



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

9

ZES

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

"FORMABILIDAD EN CALIENTE DEL
ACERO AISI 1045F"

TESIS MANCOMUNADA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A N:

ALMA ROCIO GARCIA ESPINOZA

CESAR EDUARDO TOVAR ZARAGOZA

México, D.F.

1995

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO AL TEMA:

PRESIDENTE	PROF. TERESITA ROBERT NUÑEZ
VOCAL	PROF. VICTOR JORGE CORTES SUAREZ
SECRETARIO	PROF. GERARDO ARAMBURO PEREZ
1er. SUPLENTE	PROF. SERGIO GARCIA GALAN
2do. SUPLENTE	PROF. ROGELIO MACIAS HUERTA

SITIOS DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

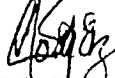
LABORATORIOS DE POSGRADO DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA METALURGICA, EDIFICIO "D", FACUTAD DE QUIMICA U.N.A.M.

LABORATORIO MECANICO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO "METRO", ESTACION ZARAGOZA.

ALTOS HORNO DE MEXICO S.A. DE C.V. DIVISION SUR, OFICINAS CENTRALES.

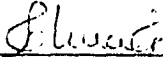
UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA, UNIDAD AZCAPOTZALCO, AREA DE CIENCIA DE LOS MATERIALES, DIVISION DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERIA.

ASESOR DEL TEMA:

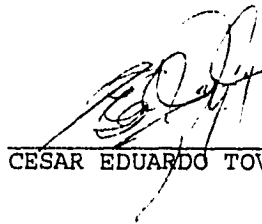


M. en C. VICTOR JORGE CORTES SUAREZ

SUSTENTANTES:



ALMA ROCIO GARCIA ESPINOZA



CESAR EDUARDO TOVAR ZARAGOZA

A mis padres .

Por su apoyo y paciencia para la culminación de este trabajo.

Al M. en C. Victor Jorge Cortes Suarez:

Por su invaluable asesoramiento en la elaboración de la presente tesis.

A la Biol. Guillermina Gonzalez:

Por el apoyo técnico en la microsonda para la obtención de las microfotografías presentadas.

A los ingenieros Gerardo Aramburo y Sergio García:

Del departamento de Metalurgia de la Facultad de Química por el apoyo y facilidades otorgadas.

A la Generación 83-87:

Por el compañerismo y buenos ratos que hemos pasado juntos.

Y por conceder facilidades técnicas y de equipo para la realización del presente a:

El personal del:

Area de Ciencia de Materiales
Departamento de Materiales
UAM Azcapotzalco.

Al Depto. Mecánico-Metalúrgico

Del Sistema de Transporte Colectivo Metro
Estación Zaragoza.

Al personal del Departamento de Calidad de

Altos Hornos de México S.A. de C.V.
Planta Lechería.

FALLA DE ORIGEN

Es parte de la tragedia humana
que el desarrollo del YO jamás
sea completo: aun bajo las
mejores condiciones, sólo una
parte de las potencialidades del
hombre son realizadas. El hombre
siempre muere antes de haber
nacido completamente.

Erich Fromm
Ética y Psicoanálisis.
F.C.E. 1953

FALLA DE ORIGEN

INDICE:

Introducción	1
Capítulo I Formabilidad	3
1 Definición de formabilidad	3
1.1 Parámetros que afectan la formabilidad	4
1.1.1 Factores del material que afectan la formabilidad	4
1.1.1.1 Mecanismos de fractura	4
1.1.1.2 Flujo localizado	7
1.1.1.3 Influencia de la estructura metalúrgica	8
1.1.2 Variables del proceso de deformación que controlan la formabilidad	12
1.1.2.1 Estado de esfuerzos	12
1.1.2.2 Efecto de la rapidez de deformación	13
1.1.2.3 Efecto de la temperatura	17
1.1.2.4 Deformación	21
1.1.2.5 Criterio de fluencia	23
1.1.2.6 Fricción	24
Capítulo II Evaluación de la formabilidad	27
2.1 Ensayos mecánicos	27
2.1.1 Ensayo de compresión	28
2.1.1.1 Abarrilamiento	29
2.1.2 Ensayo de compresión plana	32
2.1.3 Ensayo de compresión restringida	34
2.1.3.1 Características de la probeta	35
2.1.3.2 Cálculo del % DGV	37
2.1.4 Ensayo de torsión	39
2.1.4.1 Tipos de fallas en torsión	42
2.1.4.2 Simulación del proceso involucrando múltiples deformaciones	43
2.1.5 Ensayo de tensión	44
2.1.5.1 Inestabilidad plástica	45
2.1.5.2 Rapidez de deformación	46

Capítulo III	Desarrollo experimental	47
3.1	Acero examinado	47
3.2	Análisis microestructural	48
3.3	Condiciones del ensayo	50
3.4	Sistema de pruebas mecánicas	51
Capítulo IV	Resultados y discusión	57
4.1	Comportamiento a la deformación plástica	57
4.1.1	Ensayo de compresión uniaxial	57
4.1.2	Ensayo de compresión restringida	67
4.1.2.1	Agrietamiento	81
Capítulo V	Conclusiones y recomendaciones	90
Apéndice I	Programa para obtención de valores de conformado	92
Apéndice II	Gráficas DGV , Esfuerzo vs. Deformación	100
Apéndice III	Tablas de Resultados	103
Apéndice IV	Referencia de Figuras	106
Bibliografía		107

INTRODUCCIÓN

La importancia de las aleaciones ingenieriles en la tecnología moderna se debe en gran parte a la facilidad con las que ellas se pueden conformar en formas útiles, mediante diversos procesos termomecánicos. En muchos productos las propiedades mecánicas dependen del control del endurecimiento por deformación durante el proceso, tal es el caso del conformado a baja temperatura; mientras que en otros casos se requiere el control preciso de la deformación, temperatura y rapidez de deformación durante el proceso para desarrollar la estructura y propiedades óptimas, como lo es el conformado a alta temperatura.

Para desarrollar la estructura y propiedades óptimas de la aleación, se requiere comprender los efectos de las variables del conformado a alta temperatura sobre los cambios estructurales que sufre la aleación durante la deformación. Las relaciones deducidas entre microestructura y variables de deformación plástica a través de ecuaciones constitutivas de esfuerzo y deformación en términos de las variables de rapidez de deformación y temperatura podrán ser aplicables a procesos de deformación plástica.

Un problema que se presenta durante los procesos termomecánicos a alta temperatura, es el fenómeno del flujo plástico localizado, llamado también inestabilidad plástica; este flujo localizado involucra una fuerte interacción entre la pieza conformada y la herramienta, así como consideraciones de propiedades del material y parámetros del proceso. La propiedad del material más importante en el conformado en caliente, es la dependencia del esfuerzo de flujo con la temperatura. A temperaturas del conformado en caliente, son generados gradientes de temperatura lo que a su vez origina gradientes de deformación y de rapidez de deformación; y en casos extremos, pueden desarrollarse bandas de corte, las cuales son un tipo común de falla en productos conformados.

El estudio del flujo localizado o inestabilidad plástica es de gran importancia en el diseño de procesos de conformado y en la optimización del empleo de los materiales metálicos, pues se trata de determinar, en ambos casos, las condiciones requeridas para que el material se deforme

de una manera más homogénea y de prevenir la localización de la deformación plástica y con ello eliminar en gran medida la causa de aparición de grietas.

La formabilidad del material es la herramienta que nos auxilia para comprender la presencia del flujo localizado, permitiéndonos encontrar las condiciones idóneas o factibles de modificar en el proceso o en el material a fin de minimizar el flujo localizado.

El objetivo de ese trabajo es caracterizar la respuesta a la deformación plástica a alta temperatura del acero AISI 1045F , utilizando los ensayos de compresión uniaxial y compresión restringida para evaluar la tendencia al flujo localizado del material a través del parámetro DGV (Distributed Gage Volume), para determinar el comportamiento del material de acuerdo a su resistencia a la fractura y a su resistencia a la deformación plástica.

CAPÍTULO I

FORMABILIDAD

1 DEFINICIÓN DE FORMABILIDAD

La formabilidad (*workability*) se define como el grado de deformación que se puede obtener en un proceso de conformado, sin crear una condición indeseable (1). Generalmente, la condición indeseable se relaciona con el agrietamiento o fractura del metal, pero comercialmente, otra condición indeseable puede ser un pobre acabado superficial, un traslape o un defecto debido a una herramienta desgastada. El término "*workability*" (formabilidad) frecuentemente se utiliza indistintamente con el de "*formability*" (formabilidad), pero éste último se prefiere utilizar cuando se refiere al conformado de piezas con lámina metálica; mientras que el término "*workability*" se utiliza para referirse al conformado de metales por procesos de deformación de gran volumen, tales como forja, laminación y extrusión (2).

La formabilidad no es una propiedad única de un material dado, sino que depende de las variables del proceso, como temperatura, rapidez de deformación, grado de deformación, condiciones de fricción, estado de esfuerzos, y de las propiedades del material, por ejemplo, estructura metalúrgica, ductilidad, etc.

Por lo tanto, la formabilidad se puede expresar como una función que relaciona dos factores:

$$\text{Formabilidad} = f_1(\text{material}) \times f_2(\text{proceso}) \quad (1.1)$$

donde f_1 depende de las propiedades del material y se evalúa con algún tipo de ensayo mecánico a escala laboratorio y f_2 es una función de los parámetros del proceso de deformación.

La aplicación de la formabilidad, está en el desarrollo de un criterio de fractura bajo condiciones de estado de esfuerzos, rapidez de deformación, temperatura y deformación.

1.1 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA FORMABILIDAD

1.1.1 FACTORES DEL MATERIAL QUE AFECTAN LA FORMABILIDAD

1.1.1.1 MECANISMOS DE FRACTURA

Las fracturas producidas bajo condiciones de conformado mecánico, usualmente son dúctiles y raramente frágiles (2). Sin embargo, dependiendo de la temperatura y rapidez de deformación, el mecanismo de la fractura dúctil puede variar. La Fig. 1.1 muestra esquemáticamente los diferentes modos de fractura tensil. La fractura dúctil a temperaturas por debajo de la región de conformado en caliente ($T < 0.5 T_M$) ocurre por la formación de poros y es típica de un crecimiento lento de grieta. Este mecanismo se desarrolla en tres etapas (3): la nucleación de poros en una segunda fase ó inclusión durante la deformación plástica, el crecimiento de esos poros con la continua deformación y finalmente su coalescencia para producir la completa fractura, que a nivel microscópico es transgranular. La Fig. 1.2 muestra estas etapas de la fractura. El incremento de la temperatura de deformación conduce a cambios drásticos en el modo de deformación y comportamiento a la fractura. A altas temperaturas ($T \geq 0.5 T_M$) se promueve el deslizamiento del límite del grano, el cual es el principal mecanismo de falla de alta temperatura por fractura intergranular. Involucra la nucleación y crecimiento de dos tipos de poros: tipo cuña y redondos ó elípticos (Fig. 1.3), sobre límites de grano perpendiculares al eje tensil. Las grietas tipo cuña se forman a menor rapidez de deformación, nucleándose en los puntos triples donde coinciden tres límites de grano. Las grietas redondas se forman a más altas temperaturas o a esfuerzos y/o rapidez de deformación menores de las que producen las grietas tipo cuña. Las grietas redondas se nuclean en puntos donde se concentran los esfuerzos durante el deslizamiento. Se puede desarrollar un mapa de proceso, considerando todos los mecanismos de fractura que pueden operar en un material sobre un intervalo de temperaturas y rapidez de deformación. El mapa, es un concepto útil que va ganando aceptación en el entendimiento de la respuesta del material al proceso de la deformación. La Fig. 1.4 ilustra un mapa de proceso para el Aluminio. La región segura indica que el material está libre de daño por cavitación ó flujo localizado; el mapa predice que a temperatura constante, por ejemplo a 500 °K (227 °C), la ductilidad estará en un máximo en el intervalo de una rapidez de deformación de 10^{-3} a 10^{-1} s^{-1} , por debajo del valor mínimo, se formarán grietas tipo cuña, mientras que por encima del valor máximo el material se fractura dúctilmente.

Fig. 1.1. Modos de fractura tensil en función de la temperatura y rapidez de deformación.

Strain rate = Rapidez de deformación
 Absolute Temperature = Temperatura Absoluta
 Ductile Fracture = Fractura Dúctil
 Cavitation = Cavitación
 Ductile Rupture = Ruptura Dúctil
 Melting = Punto de Fusión

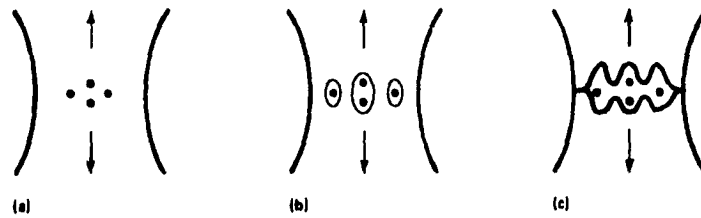
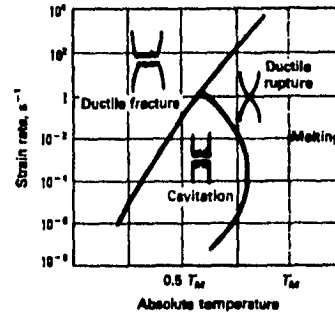


Fig.1.2 Nucleación (a), crecimiento (b) y coalescencia de poros (c), debido al incremento en la deformación. [T < 0.5 Tm]

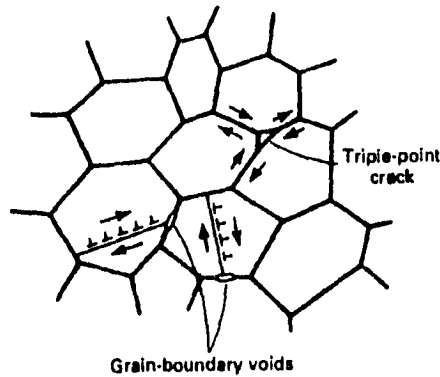


Fig. 1.3 Nucleación y crecimiento de poros, redondos o elípticos y tipo cuña
 Triple Point Crack = Grietas Tipo Cuña; Grain Boundary Voids = Grietas Tipo Redondo

Fig. 1.4 Mapa de proceso para el Aluminio que muestra la región segura en función de la Temperatura homóloga y la velocidad del proceso.

Homologous Temperature = Temperatura Homóloga

Adiabatic Heating = Calentamiento Adiabático

Cavitation = Cavitación

Effective Strain Rate = Rapidez Efectiva de Deformación

Dynamic Recrystallization = Recristalización Dinámica

Wedge Cracking = Agrietamiento Tipo Cuña

Safe Region = Región Segura

Upper Bound for Wedge Cracking = Banda Superior para el Agrietamiento Tipo Cuña

Lower Bound for Cavitation = Banda inferior para la Cavitación

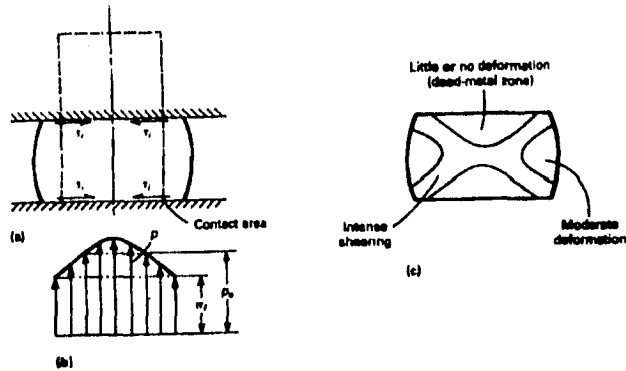
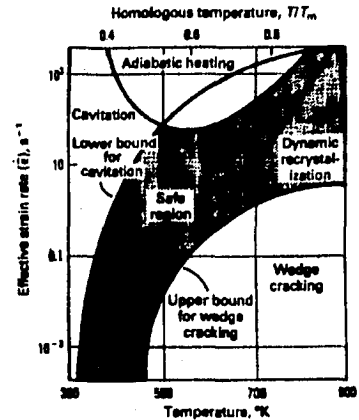


Fig. 1.5 (a) Compresión uniaxial de un cilindro, (b) distribución de esfuerzos a lo largo del plano de contacto, y (c) zonas de alta y nula deformación.

Contact Area = Área de Contacto

Little or no Deformation = Zona de Baja o Nula Deformación

Moderate Deformation = Deformación Moderada

Intense Shearing = Corte Intenso

Dead Zone Metal = Zona Muerta

1.1.1.2 FLUJO LOCALIZADO

Un problema que afronta la formabilidad es cuando la deformación del metal se localiza en una zona limitada. En el estudio de la deformación plástica, una suposición simple es que la deformación es homogénea, es decir, cada parte de la pieza trabajada sufre la misma deformación, sin embargo, en procesos tales como forja, laminación, trefilado y extrusión, dos factores invalidan tal suposición (2,6):

Primero, la fricción entre la herramienta y la pieza impone una restricción sobre la deformación. Esto conduce a una localización de la deformación, el desarrollo de zonas muertas y una región de intensa deformación cortante sobre la pieza. La Fig. 1.5 muestra la compresión de un cilindro, cuando la pieza se comprime, debido al deslizamiento en la interface, la pieza se abarrila y se genera una distribución de los esfuerzos.

