 4140
6	Soporte lateral del espécimen de compresión	1	Acero AISI 4140
5	Indentor	1	Acero AISI 4140
4	Cilindro deslizante	4	Acero AISI 304
3	Barra deslizante	4	Acero AISI 304
2	Placa inferior	1	Acero AISI 1020
1	Placa superior	1	Acero AISI 1020
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN: DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
PARA DEFORMACIÓN PLANA ACOPLADO
A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN

Escala:
1:3

PRESENTADO POR : Ever Esaú Martínez Sánchez
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc Jonathan Antonio Berríos Ortiz

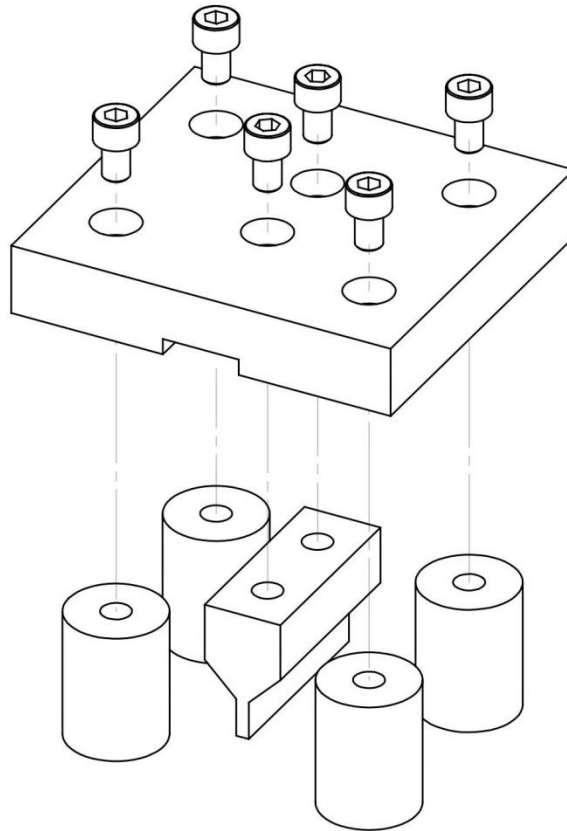
Fecha:
11/2016

Unidades:
Milímetros

CONJUNTO: DISPOSITIVO DE COMPRESIÓN PLANA

Plano:
1/8





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE GRADUACION: DISEÑO Y
 CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
 PARA DEFORMACIÓN PLANA ACOPLADO
 A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN

Escala:
 1:2

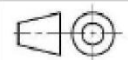
ESTUDIANTE : Ever Esaú Martínez Sánchez
 DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc Jonathan Antonio Berrios Ortiz

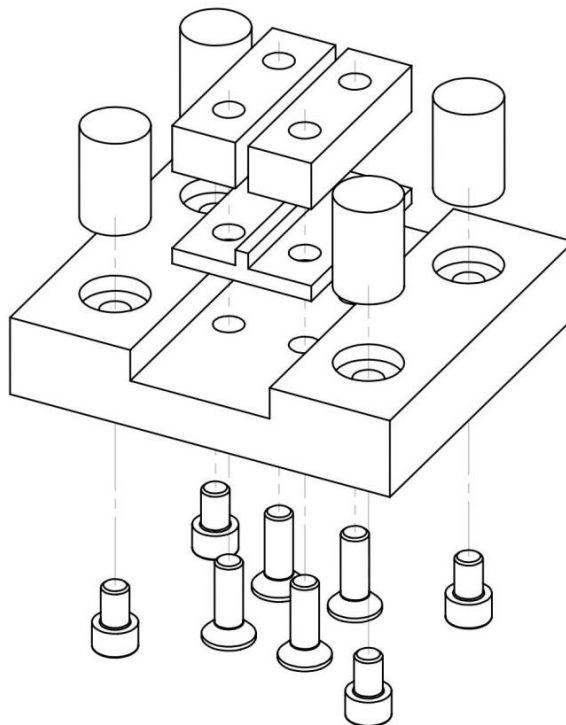
Fecha:
 11/2016

Unidades:
 Milímetros

SUBCONJUNTO 1: ENSAMBLAJE SUPERIOR

Plano:
 2/8





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE GRADUACION: DISEÑO Y
 CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
 PARA DEFORMACIÓN PLANA ACOPLADO
 A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN

Escala:
 1:2

ESTUDIANTE : Ever Esaú Martínez Sánchez
 DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc Jonathan Antonio Berrios Ortiz

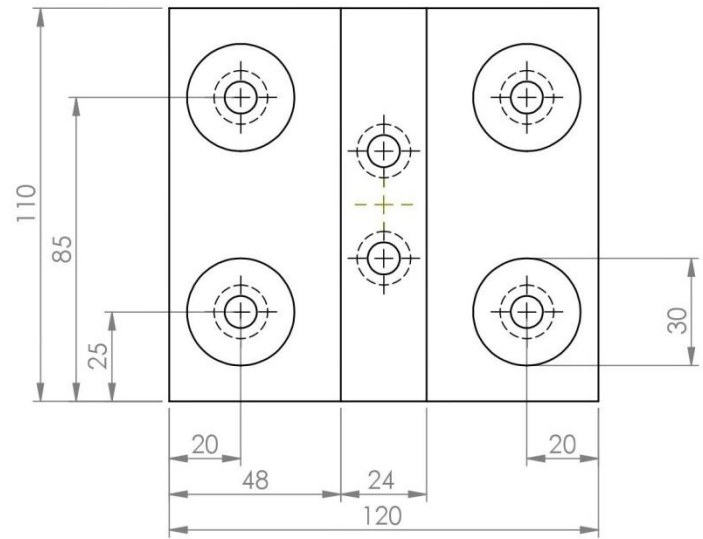
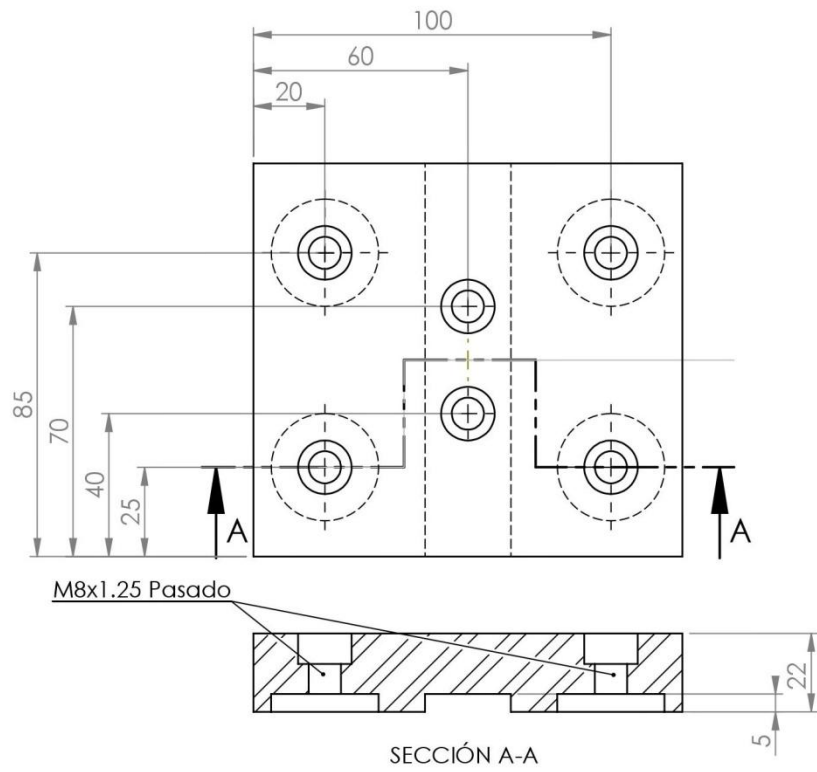
Fecha:
 11/2016