Segundo, la geometría del proceso mismo, puede producir flujo localizado, por ejemplo, en forja, laminación ó extrusión, si la longitud de contacto (L) es más pequeña que el espesor medio (h) o el diámetro medio (d) de la pieza trabajada, la deformación será heterogénea (Fig. 1.6). En general, el flujo localizado trae dos consecuencias: (a) debido a que la deformación procede contra el efecto de restricción del centro de la zona menos deformada, se incrementa la carga para la deformación y (b) se generan esfuerzos tensiles secundarios en las partes de la zona menos deformada; si estos esfuerzos alcanzan altos valores críticos, el material puede sufrir fractura ó inducirse esfuerzos residuales que provocarán subsecuente distorsión ó falla del material debido a la corrosión por el medio ambiente.

En el conformado en caliente (7,8), en ausencia de efectos de fricción y zona fría (chilling), se puede presentar el flujo localizado. En este caso la localización resulta del fenómeno de ablandamiento, que es debido a las inestabilidades en la estructura, tales como: calentamiento adiabático, recristalización, crecimiento de grano, etc.

1.1.1.3 INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA METALÚRGICA

La formabilidad depende en gran medida del tamaño y estructura del grano. Cuando el grano es grande como en estructuras de lingote colado, la formabilidad es baja, las grietas pueden nuclearse y propagarse fácilmente a lo largo de los límites de grano. La segregación de impurezas en el lingote es otro problema. Debido a esta segregación se forman compuestos de bajo punto de fusión en el límite de grano, limitando el intervalo de temperaturas de formabilidad. La deformación a temperaturas cercanas al punto de fusión de esos compuestos puede generar un agrietamiento en el límite de grano cuando el calor generado por la deformación incrementa la temperatura de la pieza y produzca fusión local, a este fenómeno se le conoce como fragilidad en caliente (hot shortness) y se puede prevenir utilizando una baja rapidez de deformación, baja temperatura de conformado ó con un tratamiento térmico de homogeneización previo al conformado (2)

La región de temperatura intermedia de baja ductilidad, mostrada en la Fig. 1.7 se encuentra en muchos sistemas metalúrgicos. Esto ocurre a una temperatura que es lo suficientemente alta para que el deslizamiento del límite de grano nuclea grietas de límite de grano (cuñas y redondos), pero no lo suficiente para que las grietas sean selladas por un mecanismo de recristalización dinámica. La relación de formabilidad y temperatura de varios sistemas metalúrgicos se resumen en la Fig. 1.8; generalmente, los metales puros y aleaciones de fase simple exhiben la mejor formabilidad, excepto cuando hay crecimiento de grano a alta temperatura (1,9).

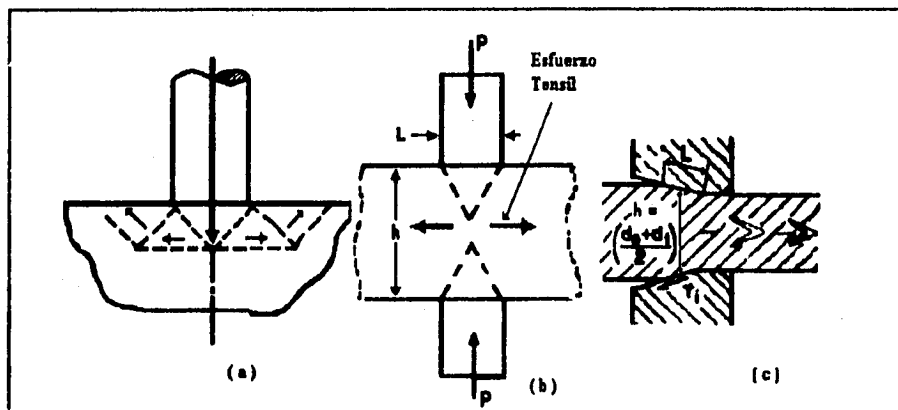


Fig. 1.6 Ejemplos de Deformación Heterogénea en : a) Identación de un cuerpo semiinfinito b) Forjado entre yunques opuestos y c) Estirado

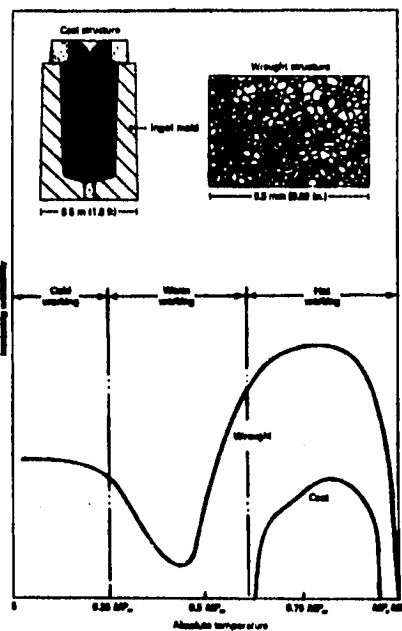
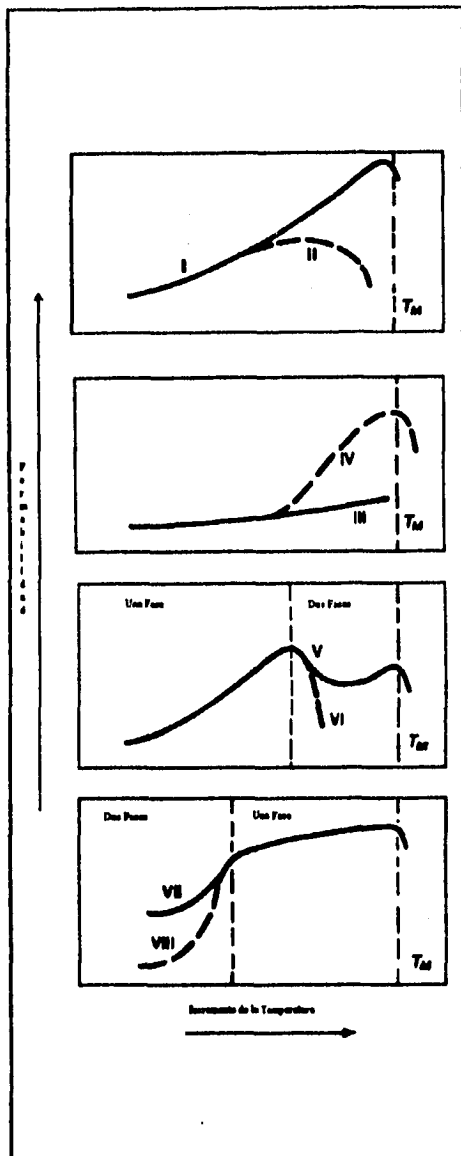


Fig. 1.7 Formabilidad relativa de metales colados y trabajados.
 Mpc: punto de fusión [fundición]; Mpw: punto de fusión [forja]
 Cold Working = Conformado en Frío
 Warm Working = Conformado en Tibio
 Hot Working = Conformado en Caliente
 Increasing Formability = Incremento de la Formabilidad
 Wrought Structure = Estructura Forjada
 Absolute Temperature = Temperatura Absoluta
 Cast Structure = Estructura de Colada
 Ingot Mold = Lingotera



- I. Metales puros y aleaciones monofásicas**
Aleaciones de Aluminio
Aleaciones de Tántalo
Aleaciones de Niobio
- II. Metales puros y Aleaciones monofásicas que exhiben un rápido crecimiento de grano**
Berilio
Aleaciones de Tungsteno
Todas las aleaciones de Titanio beta
- III. Aleaciones que contienen elementos que forman compuestos insolubles.**
Aceros resulturados
Aceros inoxidables que contienen Selenio
- IV. Aleaciones que contienen elementos que forman compuestos solubles.**
Aceros inoxidables conteniendo carburos o nitruros
- V. Aleaciones que forman segundas fases dúctiles en el calentamiento**
Aceros inoxidables al alto cromo
- VI. Aleaciones que forman segundas fases con bajo punto de fusión en el calentamiento**
Hierros que contengan sulfuros
Aleaciones de Magnesio conteniendo Cinc
- VII. Aleaciones que forman segundas fases dúctiles en el enfriamiento**
Aceros al carbono y de baja aleación.
Aleaciones alfa-beta y alfa-Titanio
- VIII. Aleaciones que forman segundas fases frágiles en el enfriamiento.**
Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Fig. 1.8 Relación de formabilidad para varios sistemas metalúrgicos

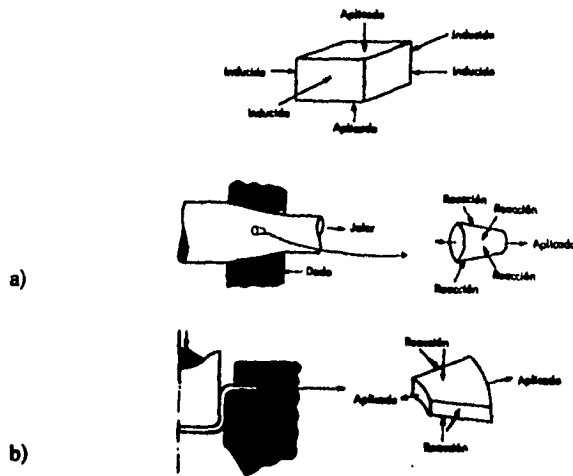


Fig. 1.9 Compresión indirecta. a) trefilado de alambre y b) pestaña en una copa embutida.

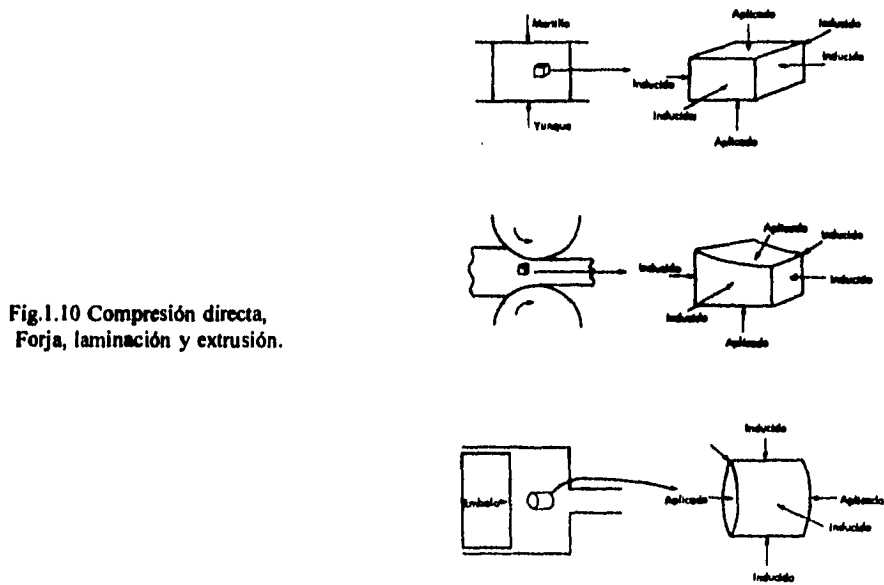


Fig.1.10 Compresión directa, Forja, laminación y extrusión.

1.1.2 VARIABLES DEL PROCESO DE DEFORMACIÓN QUE CONTROLAN LA FORMABILIDAD

1.1.2.1 ESTADO DE ESFUERZOS

Debido a las diferentes geometrías de las herramientas y piezas trabajadas y a las diferentes formas en que las cargas de deformación son aplicadas, los diferentes procesos de conformado producen diferentes estados de esfuerzos. Se ha encontrado que en todos los casos de procesos de deformación, que aunque solamente uno ó quizás dos esfuerzos son aplicados a la pieza trabajada, otros son inducidos para dar un estado triaxial de esfuerzos. La razón de esto es que el esfuerzo aplicado original se genera por una herramienta que debe estar en contacto con el metal; cuando la deformación comienza, el flujo plástico produce fricción entre la herramienta y la pieza trabajada de manera que se inducen más esfuerzos (2).

Existen tres categorías de procesos dependiendo del estado aplicado (10):

- a) Tensión uniaxial
- b) Compresión uniaxial
- c) Tensión biaxial

Que dan origen a tres clases de estados de esfuerzos en la pieza trabajada:

- a) Compresión indirecta
- b) Compresión directa
- c) Tensión biaxial

A continuación se representa el estados de esfuerzos de cada uno de ellos.

a) Compresión indirecta

Un esfuerzo tensil aplicado induce dos esfuerzos compresivos que son mutuamente perpendiculares. El trefilado de alambre y la pestaña de una copa embutida caen en esta categoría (Fig. 1.9).

b) Compresión directa

Un esfuerzo compresivo aplicado induce dos esfuerzos compresivos que se encuentran sobre planos mutuamente perpendiculares. En esta categoría se incluye la forja, laminación y extrusión (Fig. 1.10).

c) Tensión biaxial

Un estado de esfuerzos tensil biaxial inducirá un esfuerzo compresivo sobre un plano perpendicular. El estirado de lámina es un ejemplo de esta clase de sistema de esfuerzos (Fig. 1.11).

Los esfuerzos inducidos, se les conoce también como esfuerzos secundarios, siendo los esfuerzos tensiles los más importantes ya que comunmente son los que ocasionan el agrietamiento de la pieza durante el proceso de conformado y de esta manera limitan la formabilidad del material.

Un rápido examen de los principales procesos de conformado revela que los procesos de compresión directa (forja, laminación y extrusión) se pueden realizar en frío o en caliente, mientras que los procesos indirectos (embutido y trefilado) sólo en frío.

1.1.2.2 EFECTO DE LA RAPIDEZ DE DEFORMACION

La rapidez de deformación es una variable importante en los experimentos de formabilidad y es difícil de controlar. La rapidez de deformación es la velocidad a la que se efectúa la deformación en un intervalo de tiempo (11).

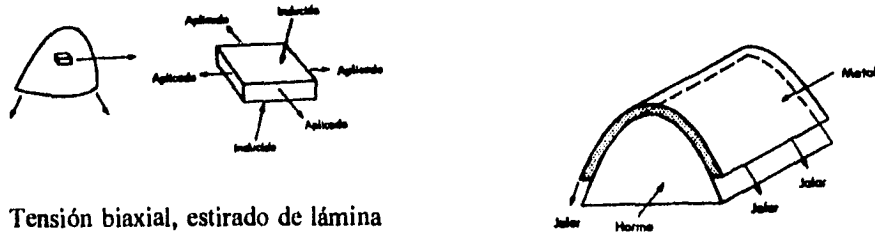


Fig. 1.11 Tensión biaxial, estirado de lámina

La rapidez de deformación efectiva para un cilindro de altura h sometido a compresión a una velocidad de conformado v es:

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{v}{h} \quad (1.2)$$

A una velocidad v constante, no se puede obtener una rapidez de deformación efectiva constante, puesto que ésta cambia continuamente debido a que la altura del cilindro continua disminuyendo durante la deformación. Para salvar tal situación, se puede utilizar la rapidez de deformación efectiva promedio. A una velocidad constante de conformado V_0 , cuando la muestra se reduce de h_0 a h , la rapidez de deformación efectiva promedio esta dada por (2):

$$\bar{\epsilon} = \frac{V_0}{2} \frac{\ln(h_0/h)}{(h_0-h)} \quad (1.3)$$

La rapidez de deformación tiene tres efectos sobre la curva de flujo, de acuerdo a la Fig. 1.12:

- a) el esfuerzo de flujo aumenta por el aumento de la rapidez de deformación
- b) el exponente del endurecimiento por deformación aumenta al aumentar la rapidez de deformación
- c) la ductilidad del metal disminuye al aumentar la rapidez de deformación

La relación entre el esfuerzo de flujo y la rapidez de deformación a temperatura y deformación constantes está dada por (12,13):

$$\sigma = C(\dot{\epsilon})^m \quad (1.4)$$

donde m es el exponente de la sensibilidad a la rapidez de deformación, y se determina midiendo el cambio en esfuerzo de flujo a través de un cambio de la rapidez de deformación a temperatura (T) y deformación (ϵ) constantes (Fig. 1.13).

$$m = \frac{\delta \ln \sigma}{\delta \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\log(\sigma_2/\sigma_1)}{\log(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)} \quad (1.5)$$

Tabla 1.1 Espectro de rapidez de deformación (12)

Intervalo de rapidez de deformación (s ⁻¹)	Condición o tipo de ensayo
10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁵	Ensayo de termofluencia
10 ⁻⁵ a 10 ⁻¹	Ensayos mecánicos estáticos
10 ⁻¹ a 10 ²	Ensayos mecánicos dinámicos
10 ² a 10 ⁴	Alta rapidez de impacto
10 ⁴ a 10 ⁸	Hípervelocidad con explosivos

Tabla 2.2 Valores típicos de velocidad en diferentes ensayos y operaciones de conformado

Operación	Velocidad (m/s)
Ensayo de tensión	6 x 10 ⁻⁷
Prensa p/extrusión	0.003 a 3
Prensa mecánica	0.15 a 1.5
Ensayo Charpy	3 a 6
Martillo de forja	3 a 9
Conformado con explosivos	30 a 120

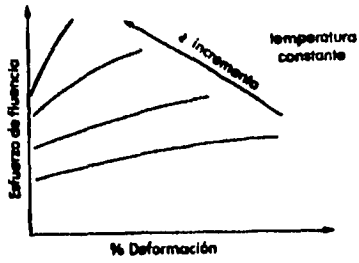


Fig. 1.12 Efecto de la rapidez de deformación en la curva esfuerzo- deformación.