Unidades:
 Milímetros

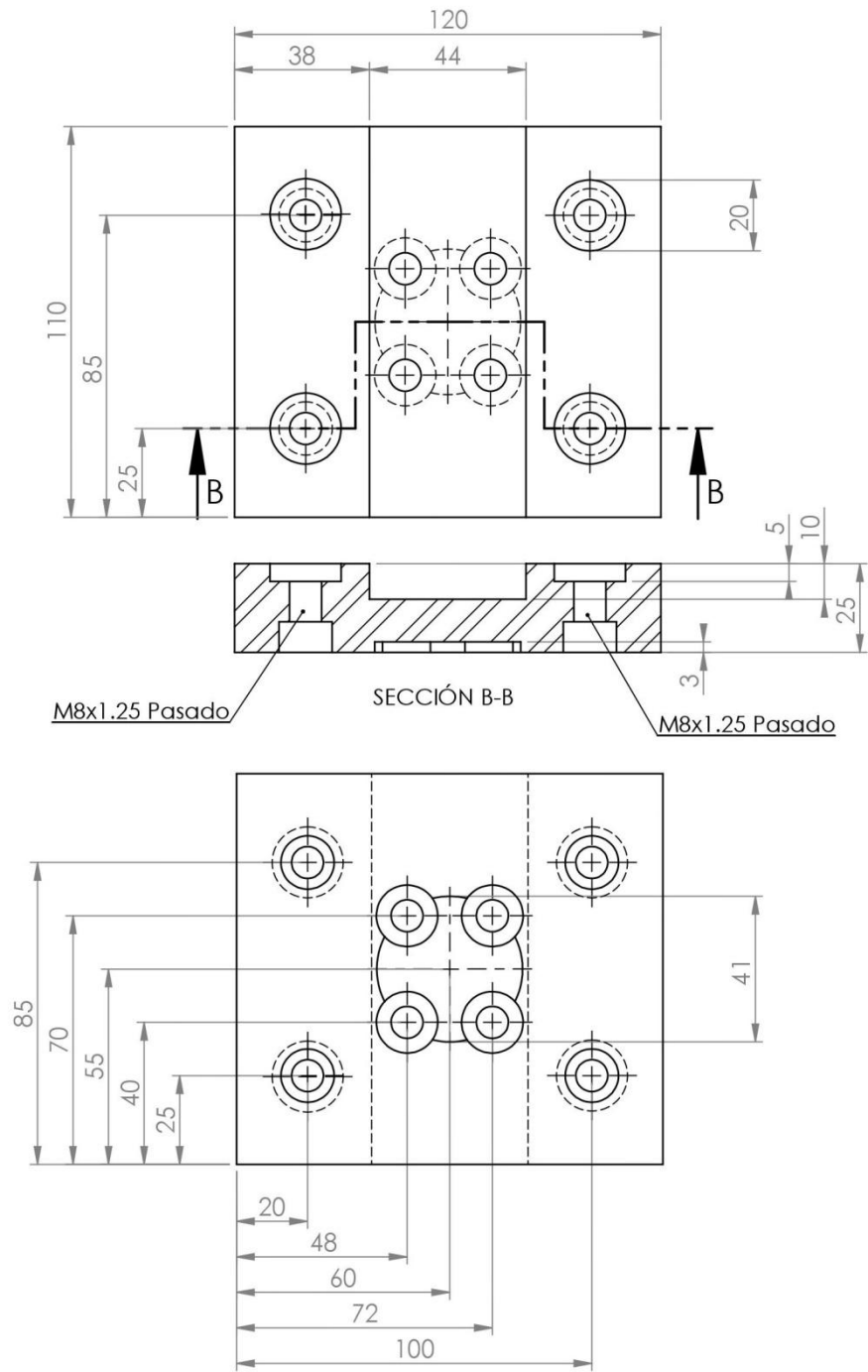
SUBCONJUNTO 2: ENSAMBLAJE INFERIOR

Plano:
 3/8





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	TRABAJO DE GRADUACIÓN: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA DEFORMACIÓN PLANA ACOPLADO A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN	Escala: 1:2
PRESENTADO POR: Ever Esaú Martínez Sánchez DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc Jonathan Antonio Berríos Ortiz	Fecha: 11/2016	Unidades: Milímetros
DETALLE 1: PLACA SUPERIOR	Plano: 4/8	