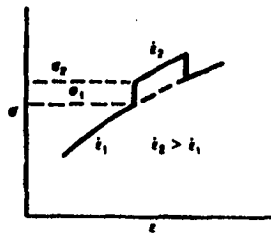


Fig.1.13 Determinación experimental del exponente m

1.1.2.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA

La curva esfuerzo-deformación y las propiedades de flujo y fractura son dependientes de la temperatura. En general, la resistencia disminuye y la ductilidad aumenta, al aumentar la temperatura; sin embargo, se pueden presentar cambios estructurales tales como: precipitación, envejecimiento por deformación, recristalización u otros fenómenos difusivos en ciertos intervalos de temperatura, lo que altera el comportamiento. Para describir este comportamiento, en forma cualitativa de acuerdo a los mecanismos de endurecimiento y/o ablandamiento que pueden actuar a distintas temperaturas, se utiliza la relación (12-14):

$$T_H = \frac{T_P}{T_M} \quad (1.6)$$

donde:

T_H = Temperatura homóloga

T_P = Temperatura de prueba o trabajo (°K)

T_M = Temperatura de fusión (°K)

Definimos la temperatura homóloga como una forma de comparar las propiedades mecánicas de diferentes materiales a temperaturas en términos de la relación de la temperatura de prueba al punto de fusión, expresados en °K. Los intervalos y características de la temperatura homóloga se dan en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Intervalo de T_H y características

Intervalo de temperaturas homólogas	Características
0.0 a 0.1	Fragilidad en el material
0.1 a 0.2	Transición frágil-dúctil
0.2 a 0.4	Conformado en frío
0.4 a 0.7	Conformado en tibio
0.7 a 1.0	Conformado en caliente

La influencia de la temperatura sobre el diagrama esfuerzo-deformación, tiene tres efectos (Fig. 1.14) (11):

- a) El esfuerzo de flujo disminuye por el aumento de la temperatura
- b) El exponente del endurecimiento por deformación disminuye y eventualmente se elimina por el aumento de la temperatura
- c) La ductilidad del metal aumenta por aumento de la temperatura

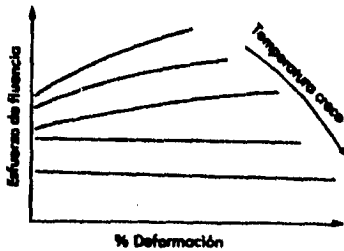


Fig. 1.14 Influencia de la temperatura sobre la curva esfuerzo - deformación

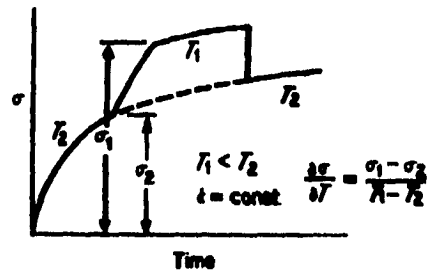


Fig. 1.15 Ensayo para evaluar la energía de activación para el flujo plástico.

La dependencia del esfuerzo de flujo con la temperatura a rapidez de deformación y deformación constantes, se expresa por (12,13):

$$\sigma = C_2 \exp(Q/RT) \quad (1.7)$$

donde:

- Q = Energía de activación para el flujo plástico (cal/mol)
- R = Constante universal de los gases; 1.987 (cal/mol grad)
- T = Temperatura de prueba (°K)

Para evaluar Q se utiliza un ensayo con cambio de temperatura (Fig. 1.15), la curva σ - ϵ se efectúa a rapidez de deformación constante, y al valor deseado de deformación plástica, la temperatura se cambia de T_2 a T_1 . Después de que se llega al equilibrio, la energía de activación está dada por:

$$Q = R \ln \frac{\sigma_1 (T_1 T_2)}{\sigma_2 (T_2 - T_1)} \quad (1.8)$$

En procesos de conformado, se sabe que el esfuerzo de flujo depende principalmente de la "historia metalúrgica", rapidez de deformación, deformación y temperatura. Una relación simple que describe el efecto combinado de la temperatura y rapidez de deformación sobre el esfuerzo de flujo es:

$$\sigma = f(Z) = f[\dot{\epsilon} \exp(\Delta H/RT)] \quad (1.9)$$

donde:

- Z = Parámetro de Zener-Hollomon
- ΔH = Entalpia de activación, cal/mol

ΔH se relaciona con la energía de activación Q por la relación $Q = m \Delta H$, donde m es el exponente de la sensibilidad a la rapidez de deformación. El parámetro Zener-Hollomon, también puede referirse como una rapidez de deformación corregida por el efecto de la temperatura:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(\Delta H/RT) \quad (1.10)$$

y se determina experimentalmente a diferentes temperaturas y rapidez de deformación, en estado estacionario.

Los procesos de conformado comunmente se clasifican en operaciones de conformado en caliente y de conformado en frío. El conformado en caliente se define como la deformación bajo condiciones de temperatura y rapidez de deformación en donde los procesos de recuperación se llevan a cabo simultáneamente con la deformación, por lo que son posibles grandes deformaciones a esfuerzos de flujo constantes. Mientras que en el conformado en frío, la deformación se realiza bajo condiciones donde los procesos de recuperación no son efectivos. Durante el conformado, cerca del 95% del trabajo mecánico utilizado para deformar se convierte en calor, alguna cantidad de este calor se transfiere a la herramienta o se pierde en el medio ambiente y una cierta cantidad queda para incrementar la temperatura de la pieza trabajada. La temperatura de la pieza trabajada durante el conformado depende de (15):

- 1) La temperatura inicial de la herramienta y el material
- 2) Generación de calor debido a la deformación plástica
- 3) Calor generado por la fricción entre herramienta y pieza
- 4) El calor transferido entre el material deformado y la herramienta y el medio ambiente

Para un proceso de deformación sin fricción, el incremento máximo en temperatura esta dado por:

$$T_d = \frac{U_p}{\rho c J} = \frac{\sigma \epsilon \beta}{\rho c J} \quad (1.11)$$

donde:

U_p = Trabajo de la deformación plástica por unidad de volúmen

ρ = Densidad de la pieza trabajada

c = Calor específico de la pieza

J = Equivalente mecánico del calor, 778 lb ft/BTU ó 4185 J/kcal

β = Fracción del trabajo de deformación convertido en calor, usualmente $\beta = 0.95$

El incremento de temperatura debido a la fricción esta dado por:

$$T_f = \frac{\mu P v A \Delta t}{\rho c V J} \quad (1.12)$$

donde:

- μ = Coeficiente de fricción en la interfase
- P = Esfuerzo normal a la interfase
- v = Rapidez en la interfase
- A = Área de la interfase
- Δt = Intervalo de tiempo considerado
- V = Volumen sujeto al incremento de temperatura

1.1.2.4 DEFORMACIÓN

El objetivo principal de los procesos de la deformación plástica es el cambio de forma del producto conformado. Un objetivo secundario es mejorar ó controlar las propiedades del producto conformado. Durante la deformación plástica, el volumen del producto conformado permanece constante, es decir (1):

$$\Delta V = 0 \quad (1.13)$$

$$V_o = V_f \quad (1.14)$$

si consideramos la situación de la Fig. 1.16, resulta:

$$A_o h_o = A_1 h_1 \quad (1.15)$$

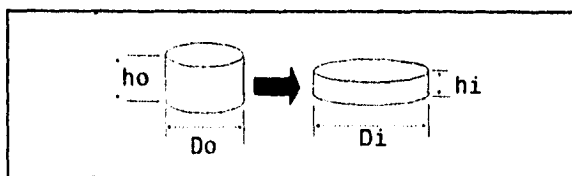


Fig. 1.16 Constancia en volumen en la deformación plástica.

La deformación producida en un proceso de conformado se describe en términos de la deformación ingenieril como:

$$e = \frac{h_1 - h_0}{h_0} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (1.16)$$

o por la deformación efectiva, que es más usual:

$$\epsilon = \ln \frac{h}{h_0} = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln(1 + e) \quad (1.17)$$

Frecuentemente la deformación en los procesos de conformado se expresa por la reducción de área, [R]:

$$R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (1.18)$$

y de la constancia de volumen:

$$e = \ln \frac{1}{1 - R} \quad (1.19)$$

Los procesos de conformado, desde el punto de vista de la deformación plástica, se pueden clasificar en procesos de estado estacionario y en procesos de estado no-estacionario (Fig. 1.17).

En los procesos en estado estacionario, todas las partes de la pieza trabajada estan sujetas al mismo modo de deformación, mientras que en estado no-estacionario, la geometría cambia continuamente. Algunos procesos tienen carácter transitorio, como lo es la extrusión de una barra; en donde al inicio y término del proceso adquiere un estado no-estacionario, mientras que al extruirse la barra, se tiene un estado estacionario (6).

1.1.2.5 CRITERIO DE FLUENCIA

La facilidad con la que un metal fluye o se deforma plásticamente es un factor importante en formabilidad. Obviamente las condiciones metalúrgicas, temperatura y el estado de esfuerzos son variables importantes. A nivel microscópico, el flujo plástico se produce por el deslizamiento de las dislocaciones en el interior de los granos individuales; este deslizamiento es provocado por un alto esfuerzo cortante resuelto; sin embargo, a nivel macroscópico no es irrazonable encontrar que el inicio del flujo plástico se pueda predecir por un criterio de fluencia o de plasticidad.

Un criterio de fluencia es una relación matemática que predice las condiciones a las que comienza la deformación plástica cuando un material está sujeto a cualquier combinación posible de esfuerzos. Son dos los criterios de fluencia comúnmente utilizados para metales (16,17):

El criterio de Tresca o del esfuerzo cortante máximo, establece que la fluencia ocurrirá cuando:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\sigma_0}{2} \quad (1.20)$$

donde:

τ_{\max} = Esfuerzo cortante máximo

σ_0 = Esfuerzo de fluencia del material, medido en tensión o compresión uniaxial

El criterio de Von Mises o de la energía de distorsión y que es más completo y generalmente aplicable a los procesos de conformado. El criterio establece que:

$$2 \sigma_0^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (1.21)$$

donde:

$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ = Esfuerzos principales

σ_0 = Esfuerzo de fluencia uniaxial del material

De acuerdo a los dos criterios se observa que la fluencia puede iniciarse bajo diferentes estados de esfuerzos. La Fig. 1.18 muestra ambos criterios con algunos ejemplos en estado biaxial, sobre una superficie de fluencia.

1.1.2.6 FRICCIÓN

La fricción en la interface herramienta-pieza (18,19) es otro factor importante en los procesos de conformado.

La mecánica de la fricción en la interface es muy compleja, por lo que usualmente se emplean suposiciones simples. Una de ellas, es adoptar la definición del coeficiente de fricción:

$$\mu = \frac{\tau_i}{P} \quad (1.22)$$

donde:

μ = Coeficiente de fricción de Coulomb

τ_i = Esfuerzo cortante en la interface

P = Esfuerzo normal a la interface

La definición incluye las leyes de Amonton de la fricción: la fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal e independiente del tamaño del área de contacto aparente. Para una μ constante, τ_i debe incrementar a la misma rapidez que el esfuerzo de la interface P. Usualmente se habla de la fricción de Coulomb cuando se satisface esta condición (Líneas discontinuas en la Fig. 1.19a).

Otro punto de vista, considera que la pieza en contacto con la herramienta se puede representar como un material de esfuerzo cortante constante τ_f . Cuando τ_i alcanza un valor de τ_f (esfuerzo cortante de fluencia de la pieza trabajada), el material en lugar de deslizarse contra la superficie de la herramienta, le toma menos energía deslizarse dentro del mismo cuerpo de la pieza,

mientras que la superficie (interface) permanece inmóvil (Fig. 1.19b). El esfuerzo cortante de la interface (τ_i) tiene un valor fraccional constante m del esfuerzo cortante de fluencia de la pieza (τ_f); a m se le conoce como factor de fricción de la interface. A la condición anteriormente descrita se le conoce como "fricción adherente" (sticking friction) y se representa como:

$$m = \frac{\tau_i}{\tau_f} \quad (1.23)$$

donde:

m = Factor de fricción de la interface

τ_i = Esfuerzo cortante en la intercara

τ_f = Esfuerzo cortante de fluencia de la pieza

Los valores de m varían de 0 a 1:

$m = 0$: indica un deslizamiento perfecto, por ejemplo, debido a superficies pulidas y lubricadas.

$m = 1$: indica que no hay deslizamiento, sino una adherencia del material sobre la superficie de la herramienta, también indica una superficie rugosa.

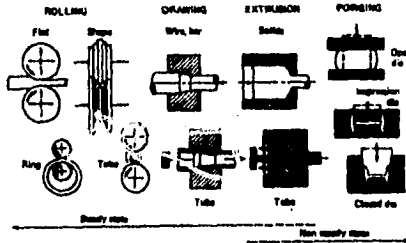


Fig. 1.17 Clasificación de los procesos de conformado en estado estacionario y estado no estacionario. Rolling = Rolado; Drawing = Estirado; Extrusion = Extrusión; Forging = Forjado. Steady State = Estado estacionario; Non Steady State = Estado No Estacionario

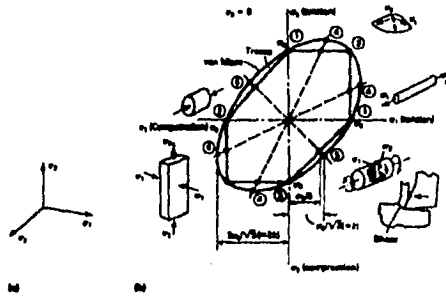


Fig. 1.18 Criterios de fluencia bajo diferentes estados de esfuerzos biaxiales.

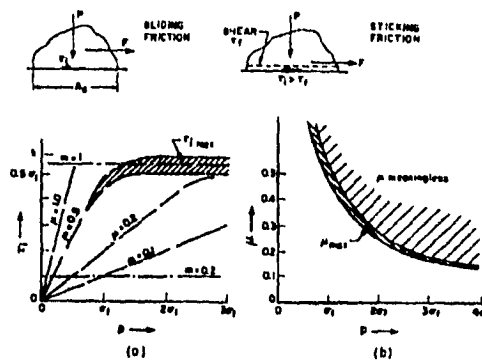


Fig. 1.19 a) Fuerzas de fricción localizadas en la superficie de contacto y b) Esfuerzo cortante en el interior de la pieza. Sliding Friction = Fricción Deslizante; Sticking Friction = Fricción Adherente; Shear = Corte; Meaningless = Sin Significado.

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DE LA FORMABILIDAD

2.1. ENSAYOS MECÁNICOS

Los ensayos mecánicos son métodos para determinar las propiedades y condiciones que involucran deformación, utilizados previo a un proceso de producción a gran escala, auxiliando en la comprensión del comportamiento que presentará el material.

Los ensayos a los que son sometidos la mayoría de los materiales, se realizan ya sea para obtener un control de calidad como rutina en un material comercial, para obtener información de algún material en estudio y/o en el desarrollo de nuevos materiales.

Dentro de éstos se puede realizar una subdivisión de los ensayos mecánicos, como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Subdivisión de los ensayos mecánicos

Ensayos Estáticos	Ensayos Dinámicos
Tensión Compresión Torsión Corte Dureza	Impacto Fatiga

A continuación se describirán en forma breve los ensayos utilizados frecuentemente para evaluar propiedades plásticas, tales como: tensión, compresión y torsión; haciendo hincapié en su aplicación a altas temperaturas. Actualmente existen referencias que tratan más ampliamente a los ensayos mecánicos con aplicaciones para el estudio del conformado de metales (1,2,20,22,23,24).

Se resaltaré el ensayo de Compresión Restringida por ser un ensayo poco difundido. No se puede decir que alguno de ellos sea mejor que otro, este factor estará en función de la aplicación que se requiera abordar.

2.1.1 ENSAYO DE COMPRESION

Los procesos para el conformado de metales son de gran importancia industrial debido a la baja resistencia a la deformación plástica y altas ductilidades que exhiben muchos metales a altas temperaturas homólogas. La alta rapidez de deformación, que es deseable por razones de economía y para minimizar la transferencia de calor, tiene el efecto de incrementar la resistencia a la deformación y en algunos casos disminuir la ductilidad. La sensibilidad a la rapidez de deformación del material y también la temperatura son parámetros importantes, particularmente cuando se intenta definirlos para procesos industriales. Estos parámetros de formabilidad del material, se pueden obtener utilizando el ensayo de compresión a alta temperatura.

La compresión a alta temperatura es muy adecuada para estudios de conformado en caliente, debido a que el estado de esfuerzos generado es similar a los encontrados en los procesos de deformación y básicamente sin inestabilidades como lo es la estricción. Los ensayos de compresión pueden ser muy simples o muy sofisticados, como por ejemplo se puede determinar la cantidad de deformación que induce el agrietamiento, o la curva completa esfuerzo-deformación.