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN: DISEÑO Y
 CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
 PARA DEFORMACIÓN PLANA ACOPLADO
 A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN

Escala:
 1:2

PRESENTADO POR: Ever Esaú Martínez Sánchez
 DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc Jonathan Antonio Berríos Ortiz

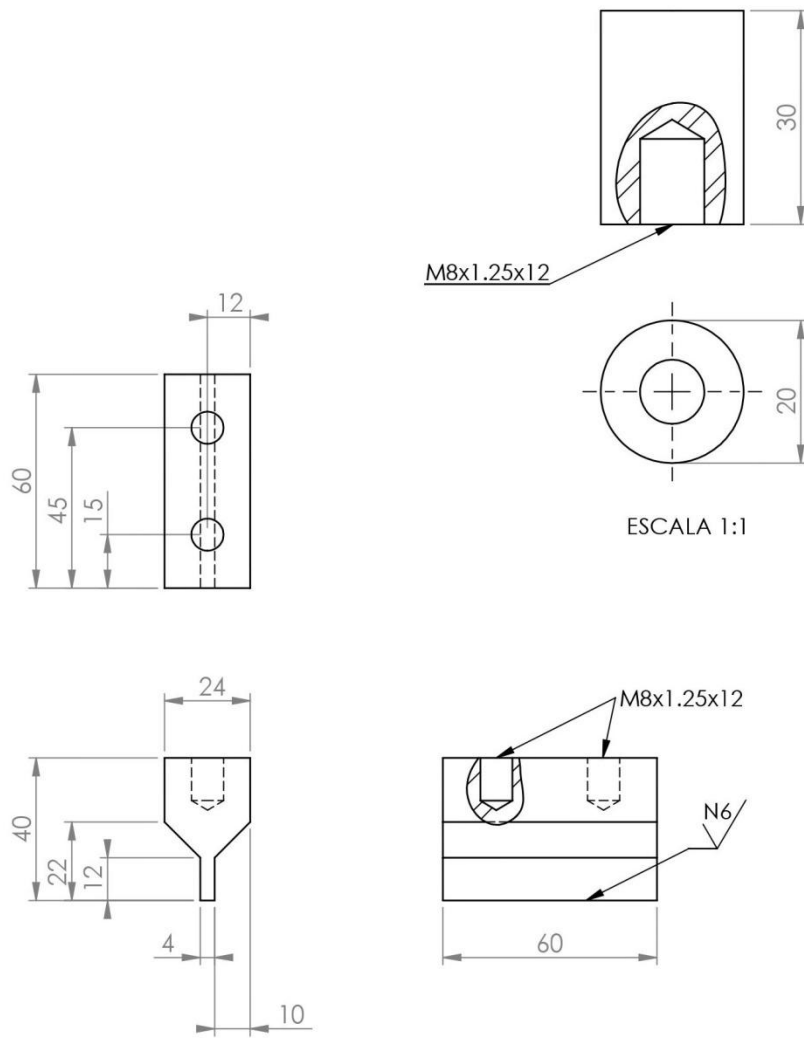
Fecha:
 11/2016

Unidades:
 Milímetros

DETALLE 2: PLACA INFERIOR

Plano:
 5/8





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN: DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
PARA DEFORMACIÓN PLANA ACOPLADO
A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN

Escala:
1:2

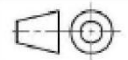
PRESENTADO POR : Ever Esaú Martínez Sánchez
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc Jonathan Antonio Berríos Ortiz

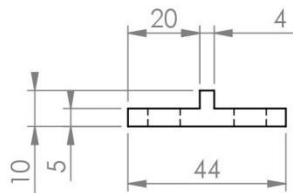
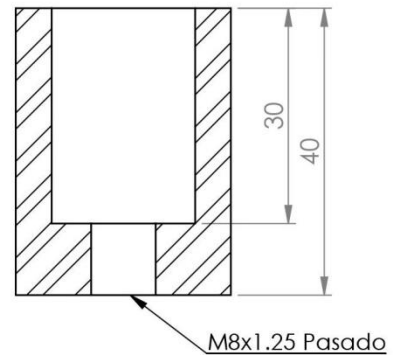
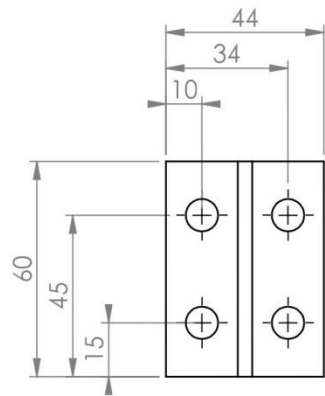
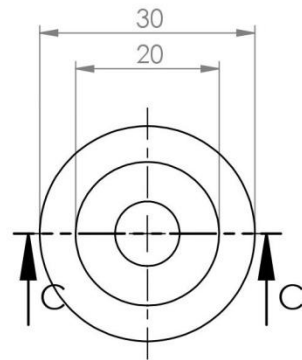
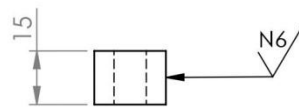
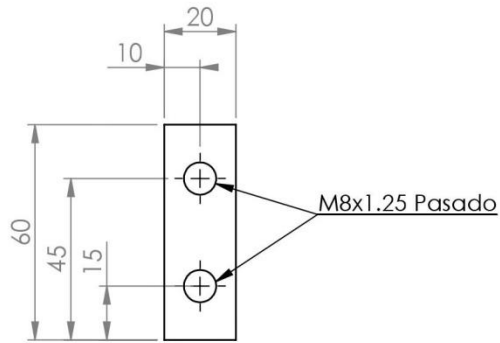
Fecha:
11/2016

Unidades:
Milímetros

DETALLE 3: INDENTOR Y BARRA DESLIZANTE

Plano:
6/8





SECCIÓN C-C
ESCALA 1:1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN: DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
PARA DEFORMACIÓN PLANA ACOPLADO
A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN

Escala:
1:2

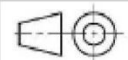
PRESENTADO POR : Ever Esaú Martínez Sánchez
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc Jonathan Antonio Berríos Ortiz

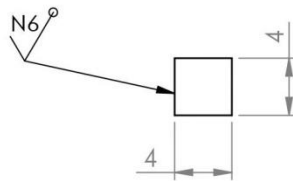
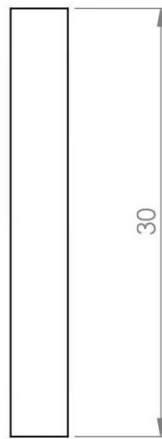
Fecha:
11/2016

Unidades:
Milímetros

DETALLE 4: CILINDRO DESLIZANTE, SOPORTE LATERAL
Y BASE DEL ESPÉCIMEN DE COMPRESIÓN

Plano:
7/8





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN: DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO
PARA DEFORMACIÓN PLANA ACOPLADO
A UNA MÁQUINA DE TRACCIÓN

Escala:
2:1

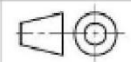
PRESENTADO POR : Ever Esaú Martínez Sánchez
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc Jonathan Antonio Berríos Ortiz

Fecha:
11/2016

Unidades:
Milímetros

DETALLE 5: ESPÉCIMEN DE COMPRESIÓN PLANA

Plano:
8/8



ANEXO B: LABORATORIO DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANA EN COBRE ELECTROLÍTICO.



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIALES Y PROCESOS DE
FABRICACIÓN**

GUIA DE LABORATORIO: ENSAYOS DE COMPRESIÓN PLANA EN COBRE ELECTROLÍTICO.

Objetivo General:

- Realizar ensayos de compresión plana en cobre electrolítico, en un dispositivo de compresión plana acoplado a una maquina de tracción - compresión

Objetivos específicos:

- Aprender a manejar adecuadamente la máquina de ensayos de tracción - compresión, el dispositivo de compresión plana y el extensómetro.
- Conocer los conceptos básicos relacionados a la compresión plana: porcentaje de alargamiento, constancia volumétrica, estado de esfuerzo y deformación en compresión plana.
- Comprobar el comportamiento del cobre electrolítico en ensayos de compresión plana elaborando las curvas esfuerzo - deformación.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Considerando una barra cilíndrica de longitud l_0 y área de la sección transversal A_0 sujeta a una fuerza de tracción uniaxial F , como la que se presenta en la Fig. 1.