Durante el ensayo, el incremento en área es inversamente proporcional a la disminución de altura y como consecuencia la carga para la deformación se incrementa rápidamente, por lo que se requiere de una máquina con gran capacidad. La fricción que se genera entre la probeta y las placas de la máquina a menos que sea cuidadosamente controlada, dará un efecto negativo en los resultados.

El ensayo de compresión a alta temperatura es de interés para determinar el comportamiento que tendrá el material con respecto a (1,25):

- Su resistencia al agrietamiento, es decir, la cantidad de deformación que el material puede soportar sin agrietarse, bajo condiciones conocidas de temperatura, rapidez de deformación y estado de esfuerzos.
- Su resistencia a la deformación, el esfuerzo requerido para causar que el material fluya bajo condiciones conocidas de deformación, rapidez de deformación y temperatura.

2.1.1.1 ABARRILAMIENTO

En la compresión axial simétrica, la fricción entre las placas de la máquina y la probeta conducen a una mayor concentración de la deformación en la sección media de la probeta, que en sus extremos (Fig. 2.1a). En ciertos casos, existen conos donde la deformación es nula en la superficie de contacto y la concentración de la deformación del material conduce al abarrilamiento (Fig. 2.1b). En el caso en que estos conos se acerquen y lleguen a tocarse entre sí, se promoverá un incremento en el esfuerzo conforme la deformación se incremente y la curva esfuerzo-deformación tenderá a cambiar de forma, como se muestra en la Fig. 2.1 (a) y (b)

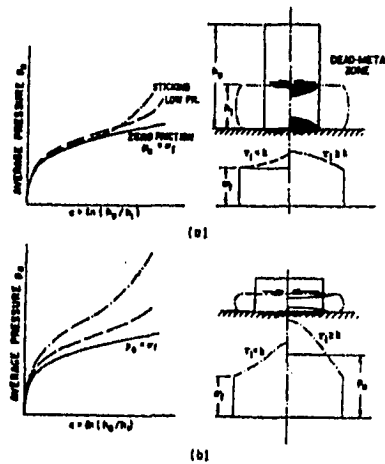


Fig. 2.1 Compresión axial simétrica, donde se muestra el comportamiento que tiene la curva esfuerzo deformación, causada por fricción.

Average Pressure = Presión Promedio

Sticking = Adherencia

Low Friction = Baja Fricción

Zero Friction = Sin Fricción

Dead Metal Zone = Zona Muerta .

La fricción se puede reducir utilizando lubricantes adecuados, como el teflón o el vidrio fundido o maquinando surcos circulares concéntricos en las caras de la probeta facilitando la retención del lubricante e incrementando su eficiencia. La fricción también se disminuye si se utilizan placas duras y pulidas, que pueden ser protegidas de la oxidación por medio de una atmósfera protectora. Con dichas técnicas es posible obtener deformaciones del orden de 0.7 sin que exista abarrilamiento y con deformaciones de 1.2, solamente un ligero abarrilamiento.

Cuando no existe fricción la carga de compresión uniaxial necesaria para producir fluencia es:

$$P = \sigma_o A \quad (2.1)$$

El esfuerzo de compresión verdadero ($\bar{\sigma}$), producido por esta carga (P) es:

$$\bar{\sigma} = \frac{4 P}{\sigma_o D^2} \quad (2.2)$$

y considerando la constancia en volumen:

$$\bar{\sigma} = \frac{4 P h}{\pi D_o^2 h_o} \quad (2.3)$$

donde:

D_o = Diámetro inicial de la probeta

h_o = Altura inicial de la probeta

h = Altura de la probeta a cualquier instante del ensayo

La deformación real o verdadera en compresión esta dada por:

$$\bar{\epsilon}_c = \ln \left[\frac{h_0}{h} \right] \quad (2.4)$$

o

$$\bar{\epsilon}_c(P) = \ln \frac{h(P)}{h_0} < < 0 \quad (2.5)$$

donde:

$h(P)$ = Altura de la probeta a la carga P

Durante el ensayo, la reducción en altura, esto es:

$$\bar{\sigma}(P) = h_0 - h(P) \quad (2.6)$$

es registrada, y a partir de la ecuación (2.4) se obtiene:

$$h(\bar{\epsilon}) = h_0 \exp - |\bar{\epsilon}| \quad (2.7)$$

La constricción debida a la fricción, incrementa el esfuerzo de flujo y actualmente se han propuesto fórmulas para esta corrección. La constricción disminuye conforme el diámetro se disminuye respecto a la altura, por esto el esfuerzo de flujo real puede encontrarse a partir de los esfuerzos de flujo de la probeta para diferentes diámetros extrapolarlo el diámetro a cero.

Cuando la altura de la probeta excede dos veces el diámetro, el problema experimental cambia del abarilamiento al pandeo o flexión.

2.1.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN PLANA

En el ensayo de compresión plana, la probeta tiene la forma de una lámina delgada y se comprime a través de su ancho con unas placas que son más anchas que la probeta, bajo estas condiciones se han logrado obtener deformaciones uniformes del orden de 2.3. La constricción elástica de los extremos sin deformar del material en cada lado de la lámina previene la extensión del ancho de la lámina, deformándose en las direcciones longitudinal y espesor (Fig. 2.2). El resultado es la formación de un entalle, con una extensión normal a las placas como si fuese laminado, que es también una forma de compresión en deformación plana. Como el área bajo las placas es constante, la carga total no se eleva tan rápidamente como en una compresión axisimétrica. Si la lubricación es insuficiente se forma una zona muerta en la probeta, cerca de la cara de cada placa. Conforme la reducción se incrementa, el efecto de la fricción aumenta (1,2).

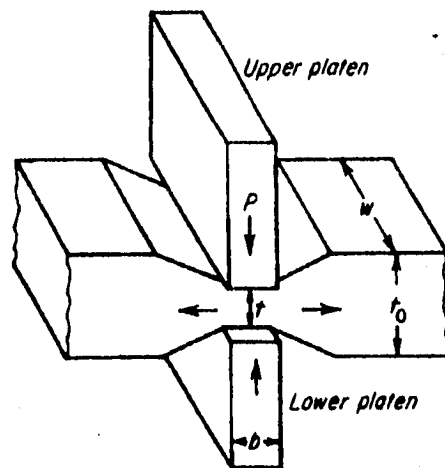


Fig. 2.2 Ensayo de compresión Plana
Upper Platten = Placa Superior
Lower Platten = Placa Inferior

Para asegurar la condición de deformación plana, el ancho de la lámina deberá ser al menos de 6 a 10 veces el ancho de las placas; la relación del ancho de las placas al espesor de la lámina (b/t) a cualquier instante deberá estar entre 2 y 4, y podría ser necesario cambiar las placas durante el ensayo para mantener esta condición.

El esfuerzo (σ_{cp}) y la deformación (ϵ_{cp}) en el ensayo de compresión plana se puede determinar con las expresiones:

$$\sigma_{cp} = \frac{P}{wb} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_{cp} = \ln \frac{t_0}{t} \quad (2.9)$$

y la relación con el ensayo de compresión uniaxial queda establecida con:

$$\sigma_{cp} = 1.15 \sigma_{cu} \quad (2.10)$$

$$\epsilon_{cp} = \frac{\epsilon_{cu}}{1.15} \quad (2.11)$$

el esfuerzo en compresión plana es un 15% mayor que en compresión uniaxial, no así las deformaciones.

2.1.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN RESTRINGIDA

Es un nuevo ensayo que mide la susceptibilidad de un material al flujo localizado, mediante un parámetro empírico, llamado Distributed Gage Volume (% DGV). Se utiliza una probeta con una sección reducida para simular la producción de forjas con geometrías complejas (26).

Los productos de forja con geometrías complejas, frecuentemente desarrollan regiones de alta deformación localizada. Estas regiones son reveladas por líneas de flujo, diferencias en tamaño de grano, gradientes en dureza, y/o bandas de corte, que quizás, el ejemplo más extremo de la deformación localizada son las bandas de corte adiabáticas. Las bandas de corte adiabáticas se desarrollan bajo condiciones de alta rapidez de deformación cuando el calor generado por la deformación local no es disipado. Como resultado, el esfuerzo de flujo local disminuye y promueve el flujo localizado. Las bandas de corte pueden extenderse en toda la sección transversal de un producto de forja, y en algunos casos, puede estar asociado con una falla catastrófica por corte o un agrietamiento. En vista de los efectos potencialmente perjudiciales de la deformación localizada y formación de bandas de corte adiabáticas es necesario evaluar la susceptibilidad a la localización de la deformación durante el proceso de forja de las aleaciones en varios estados microestructurales.(25) Frecuentemente la forjabilidad se evalúa con el ensayo de compresión uniaxial de probetas cilíndricas entre placas planas.

El objetivo de este ensayo es identificar las condiciones de operación y propiedades del material que resultan en una fractura; sin embargo, las probetas cilíndricas no consideran o simulan las diferencias en el tamaño de la sección que pueden localizar la deformación y afectar el flujo de forjas con geometrías complejas, por lo que el método alternativo es el ensayo de compresión restringida, que ofrece un medio valioso de caracterizar al material y las condiciones de conformado, con las que se podrá minimizar la heterogeneidad que se obtiene normalmente en piezas con formas complejas por medio de forja.

El flujo localizado y la formación de bandas de corte están relacionadas a la recuperación dinámica, a la recristalización dinámica y a la precipitación inducida por la deformación.

2.1.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

La Fig. 2.3 muestra esquemáticamente la probeta para el ensayo de compresión restringida. La probeta cilíndrica tiene una sección reducida donde se concentra la deformación durante la compresión. La ventaja de la probeta es que la susceptibilidad de un material al flujo localizado o inversamente, su habilidad para distribuir la deformación se puede medir por el parámetro empírico %DGV.

El parámetro mide la fracción del volumen inicial de la sección reducida que penetra en los extremos de la probeta; como se muestra por las zonas sombreadas en la Fig. 2.4.

Una gran habilidad para distribuir la deformación resultará en una mayor penetración y altos valores del % DGV. Por ejemplo la sección de referencia endurece por deformación durante la compresión, tiende a deformarse o penetrar en los extremos de la probeta, que se extiende lateralmente para acomodar la penetración, (Fig 2.4a). La extensión lateral, es pequeña y como resultado, la fricción interfacial entre dado y probeta ejerce poca influencia sobre el patrón de deformación de la sección reducida.

A la inversa, si la sección reducida no endurece o se ablanda por deformación, la deformación será localizada o concentrada en el área sombreada y el % DGV será bajo (Fig. 2.4b).

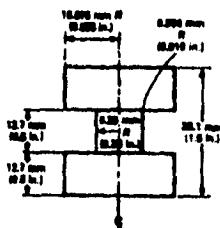


Fig. 2.3 Dibujo de la probeta de compresión restringida, mostrando sus dimensiones y forma

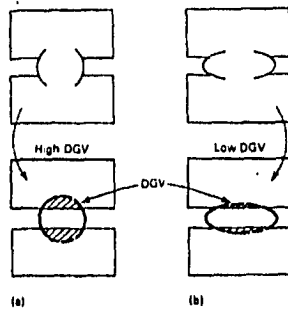
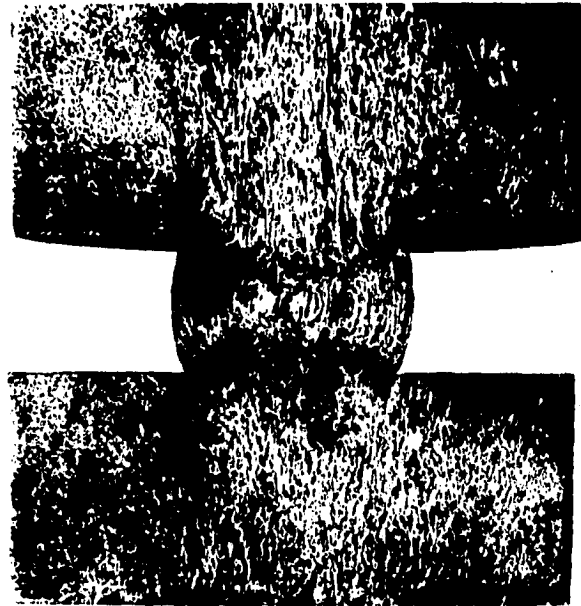


Fig. 2.4 Dibujo esquemático de la probeta de compresión restringida, mostrando el volumen relativo penetración en las cabezas del espécimen: a) Deformación Distribuida y b) Deformación Concentrada.



La Fotografía 2.1 muestra el macroataque que exhibe el fenómeno anterior.

2.1.3.2 CALCULO DEL % DGV

El %DGV, se obtiene con la ecuación :(25)

$$\%DGV = \frac{V_o - V_f}{V_o} \times 100 \quad (2.12)$$

donde:

V_o = Volumen inicial de la sección reducida
 V_f = Volumen final de la sección reducida

El volumen final (V_f) se determina sumando los volúmenes del cilindro (V_{cil}), y del anillo del sector anular curvo (V_{an}), como se muestra en la Fig. 2.5

El área se calcula con la ecuación:

$$A = \frac{1}{2} [0.01745 r_c^2 \alpha - C (r_c - h)] \quad (2.13)$$

donde:

C = Altura final de la sección reducida
 r_c = Radio de curvatura de la sección reducida abarilada

La altura de la sección curva (h) se calcula con:

$$h = r_c - \frac{1}{2} [4 r_c^2 - C^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

el ángulo subtendido (α) por el segmento, se calcula de:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{(r_c - h)}{r_c} \quad (2.15)$$

El radio de rotación (B), se obtiene de:

$$B = r_b - (r_c - b) \quad (2.16)$$

donde:

r_b = Radio máximo de la sección reducida abarrilada
 b = Distancia del centro de gravedad al centro del círculo,
 y se obtiene a partir de:

$$b = \frac{C^3}{12A} \quad (2.17)$$

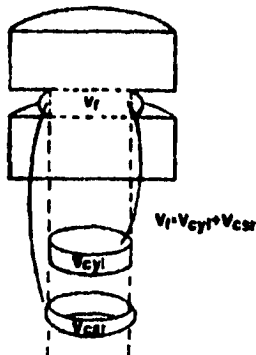
El volumen del sector curvo (V_{csr}) se calcula por rotación como:

$$V_{csr} = 2\pi AB \quad (2.18)$$

y el volumen del cilindro (V_{cil}) se determina con:

$$V_{cyl} = C\pi (r_b - h)^2 \quad (2.19)$$

(a) FINAL GAGE VOLUME (V_f)



(b) Vcsr CALCULATION

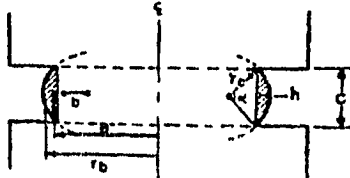


Fig. 2.5 Dibujo esquemático de la geometría de la probeta para el cálculo del porcentaje del volumen distribuido (%DGV) ; Final Gage Volume = Volumen Final Calibrado

al sumar estos volúmenes (V_{cil} y V_{car}) se obtiene el volumen final (V_f) y entonces el % del DGV se puede calcular con la ecuación 2.12.

Se manifiestan cambios en el %DGV con la temperatura y se explican por la cantidad relativa de endurecimiento en las cabezas de la probeta. Por ejemplo a bajas temperaturas los procesos de ablandamiento como la recuperación dinámica y la recristalización son inhibidos y la sección considerada se endurece más con la deformación relativa de las cabezas de la probeta. Deformación subsecuente se distribuye en los extremos de la sección reducida de la probeta. Sin embargo a altas temperaturas los procesos de ablandamiento son más competitivos con los de endurecimiento y el área considerada no puede endurecerse tan efectivamente.

Como resultado, la deformación es concentrada en el área considerada y el %DGV es bajo. La proporción exacta del ablandamiento atribuible a la recuperación dinámica y la recristalización, aún no ha sido determinada por la infinidad de factores involucrados.

2.1.4 ENSAYO DE TORSIÓN

El ensayo de torsión normalmente es utilizado para obtener datos sobre las propiedades de flujo y fractura en metales trabajados en caliente, esto es, $T > 0.6T_M$ y rapidez de deformación superiores a 10^3 s^{-1} , como es mucho más fácil variar y controlar la velocidad de rotación se dispone de un amplio intervalo en rapidez. Más aún, con un adecuado control de temperatura y rapidez de deformación es posible simular estructuras metalúrgicas producidas en procesos como en laminación. Debido a que la probeta no presenta estricción como en tensión o abarrilamiento como en compresión, es posible obtener grandes deformaciones plásticas (1,4,20,22).

La deformación de corte (γ), está dada por (Fig. 2.6):

$$\gamma = \tan\phi = \frac{r\theta}{L} \quad (2.20)$$

donde:

r = Distancia radial medida desde el centro de la probeta

θ = Angulo de torsión

L = Longitud de la probeta

y el esfuerzo cortante (τ):

$$\tau = \frac{M_T r}{J} \quad (2.21)$$

donde:

τ = Esfuerzo de corte

M_T = Momento torsional

r = Distancia radial medida del centro de la barra

J = Momento polar de inercia

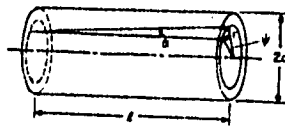


Fig. 2.6 Ensayo de torsión en una barra sólida

Debido a que el esfuerzo de corte es máximo en la superficie de la barra, donde $J = \pi D^4/32$, el máximo esfuerzo de corte está dado por:

$$\tau_{\max} = \frac{16 M_T}{\pi D^3} \quad (2.22)$$

Para una probeta tubular el esfuerzo de corte sobre la superficie externa es:

$$\tau = \frac{16 M_T D_1}{\pi (D_1^4 - D_2^4)} \quad (2.23)$$

donde:

D_1 = Diámetro exterior

D_2 = Diámetro interior

Durante el ensayo, se obtienen mediciones del momento de torque y del ángulo de giro. El diagrama que se obtiene se muestra en la Fig. 2.9.

A pesar de las diferencias en los estados de esfuerzo en el ensayo de torsión y aquellos procesos de trabajado en caliente, la ductilidad torsional muestra ser una buena medida para propósitos prácticos, se le ha utilizado para seleccionar aleaciones y determinar las condiciones optimas para procesos de deformación plástica.

Durante el ensayo, la rapidez de deformación y la deformación varían desde cero en el centro hasta un valor máximo en la superficie de la probeta. Los valores superficiales obtenidos son los que normalmente se reportan. Esta variación produce un aumento en los problemas de interpretación, debido a que el trabajo superficial endurece más que en el centro, y los mecanismos de deformación son muy diferentes. Sin embargo la mayoría de los experimentos de torsión han empleado probetas sólidas y normalmente se usa una corrección para calcular el esfuerzo de flujo a partir del torque.

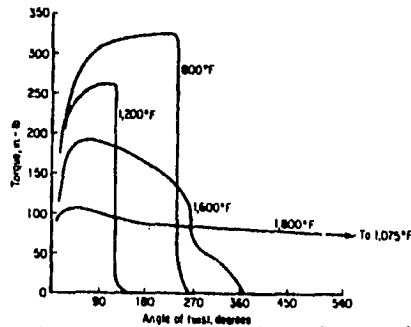


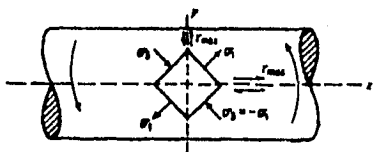
Fig. 2.7 Diagrama que muestra el comportamiento obtenido en el ensayo de torsión.
 Angle of Twist = Ángulo de Giro
 Torque = Torsión

En ensayos como en la compresión, la deformación calienta la zona deformada, por lo que hace que se localicen la deformación y rapidez de deformación, produciendo bajas ductilidades, esto es, el material disminuye su resistencia debido al incremento de temperatura en puntos localizados. Cuando los esfuerzos de corte y deformaciones son transformadas a sus equivalentes esfuerzos tensiles y deformaciones acordes al criterio de Von Mises, las curvas de flujo de torsión son casi idénticas a las curvas de flujo de tensión o compresión para la misma rapidez de deformación y temperatura. La interdependencia sobre la rapidez de deformación superficial, el esfuerzo efectivo y la temperatura es la misma que para los ensayos de compresión y tensión.

2.1.4.1 TIPOS DE FALLAS EN TORSIÓN

En la Fig. 2.8, se muestra el estado de esfuerzos en un punto superficial en una barra sujeta a torsión, el máximo esfuerzo de corte ocurre sobre dos planos perpendiculares al eje longitudinal

yy, y paralelos al eje longitudinal xx, los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 hacen un ángulo de 45° con respecto al eje longitudinal y son iguales en magnitud a los esfuerzos de corte, ($\sigma_2 = 0$)



(a)

(b)

Fig.2.8 Estado de esfuerzos en un punto sobre la superficie de una probeta sometida a torsión, y tipo de falla en materiales dúctiles (a), y materiales frágiles (b)

Las fallas en torsión son diferentes a partir de fallas tensiles en donde hay poca reducción localizada de área o elongación. Un metal dúctil fallará por corte a lo largo de uno de los planos de máximo esfuerzo de corte, generalmente el plano de fractura es normal al eje longitudinal (Fig 2.8a), materiales frágiles fallarán a lo largo del plano perpendicular a la dirección del máximo esfuerzo tensil debido a que este plano bisecta en ángulo entre los dos planos de máximo esfuerzo de corte y hace un ángulo de corte con las direcciones longitudinales y transversales, por lo que resultará una fractura helicoidal (fig 2.8b).

2.1.4.2 SIMULACIÓN DEL PROCESO INVOLUCRANDO MÚLTIPLES DEFORMACIONES

En los ensayos de torsión, la rapidez de deformación es fácilmente alterada cambiando la velocidad de rotación, y es posible obtener velocidades desde 10^{-2} a 10^2 s^{-1} . La rapidez de deformación puede ser cambiada durante el ensayo para estudiar la interrelación de la estructura deformada a la rapidez de deformación y el esfuerzo de flujo. La deformación también puede ser interrumpida y reiniciada para estudiar los efectos del recocido en la estructura.

Estas técnicas han sido utilizadas para simular procesos con multipasos, tales como el laminado de planchones y la laminación continua para tener la posibilidad de estudiar los efectos de la temperatura inicial, la reducción por paso, la velocidad de enfriamiento final, etc.

Más aún, debido a que esfuerzos axiales pueden ser aplicados durante el ensayo, es posible simular en cierta medida los complejos esfuerzos presentes en procesos tales como extrusión o el trefilado de tubo.

2.1.5 ENSAYO DE TENSIÓN

El ensayo de tensión, realizado a temperatura ambiente ha tenido útiles resultados en lo que respecta a las aplicaciones para caracterizar a los materiales, pero aún con el equipo necesario con amplia disponibilidad y la técnica bien desarrollada, el ensayo de tensión no es del todo adecuado para los estudios del conformado a alta temperatura. Esto se debe a: (a) la rapidez de deformación producida es muy baja y disminuye durante el ensayo y (b) debido a la inestabilidad plástica (estricción) y la fractura es difícil obtener grandes deformaciones plásticas (Fig. 2.9) (1,2,4,20,22).

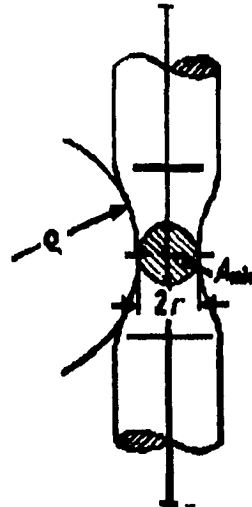


Fig. 2.9 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión a alta temperatura es útil para determinar las temperaturas mínima y máxima de un proceso de conformado a alta temperatura, que es una de las etapas más críticas del proceso, así como los parámetros del proceso como lo es la ductilidad y resistencia, que deben ser medidos en función de la temperatura; además el ensayo ayuda a comprender el comportamiento de un metal o aleación bajo condiciones de alta temperatura durante la forja o laminación, mediante la respuesta a las deformaciones tensiles, a la rapidez de deformación impuestas por el proceso. Consecuentemente, la principal ventaja del ensayo de tensión a alta temperatura, es la de simular la condición de los estado de esfuerzos y deformaciones que promueven el agrietamiento de muchas operaciones metal-mecánicas industriales.

La reducción de área es una medida de la deformación en la estricción, y por lo tanto indica la habilidad de la aleación a soportar la propagación de una grieta. Proporciona una útil información concerniente con la formabilidad debido a que muchas de las superficies de las piezas son relativamente rugosas y contienen muchos sitios de nucleación de grietas. Por lo tanto, conocer la resistencia a la propagación de una grieta de un material es importante en definir parámetros adecuados del conformado a alta temperatura.

Puesto que la reducción del área es la propiedad más sensible a la estructura, es adecuada para detectar pequeñas variaciones en ductilidad de materiales de baja a moderada ductilidad tales como aceros especiales y superaleaciones.

2.1.5.1 INESTABILIDAD PLÁSTICA

La inestabilidad plástica mostrada como una estricción (o "cuello"), es peculiar en el ensayo tensil, y ocurre cuando al aumentar la resistencia debido al endurecimiento por deformación en una zona localizada, se hace insuficiente para compensar la constante disminución del área transversal.

La estricción limita la deformación uniforme para deformaciones menores del 0.3 lo que es mucho menor, para las deformaciones obtenidas en conformado en caliente, y es frecuentemente menor que el requerido para el inicio del régimen del estado estacionario. En la estricción, la rapidez de deformación se incrementa y se hace no uniforme, y la temperatura también puede elevarse debido al trabajo de deformación. Por esto el esfuerzo de flujo y la rapidez de deformación calculados sobre la base de deformación uniforme, no son del todo muy válidos. Más aún usualmente no es posible el hacer correcciones basadas sobre el radio de la estricción instantánea, debido a que no se puede medir en un ensayo típico porque el horno hace imposible esta operación, además la velocidad a la que se produce este efecto es muy alta.

El crecimiento de la estricción se puede eliminar cuando el ensayo tensil se realiza con pequeñas

deformaciones simulando un proceso de multipasos, siempre y cuando que en estos períodos en donde la carga se hace cero, ya sea que la recrystalización o la recuperación restauren la rapidez del endurecimiento por deformación cuando la deformación se reanuda.

En materiales dúctiles, la elongación es una medida pobre o poco útil en la deformación posible al procesar el material, debido a que la inestabilidad en un ensayo de tensión simple no se presenta en el conformado a alta temperatura. La reducción del área nos da una mejor medida de la ductilidad, debido a que está directamente relacionada a la deformación en la región de fractura. Sin embargo la fractura tensil final, que ocurre por la coalescencia de poros y fisuras bajo el esfuerzo tensil hidrostático, es diferente a la fractura obtenida en los procesos de conformado, donde la tensión hidrostática no existe. El efecto neto de los factores antes mencionados es que, mientras no exista una correlación exacta entre la tensión y procesos dúctiles, las variaciones en la tensión dúctil con la temperatura son similares a las variaciones de formabilidad.

2.1.5.2 RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN

El ensayo de tensión normal tiene una máxima rapidez de deformación de aproximadamente 10^{-1} s^{-1} ($\approx 10\%$ por seg) que es aproximadamente una milésima de la rapidez de procesos de conformado comunes. Con una velocidad constante de la cruceta, la rapidez de deformación disminuye conforme la probeta se alarga (Ec. 2.7). Sin embargo en la estricción, la rapidez de deformación se incrementa en más de 20 veces de la rapidez nominal, conforme la constricción se hace más severa. Por esto en los ensayos aún conducidos a rapidez de deformación nominal constante, la rapidez de deformación en la constricción se incrementa continuamente, causando que el esfuerzo de flujo se incremente.

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 ACERO EXAMINADO

El material bajo estudio fue el acero AISI 1045F, con una presentación en forma de barra de 31.75 mm² de diámetro para el ensayo de compresión restringida y de 12.7 mm² para el de compresión uniaxial. La fabricación de este acero es a través de la ruta convencional: arrabio en el alto horno, acero en el horno de arco eléctrico, colada en lingotes y laminación hasta las dimensiones finales. El acero AISI 1045F está clasificado dentro del grupo de aceros de medio contenido de carbono. Los aceros de este grupo son seleccionados para usos en donde se requieren altas propiedades mecánicas, y que se obtienen frecuentemente por tratamiento térmico y/o deformación en frío; por esta razón tiene una amplia aplicación en la Industria Metal - Mecánica para la obtención de piezas forjadas en frío o en caliente de gran precisión, además presenta las características metalúrgicas para endurecerlo superficialmente por inducción o a la flama (27).

La composición química y las propiedades mecánicas del acero examinado se enlistan en las Tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1 Composición del Acero AISI 1045F (% en peso*)

%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Cu	%S	%P
0.52	0.88	0.26	0.013	0.017	0.016	0.026	0.010

Análisis por Espectroscopia de Emisión, realizada en los laboratorios de AHMSA

Tabla 3.2 Propiedades Mecánicas

Esfuerzo tensil	617.77 MPa
Esfuerzo de fluencia	377.53 MPa
% Ductilidad	27
% Reducción de área	54

+Datos proporcionados por AHMSA

3.2 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

Las microestructuras asociadas al acero AISI 1045F fueron caracterizadas antes de iniciar el ensayo, cuya condición corresponde a un acero normalizado y después de la deformación plástica. Su caracterización fue realizada con las técnicas de Metalografía Óptica y Determinación del Tamaño de Grano de acuerdo a la norma NOM - E112 (28,29) el reactivo de ataque utilizado fue el nital 3 y el análisis se realizó con un microscopio metalográfico MG Olympus. Las Figs. 3.1 y 3.2 muestran la microestructura del acero en condición inicial en la dirección transversal y longitudinal, respectivamente y revela el siguiente detalle microestructural:

- a) Una fase de ferrita poligonal
- b) Perlita con una morfología laminar
- c) El diámetro promedio es grano fue de 10 (NOM - E112)

Para el ensayo de compresión uniaxial se eligió una relación de h/d (altura/diámetro) igual a 1.5, para minimizar efectos de fricción y flexión axial (30). Para el ensayo de compresión restringida las probetas tuvieron las dimensiones originales (26). Las dimensiones de las probetas fueron medidas antes y después del ensayo con un comparador óptico marca Werth, en los Laboratorios del Sistema de Transporte Colectivo, Metro.

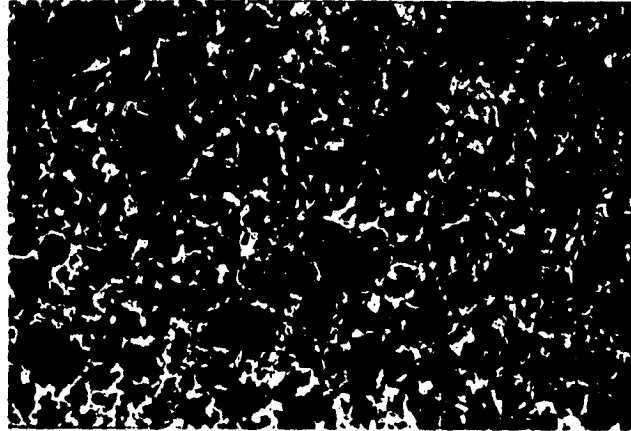


Fig.3.1 Microestructura del acero AISI 1045F, en condición de normalizado antes de iniciar el ensayo, región transversal de la barra.

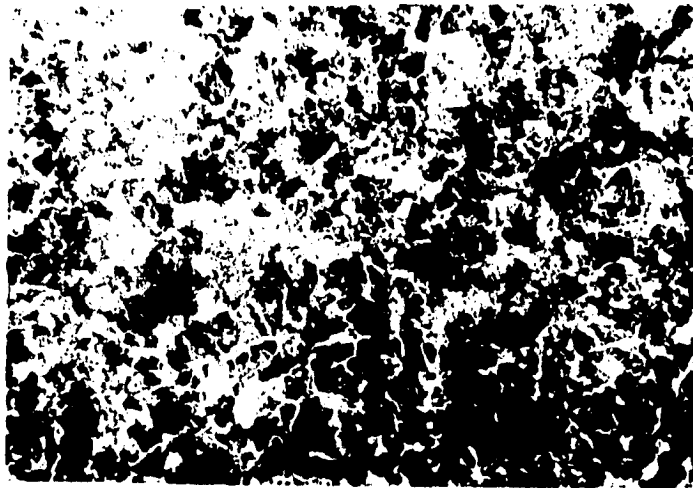


Fig.3.2 Microestructura del acero AISI 1045F , en condición de normalizado antes de iniciar el ensayo, toma longitudinal de la barra.

3.3 CONDICIONES DEL ENSAYO

Los ensayos se efectuaron a las temperaturas de 850, 950 y 1050 °C; a las rapidezces de deformación nominal de 1, 10 y 100 s⁻¹ en condiciones no isotérmicas para evaluar la resistencia a la deformación plástica, la resistencia a la fractura y la tendencia al flujo plástico localizado, como una función de la temperatura, rapidez de deformación y deformación.

Las probetas se mantuvieron por espacio de 15 minutos a la temperatura de ensayo y para protegerlas de la oxidación fueron previamente cobrizadas; el tiempo utilizado para transferir las probetas a la máquina y realizar el ensayo fue en promedio de 5 segundos, de manera que las pérdidas de calor no resultaron significativas. Se utilizaron dos insertos de acero 5160 en las mordazas como placas de compresión previamente tratados térmicamente para que soportaran las cargas, así mismo se precalentaban antes de realizar cada ensayo a una temperatura aproximada de 400 °C para minimizar el choque térmico con la probeta.

Para la construcción de la curva de flujo, se comprimieron 7 probetas a diferentes alturas por duplicado para asegurar reproducibilidad en el método de ensayo, registrando en cada caso la carga aplicada. Los cálculos de los esfuerzos, deformaciones y del parámetro DGV, se obtuvieron con el programa listado en el Apéndice I. Se utilizaron las siguientes ecuaciones básicas: para los esfuerzos:

$$\sigma = \frac{4 P}{\pi D^2} \quad (3.1)$$

donde D se calculó de acuerdo a :

$$D = D_{\max} - \frac{D_{\max} - D_{\min}}{3} \quad (3.2)$$

para las deformaciones:

$$\bar{\epsilon} = \ln \frac{h}{h_0} \quad (3.3)$$

y para el parámetro DGV, las ecuaciones mostradas en el Capítulo II.