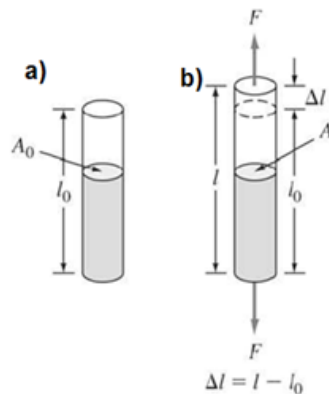


Fig. B.1. Alargamiento de una barra cilíndrica. a) La barra sin ninguna fuerza y b) la barra sujeta a la fuerza de tracción uniaxial F , que alarga la barra desde una longitud l_0 hasta l [1].

Por definición, el esfuerzo nominal sobre la barra es igual a la fuerza media (F) sobre la barra dividida por el área de su sección transversal (A_0). Por lo tanto:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (\text{B.1})$$

donde:

S = esfuerzo nominal en Mpa,

F = fuerza media de tracción uniaxial en N, y

A_0 = área de sección transversal original en mm^2 .

Cuando una fuerza de tracción uniaxial se aplica a una barra, como la que se presenta en la Fig. B.1, se produce un alargamiento de la barra en la dirección de la fuerza. Dicho desplazamiento se conoce como deformación. Por definición, la deformación nominal o unitaria es la relación entre el cambio en la longitud de una muestra en la dirección en que se aplica la fuerza y la longitud original, así:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{B.2})$$

donde:

ε = deformación nominal en mm/mm ,

l_0 = longitud inicial de la muestra en mm , y

l = longitud después de ser alargada por la fuerza uniaxial a tracción en mm .

Muchos procesos de metalistería tiene lugar bajo un estado de deformación llamado deformación plana; es decir, la deformación en una dirección principal es cero. Esto significa que el flujo en todas partes es paralelo al plano (1, 3) e independiente de la posición a lo largo de la normal (2) a este plano, como se observa en la Fig. 2. [2].

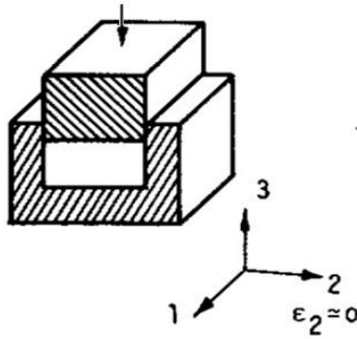


Fig. B.2. Estado de deformación en compresión plana [4].

Cuando un material que está siendo deformado plásticamente presenta tendencia a fluir en todas las direcciones, una condición de deformación plana implica que el flujo en una dirección es impedido ya sea por la geometría del componente o por la máquina. Una condición de deformación plana ($\epsilon_1, \epsilon_2=0, \epsilon_3$) no implica que el esfuerzo S_2 , sea cero. Lo anterior se puede demostrar con las reglas de flujo que, así [3]:

$$S_2 = \frac{S_1 + S_3}{2} \quad (B.3)$$

Donde $S_3 = 0$ en el caso particular presentado en la Fig. B.2.

Para la realización de los ensayos y el cálculo de los esfuerzos reales se hacen dos consideraciones:

- a. El volumen del espécimen de compresión permanece constante durante todo el ensayo, así [2]:

$$V_1 = V_2 = a_1 \cdot b_1 \cdot l_1 = a_2 \cdot b_2 \cdot l_2 \quad (B.4)$$

donde a_1 , b_1 y l_1 son la altura, ancho y largo del espécimen de compresión antes de aplicar la carga, y a_2 , b_2 y l_2 son las dimensiones del espécimen de compresión cuando hay carga aplicada.

- b. La deformación en la dirección principal (2) se considera cero aunque en la práctica siempre se presenta una pequeña deformación.