Se obtuvieron grados de deformación efectiva hasta un 120% y esfuerzos del orden de 400 MPa.

3.4 SISTEMA DE PRUEBAS MECÁNICAS

Los ensayos se realizaron en una máquina servohidráulica MTS Modelo 810 con capacidad para 250 KN (25 Ton), mostrada en la Fig. 3.3. El sistema se compone de los siguientes elementos principales: la consola, el marco de carga y la unidad de potencia hidráulica (31).

El sistema proporciona una rápida y fácil ejecución de los ensayos, así como una reproducibilidad del método de ensayo. El control programable del sistema permite obtener condiciones de esfuerzos y rapidez de deformación comparables con las obtenidas en procesos termomecánicos industriales (32,33,34,35).

Para programar la máquina y obtener el intervalo de rapidez de deformación de interés, se seleccionó la función triangular que permite un pico claramente definido con un cambio rápido en dirección, permitiendo con ello un fácil y rápido registro de las cargas aplicadas y ejecución de los ensayos. El parámetro controlado con la función triangular fue el recorrido del actuador.

A su vez, la función triangular se generó a través de la función rampa con una doble pendiente. La primera pendiente permitió determinar la rapidez de deformación y la segunda pendiente fue utilizada para regresar al actuador a su posición inicial (36).

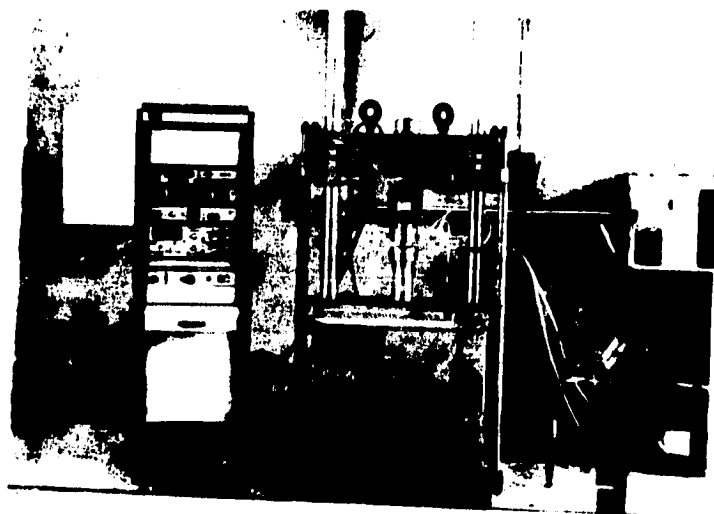


Fig. 3.3 Máquina MTS Servohidráulica, utilizada para realizar los ensayos de compresion.

Las condiciones para realizar los ensayos de compresión uniaxial y compresión restringida fueron las siguientes:

Rampa invertida con doble pendiente (Ramp Invert, Dual Slope),

Punto de cambio de pendiente reverso (Break Point Reverse),

Recorrido del actuador de 100 mm (Stroke),

Tiempo de la segunda pendiente: 1×10 (Rate 2)

La rapidez de la primera pendiente fue la única que varió debido a que es la que determina la rapidez de deformación y se obtuvo de la siguiente relación:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h} \quad (3.4)$$

donde:

$\dot{\epsilon}$ = rapidez de deformación

d = recorrido del actuador

t = tiempo asociado a la primera pendiente de la rampa

v = velocidad del actuador

h = altura de referencia de la probeta

En la Tabla 3.3 se muestra el tiempo asociado a la primera pendiente y la velocidad del actuador para cada ensayo.

Tabla 3.3 Tiempo asociado a la primera rampa y velocidad del actuador para cada ensayo

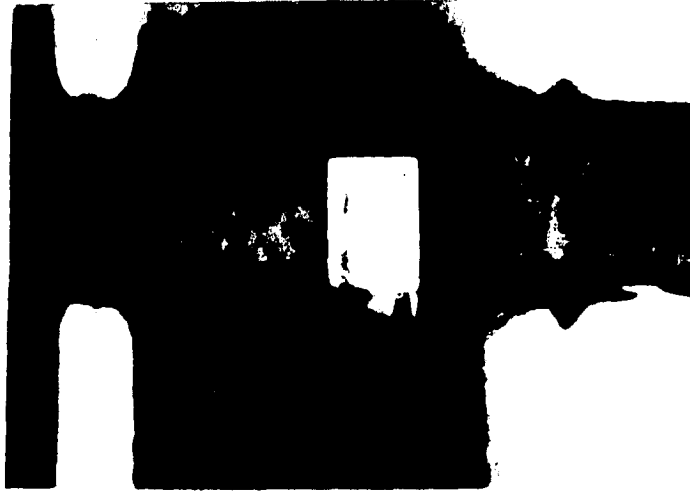
Rapidez de Deformación	Compresión Uniaxial		Compresión Restringida	
	ϵ (s ⁻¹)	Rampa (s)	Velocidad del actuador (m/s)	Rampa (s)
1	5.2×10^0	0.019	7.8×10^0	0.012
10	5.2×10^{-1}	0.19	7.8×10^{-1}	0.12
100	5.2×10^{-2}	1.9	7.8×10^{-2}	1.2

La máquina una vez programada, fue capaz de simular el comportamiento de una máquina para forja, particularmente el de una prensa hidráulica.

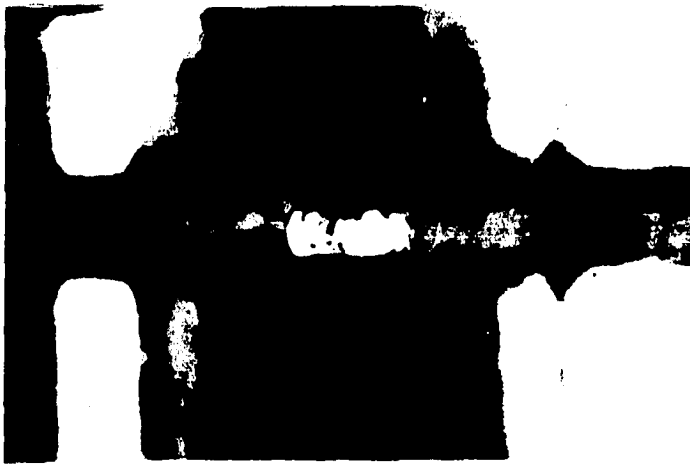
La prensa hidráulica se caracteriza por (37,38):

- Una simple operación basada en el movimiento de un pistón
- Es una máquina restringida en carga, es decir, su capacidad para realizar una operación de conformado esta limitada principalmente por la carga máxima disponible
- Proporciona energías relativamente grandes para la deformación

La Fig. 3.4 (a) muestra el momento del inicio del ensayo, con la probeta de compresión, aún sin sufrir deformación alguna, y la Fig. 3.4 (b) presenta la probeta después de la deformación respectiva; las Figs. 3.5 (a) y 3.5 (b) muestran las probetas en el ensayo de compresión restringida.

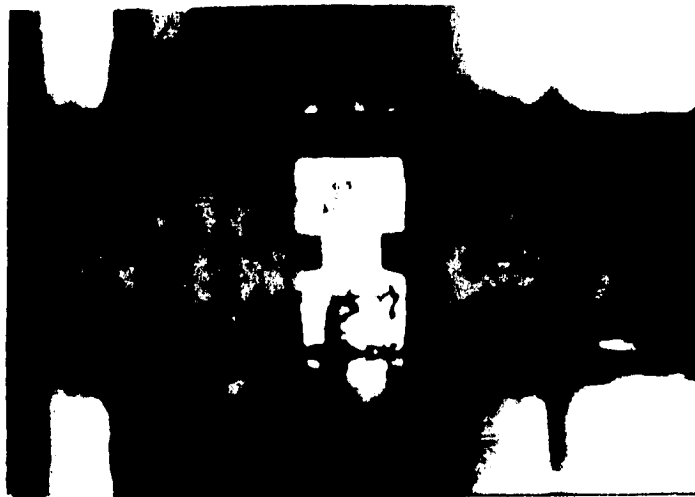


(a)



(b)

Fig 3.4 Ensayo de compresión uniaxial, a) probeta antes del ensayo, b) probeta deformada



(a)



(b)

Fig 3.5 Ensayo de compresión restringida, a) probeta antes del ensayo, b) probeta deformada

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

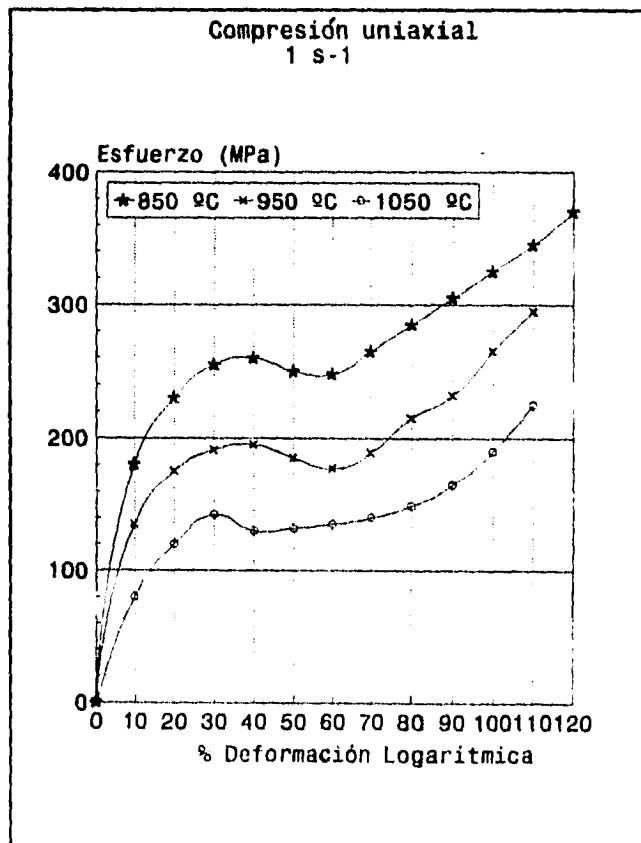
4.1 COMPORTAMIENTO A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

4.1.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIAXIAL

Las Figs. 4.1 a 4.3 muestran las curvas de flujo en función de la temperatura y rapidez de deformación. En todos los casos se observa:

- Al aumentar la temperatura disminuye la curva de flujo.
- La curva de flujo alcanza un pico o máximo en el intervalo del 30 al 50% de deformación y una subsecuente caída en el esfuerzo.
- El pico de la curva de flujo está influenciada por la temperatura y la rapidez de deformación.
- Después del pico, la curva de flujo presenta una meseta, que en la mayoría de los casos es de una baja extensión, manifestación de un estado estacionario.
- Después de la meseta la curva de flujo se vuelve ascendente, debido a que el material ofrece una resistencia adicional conforme se comprime.

Fig. 4.1 Curvas de flujo para los ensayos realizados a una rapidez de deformación de 1 s^{-1}



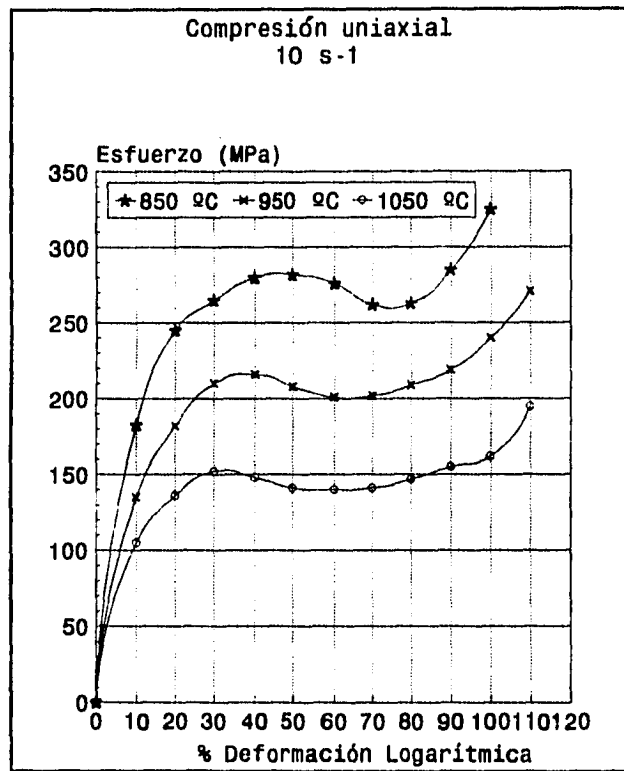
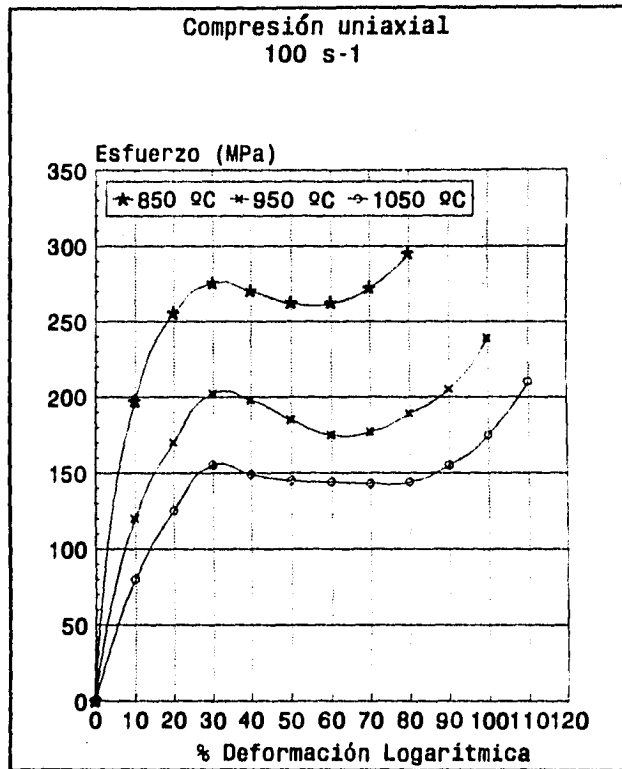


Fig. 4.2 Curvas de flujo para los ensayos realizados a una rapidez de deformación de 10 s⁻¹

Fig. 4.3 Curvas de flujo para los ensayos realizados a una rapidez de deformación de 100 s^{-1}



La presencia del pico o máximo en el esfuerzo es indicativo de que el material sufre una recristalización dinámica, y está asociada a un valor de deformación llamada "deformación crítica para la recristalización" (ϵ_c), en donde ocurre la nucleación de nuevos granos libres de deformación. El mecanismo de la recristalización dinámica explica la disminución del esfuerzo de flujo con incremento de la temperatura o disminución de la rapidez de deformación. A altas temperaturas de ensayo ($> 0.6T_f$), el acero presenta una estructura austenítica que se caracteriza por una baja energía de falla de apilamiento (EFA) y un alto grado de recristalización dinámica. (1,2,3)

El ascenso de la curva de flujo después de la baja extensión de la meseta, al incrementar el esfuerzo, se debe a que al comprimir la probeta, las zonas muertas se van aproximando y al traslaparse originan un incremento en la carga para deformar, elevándose la curva de flujo. (4)

La Fig. 4.4 muestra un juego de probetas comprimidas. La Fig. 4.5 revelan las líneas de flujo plástico obtenidas durante el ensayo, mostrando a simple vista las zonas de alta y baja deformación, y las zonas muertas generadas. Estas líneas de flujo plástico son producidas por el estado de esfuerzos inherente al ensayo y a las condiciones de alta fricción entre las probetas y las placas de compresión. Las líneas de flujo plástico son más marcadas cuanto mayor es la deformación, no se observa agrietamiento en las probetas ensayadas.

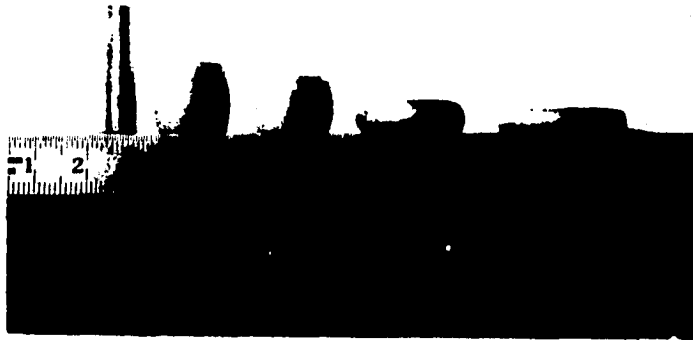
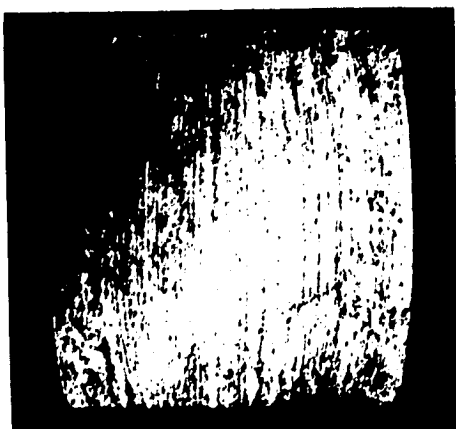
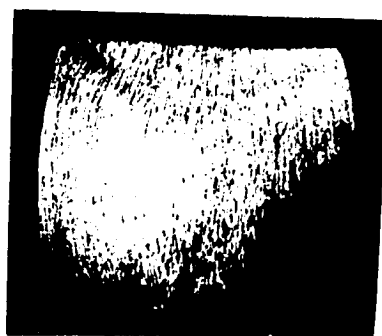


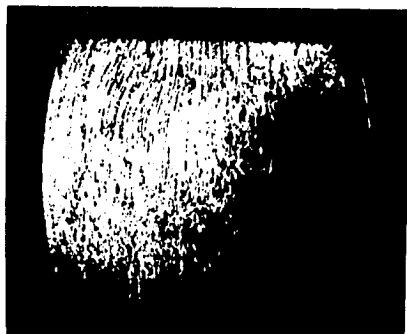
Fig. 4.4 Conjunto de probetas comprimidas, a diferentes grados de deformación, en orden ascendente 32%,39%,83% y 120% respectivamente de izquierda a derecha



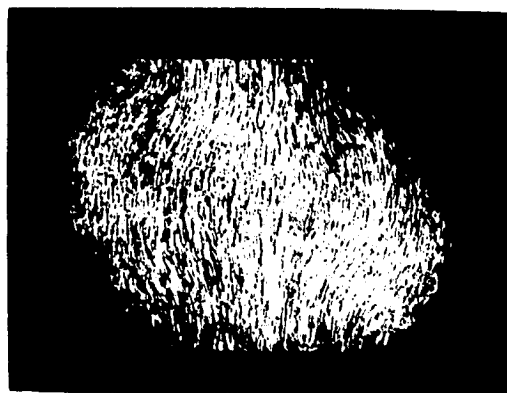
a) 25 %



b) 31 %

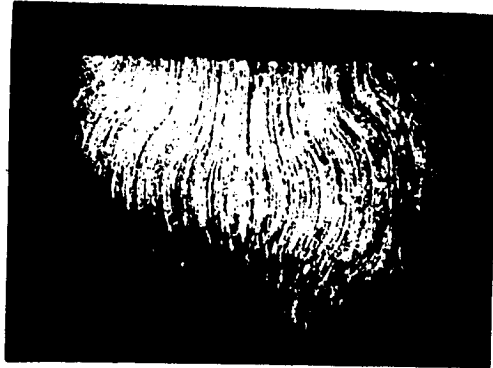


c) 39 %

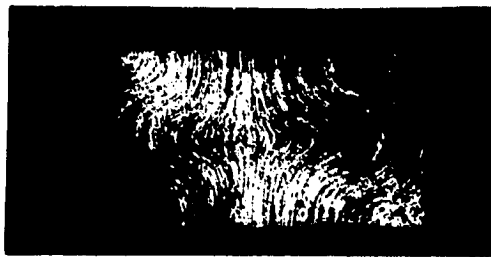


d) 47 %

Fig. 4.5 Macrograffas revelando líneas de flujo plástico a diferentes grados de deformación.



e) 54 %



f) 84 %



g) 120 %

Fig. 4.5 Macrografías revelando líneas de flujo plástico a diferentes grados de deformación. se observa el desarrollo de las zonas muertas conforme la deformación se incrementa.

La Fig. 4.6 muestra el efecto de la rapidez de deformación sobre el esfuerzo de flujo considerando una deformación de 0.6 (60%), observándose los siguientes puntos:

- a) En general, el esfuerzo de flujo disminuye con el incremento de la temperatura, en el intervalo de rapidez de deformación utilizadas.
- b) A la rapidez de deformación de 10 s^{-1} , el esfuerzo de flujo, es de mayor valor para el intervalo de temperaturas de ensayo, debido a las condiciones no isotérmicas durante el ensayo.
- c) A la temperatura de ensayo de 1050 °C , el esfuerzo de flujo tiende a un valor en común, para el intervalo de rapidez de deformación utilizado, debido principalmente a que a esta temperatura el acero se hace menos sensible al grado de deformación.

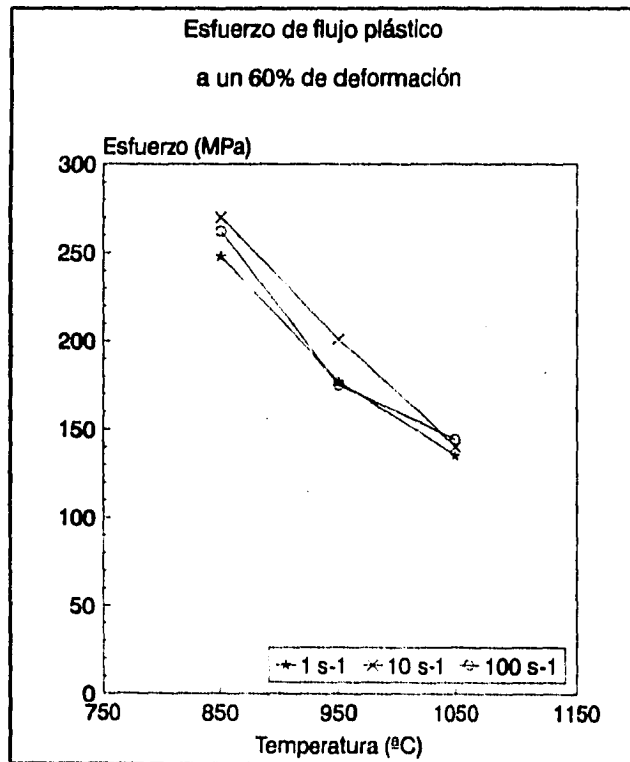


Fig. 4.6 Efecto de la rapidez de deformación sobre el esfuerzo de flujo a un 60% de deformación

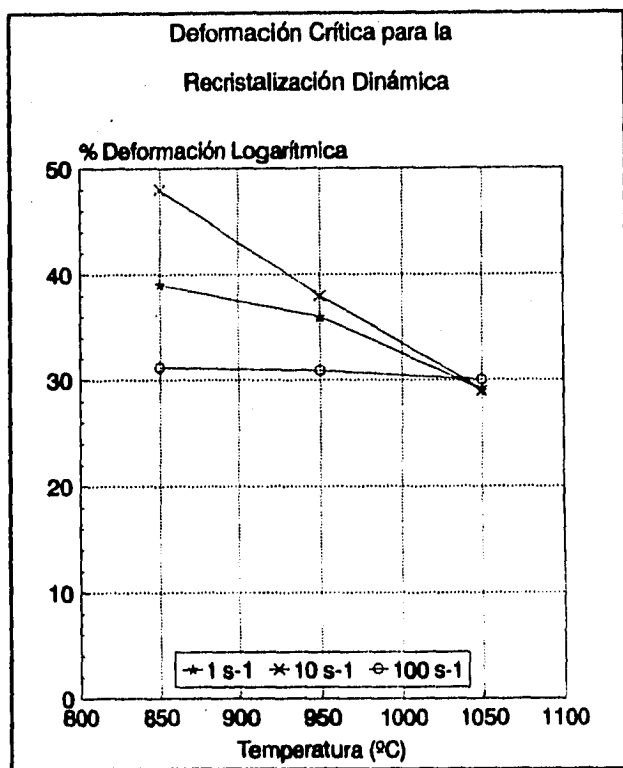


Fig. 4.7 Deformación crítica para la recristalización.

La Fig. 4.7 muestra la deformación para la recristalización dinámica en función de la temperatura y rapidez de deformación. La nucleación de nuevos granos ocurre a ϵ_c (deformación crítica para la recristalización dinámica) que corresponde aproximadamente al esfuerzo máximo o pico de la curva de flujo.

A excepción de los ensayos realizados a 100 s^{-1} , se observa que la deformación crítica para la recristalización dinámica disminuye con el incremento de la rapidez de deformación y disminuye

con la temperatura. Cuando la rapidez de deformación se incrementa a temperatura constante, el tiempo requerido para la recrystalización dinámica es insuficiente para iniciarla, conduciendo a un incremento neto en la deformación crítica para la dinámica.

El incremento de la deformación crítica para la recrystalización dinámica con disminución de la temperatura se atribuye a la disminución de la rapidez de recuperación y por lo tanto de la nucleación a temperaturas inferiores.

La Fig. 4.8 muestra la microestructura que se obtuvo en diferentes posiciones de una misma probeta de compresión, en donde se observan claramente cómo influye la fricción provocando zonas muertas, dando por resultado zonas de muy alta concentración de deformación provocando diferencias en cuanto a tamaño y distribución de los granos.

El material bajo las condiciones ensayadas tiene una buena resistencia al agrietamiento, presentando una buena formabilidad para la forja con dado abierto, sin embargo se tendrá que tomar en cuenta las diferentes condiciones de deformación que se presentan en cada una de las zonas provocadas por el estado de esfuerzos aplicado y las condiciones de fricción presentes.

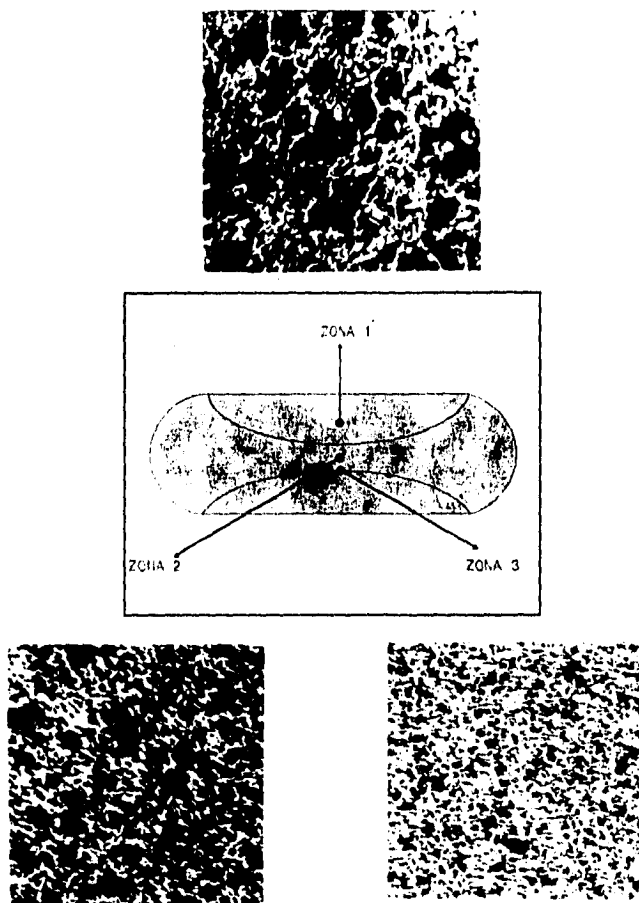


Fig. 4.8 Microestructuras en tres diferentes zonas en la probeta de compresión, Temperatura a 950°C y rapidez de deformación de 10 s^{-1} , grado de deformación 1.10

Zona 1: Esta área corresponde a una zona muerta, en la fotografía se observa el crecimiento de grano a consecuencia de la temperatura del ensayo.

Zona 2: Zona de alta deformación, localizada en el centro de la probeta, se observa cómo en este punto la estructura cambia radicalmente debido a que se presenta el fenómeno de recristalización dinámica.

Zona 3: Zona de transición entre una zona muerta y una zona de alta grado de deformación, donde se observan granos finos deformados alineados de acuerdo al cono o bandas de corte.

4.1.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN RESTRINGIDA

Las Figs. 4.9 a 4.11 muestran las curvas de flujo para el ensayo de compresión restringida, en función de la temperatura y rapidez de deformación, en general se observa que:

- a) Al aumentar la temperatura, el esfuerzo de flujo disminuye
- b) A excepción del ensayo realizado a 1050 °C y 100 s⁻¹, se alcanza un pico o máximo en el esfuerzo en el intervalo de 20 a 50% de deformación
- c) El pico o máximo en esfuerzo se ve influenciado por la temperatura y la rapidez de deformación de acuerdo a:
 - Tendencia a desplazarse hacia la izquierda o a deformaciones inferiores conforme la rapidez de deformación es menor (Figs. 4.12 a 4.14)
 - Al aumentar la temperatura el pico tiende a desplazarse hacia deformaciones mayores (Figs. 4.12 a 4.14)
- d) Después del pico y la subsecuente caída del esfuerzo, se observa una incipiente meseta de baja extensión, manifestación de un estado estacionario (22)

Las Figs. 4.12 a 4.14 muestran las curvas de flujo en función de la rapidez de deformación y temperatura, se observa que para el rango de altas rapidez de deformación (10 - 100 s⁻¹) no existe diferencia significativa entre los esfuerzos necesarios para producir deformaciones similares; sin embargo, entre el rango especificado y 1 s⁻¹ existe una diferencia de 19% en promedio, para los rangos de temperatura utilizados.

Las Figs. 4.15 a 4.17 muestran el comportamiento representativo que se obtuvo para tres diferentes temperaturas y rapidez de deformación (el resto de las gráficas se presentan en el Apéndice II) correlacionando la curva de flujo con el parámetro DGV en porciento, donde se observa cómo el parámetro DGV se ve influenciado por las condiciones de conformado.

Las curvas mostradas en las Figs. 4.15 y 4.16 se pueden dividir en 3 regiones: [Referirse a la Secc. 2.4 Compresión Restringida.]

Región I.- Zona de endurecimiento por deformación, el material incrementa su resistencia conforme se deforma, y el parámetro DGV incrementa con la deformación; se asume que el material distribuye o deforma homogéneamente, hasta el pico o máximo en el esfuerzo de la curva de flujo.

Región II.- Zona de ablandamiento, la resistencia del material disminuye al deformarse plásticamente, actúan los procesos de restauración, predominando la recristalización dinámica. El valor del parámetro DGV disminuye y se asocia con una concentración o deformación heterogénea de la deformación plástica. Es una región de posible formación de defectos.

Región III.- Comprende una zona de una incipiente meseta y ascenso de la curva de flujo; un equilibrio entre los mecanismos de ablandamiento y endurecimiento y un incremento subsecuente en la resistencia. El parámetro DGV vuelve a incrementar con la deformación, indicativo de que se distribuye la deformación.

En las curvas mostradas en la Fig. 4.17 no muestran ninguna disminución, indicación de que bajo estas condiciones el material se deforma o distribuye de manera más homogénea.

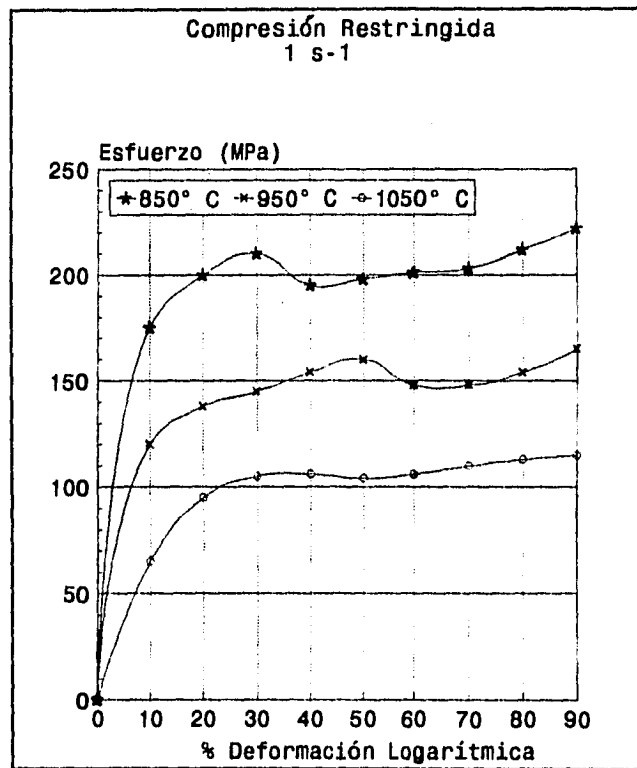


Fig. 4.9 Curvas de flujo en Compresión Restringida a una rapidez de deformación de 1 s⁻¹

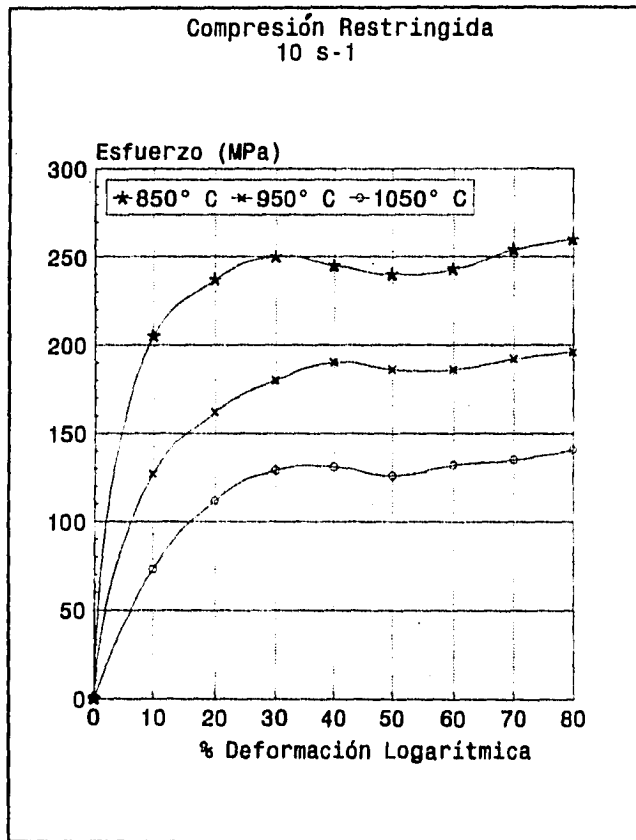


Fig. 4.10 Curvas de Flujo en Compresión Restringida a una rapidez de deformación de 10 s⁻¹