PROCEDIMIENTO

Antes de realizar los ensayos de compresión plana, se deben revisar el manual de mantenimiento de la máquina de ensayos tracción-compresión y el manual de mantenimiento del dispositivo de compresión plana.

Al terminar el mantenimiento requerido, se pueden iniciar los ensayos de compresión plana. Así, el procedimiento es el siguiente:

16. Verificar el acabado del espécimen a ensayar y anotar sus dimensiones.
17. Colocar el espécimen en el canal del dispositivo, asegurándose de que quede centrado.
18. Ensamblar el dispositivo de compresión, verificando que las marcas coincidan en ambos sub ensambles, superior e inferior.
19. Verificar que el cilindro hidráulico esté completamente retraído, que la válvula de alivio de la bomba esté completamente cerrada y que el asiento semiesférico para los ensayos de compresión esté lubricado.
20. Acoplar el dispositivo a la máquina, colocándolo sobre el asiento semiesférico.
21. Extender el cilindro hidráulico lentamente hasta que la placa superior toque levemente el soporte de la máquina. Mover el dispositivo para que se alinee correctamente.

22. Instalar el extensómetro y colocar sus contactos entre la placa superior e inferior del dispositivo y definir el punto de inicio. Para más detalles, ver el manual del extensómetro.
23. Anotar los valores de la presión hidráulica y la deformación leídos en el manómetro y el extensómetro.
24. Accionar la bomba de modo que la presión aumente a razón aproximada de 50 psi por segundo. Aumentar la presión a intervalos de 500 Psi y esperar de 30 a 45 segundos para aumentarla nuevamente.
25. Repetir los pasos 8 y 9 hasta llegar a la presión máxima entregada por la máquina.
26. Retirar el extensómetro.
27. Abrir lentamente la válvula de alivio de la bomba y desacoplar el dispositivo de compresión plana.
28. Desenroscar los 4 tornillos cónicos que sujetan los soportes laterales del espécimen a la placa inferior.
29. Remover el espécimen ensayado. Si el espécimen está muy ajustado, golpear suavemente los soportes laterales con un material blando hasta que sea liberado.
30. Limpiar la base y los soportes laterales del espécimen y atornillarlos nuevamente a la placa inferior.

ELABORACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN

La expresión para calcular la fuerza entregada por el cilindro hidráulico es:

$$F_{ch} = 638.7P_{ch} \text{ [N]} \quad (\text{B.5})$$

donde:

P_{ch} = presión en el cilindro hidráulico en MPa, leída en el manómetro,

F_{ch} = Fuerza entregada por el cilindro hidráulico en N.

Haciendo uso de las consideraciones presentadas previamente, se pueden comprobar fácilmente que la deformación longitudinal real y el esfuerzo real son:

$$\epsilon_3 = \frac{a_1}{a_1 - \Delta_v} - 1 \quad (\text{B.6})$$

donde:

ϵ_3 = Deformación longitudinal real (dirección principal 3), en mm/mm,

Δ_v = deformación vertical leída en el extensómetro en mm.

$$S_t = \frac{F_{ch}(a_1 - \Delta_v)}{(a_1)(b_1)(l_1)} \quad (\text{B.7})$$

donde:

S_t = esfuerzo real en la dirección principal (1)

REFERENCIAS:

- [1] Smith, William F. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México. Editorial McGraw-Hill. 4ta Edición.
- [2] Alting, Leo (1996). *Procesos para ingeniería de manufactura*. México. Alfaomega. 3ra Edición.
- [3] Beer, Feer, Johnston, DeWolf, Mazurek. (2009). *Mecánica de materiales*. México. Editorial McGraw-Hill. 5ta Edición.

Tabla B.1. Formato de resultados del ensayo de compresión plana.

Δ_v , mm	P_{ch}		F_{ch} , N	$\epsilon_3 \times 10^{-3}$, mm/mm	S_t , MPa
	psi	MPa			
	0	0			
	500	3.45			
	1000	6.90			
	1500	10.34			
	2000	13.79			
	2500	17.24			
	3000	20.69			
	3500	24.14			
	4000	27.59			
	4500	31.03			
	5000	34.48			
	5500	37.93			
	6000	41.38			
	6500	44.83			