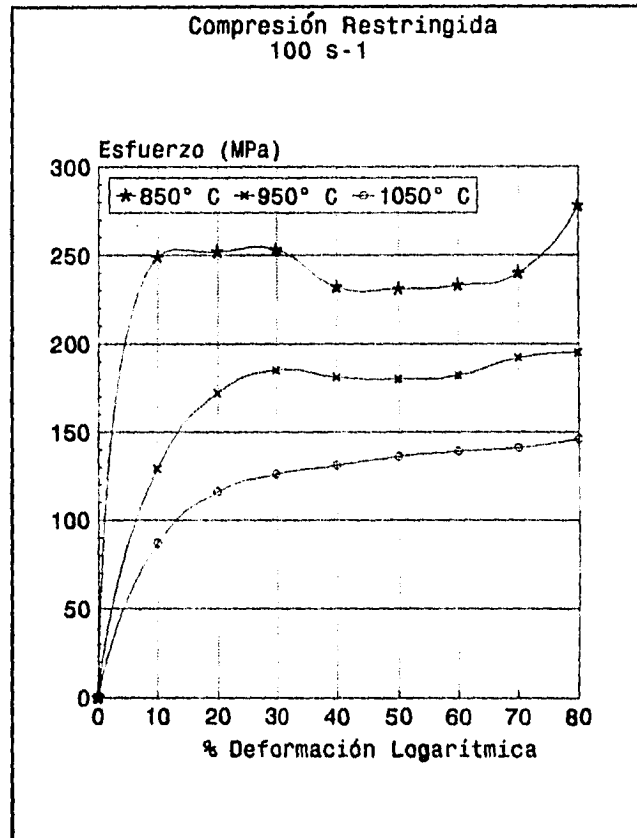


Fig. 4.11 Curvas de Flujo en Compresión Restringida a una rapidez de deformación de 100 s⁻¹

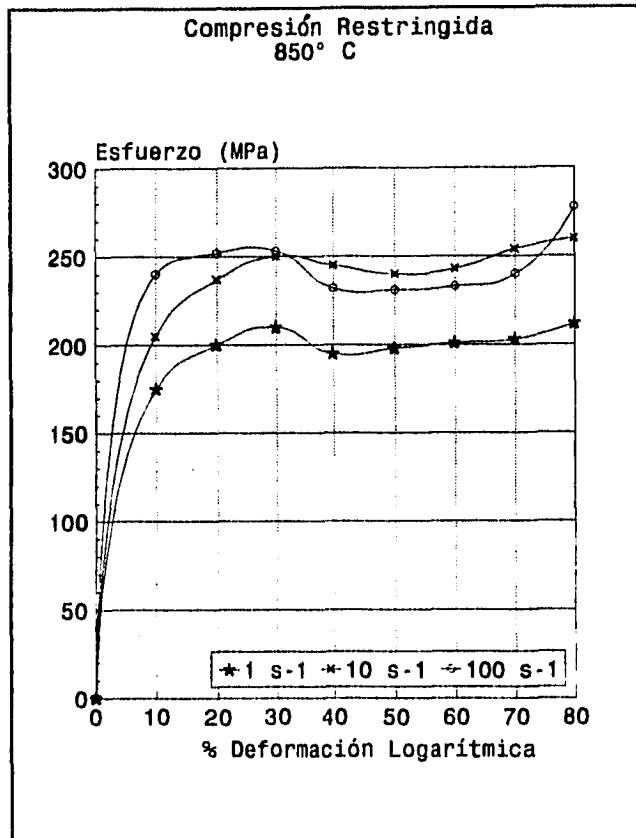


Fig. 4.12 Curvas de Esfuerzo vs. Deformación en Compresión Restringida para una temperatura de 850 °C

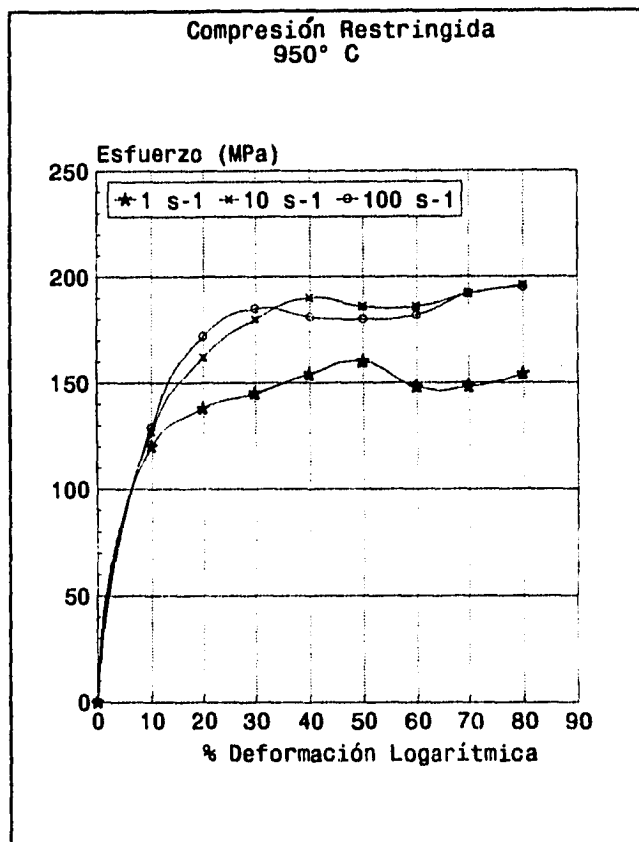


Fig. 4.13 Curvas de Esfuerzo vs. Deformación en Compresión Restringida a una temperatura de 950 °C

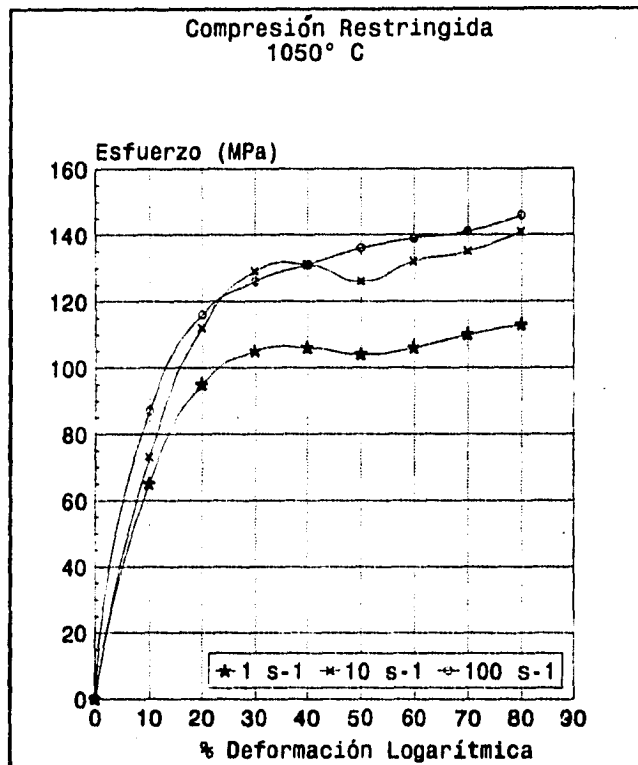


Fig. 4.14 Curvas de Esfuerzo vs. Deformación en Compresión Restringida a una temperatura 1050 °C

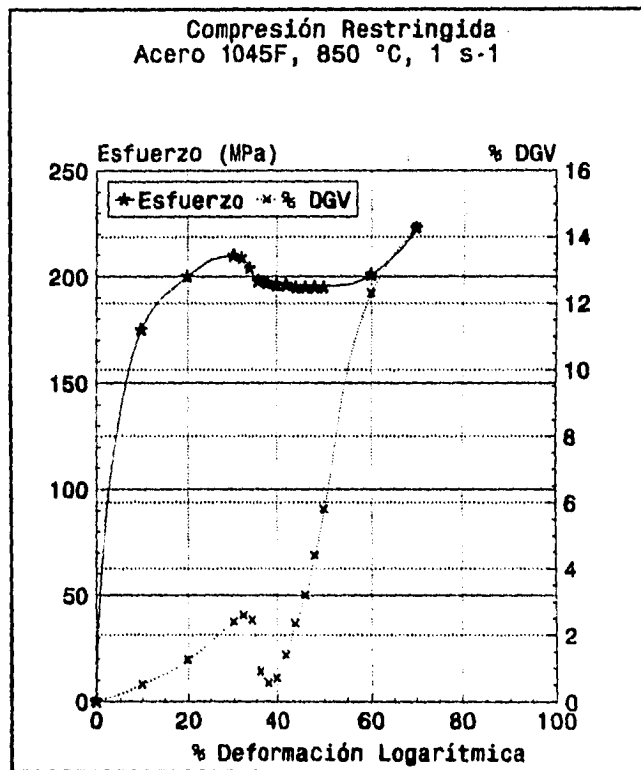


Fig. 4.15 Curvas de Esfuerzo, %DGV vs. Deformación en Compresión Restringida a una temperatura de 850 °C y una rapidez de deformación de 1 s⁻¹

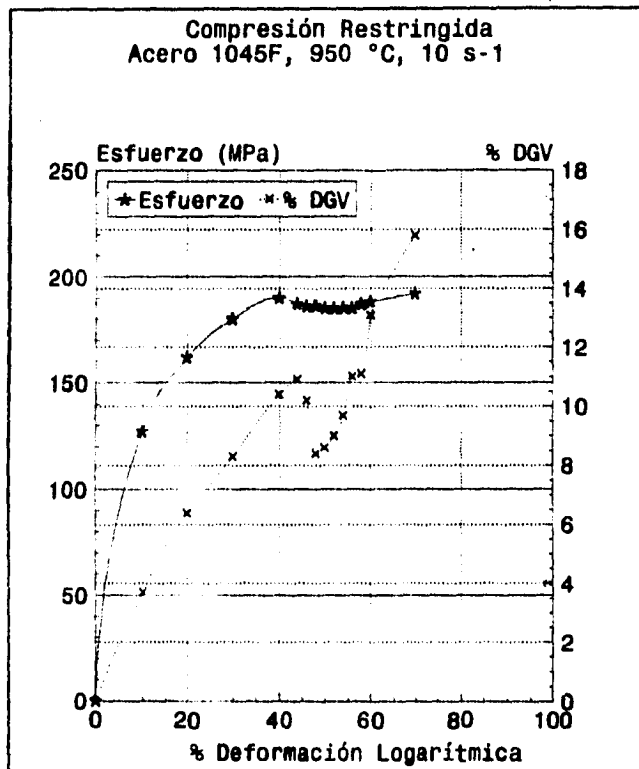


Fig. 4.16 Curvas de Esfuerzo, %DGV vs. Deformación en Compresión Restringida a 950 °C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹

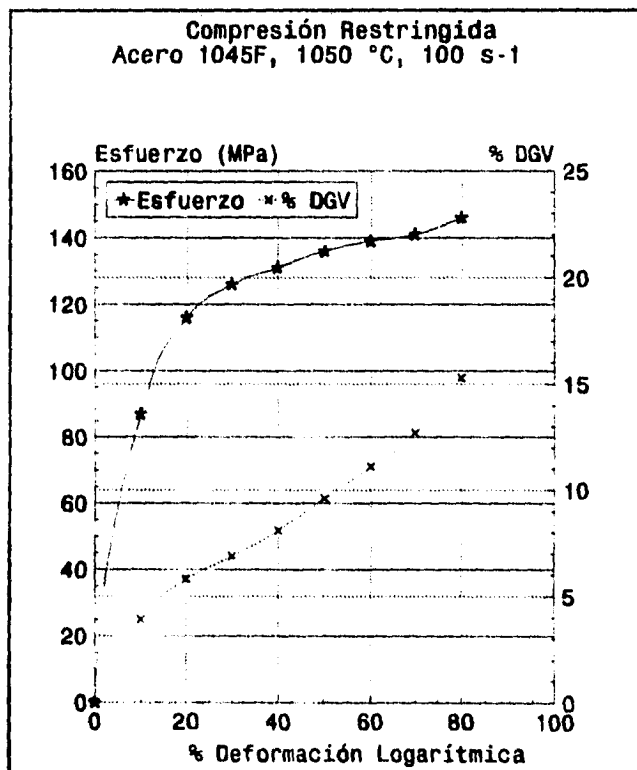


Fig. 4.17 Curvas de Esfuerzo, % DGV vs. Deformación en Compresión Restringida a una Temperatura de 1050 °C y una Rapidez de Deformación de 100 s⁻¹

En la Figura 4.18 se muestra un conjunto de probetas de Compresión Restringida ensayadas a 950 °C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹. La Fig. 4.19 revela las líneas de flujo plástico mostrando las zonas de alta y baja deformación para las probetas de compresión restringida. se observa cómo en la Fig. 4.19 (c) la deformación es heterogénea de acuerdo a los resultados experimentales.

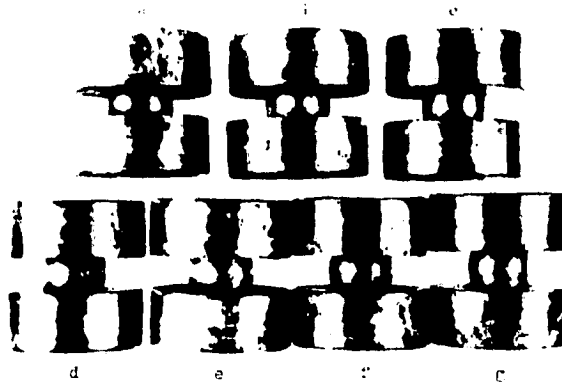
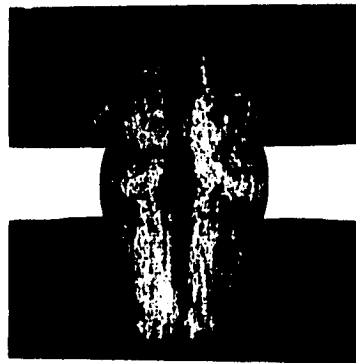


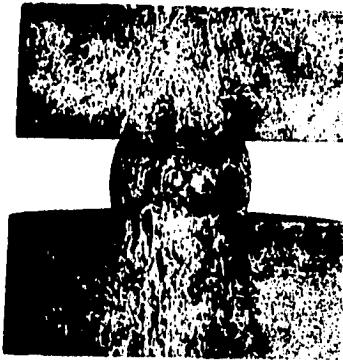
Fig.4 18 Fotografía que muestra una serie de probetas de compresión restringida Las deformaciones correspondientes son a) 77%; b) 65%; c) 58%; d) 53%; e) 54%; f) 47%; y g) 40%.



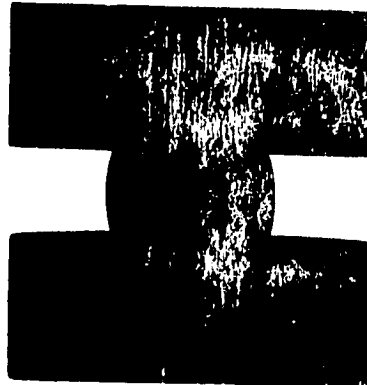
a) 88%



b) 68%



c) 48%



d) 36%

4.19 Macrografías de Compresión Restringida a diferentes grados de deformación.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



e) 33%



f) 20%



g) 9%

Fig. 4.19 Macrografiás de Compresión Restringida a diferentes grados de deformación.

4.1.2.1 AGRIETAMIENTO

Las grietas en el conformado de metales se deben a que se presentan condiciones de deformación localizada, producidas normalmente por bandas de corte adiabático, generadas por una alta rapidez de deformación, o también a que existen concentradores de esfuerzos, tales como entalles, o inclusiones no metálicas.

La Fig. 4.20 nos muestra una macrografía del entalle de una probeta de compresión restringida a 15x, el cual presenta una pequeña grieta generada durante el ensayo.

La Fig. 4.21 muestra microfotografías obtenidas a 75x de una probeta de compresión restringida ensayada a una temperatura de 1050 °C y a una rapidez de deformación de 100 s⁻¹, en las posiciones que se indican en la misma, se observa al comparar con la Fig. 4.22 la cual corresponde a una probeta en Compresión Restringida sometida a una temperatura de 950 °C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹, el cambio en el aspecto que presentan las bandas de corte y la diferencia en tamaño de grano, donde se presentan variaciones desde un tamaño de grano de 4 hasta de 6 ASTM; en cambio en la Fig. 4.23 que corresponde a la figura 4.21 (a), se presentan granos de tamaños inferiores en donde el promedio es de 6 ASTM, encontrándose algunos de ellos con tamaño inferior a 8 ASTM, estas diferencias se observan principalmente en las líneas de deformación que se muestran en la Fig. 4.21 (g). Este hecho nos lleva a corroborar los resultados obtenidos en base a los datos que se presentan en la Fig. 4. 17; donde se presenta una distribución más homogénea de la deformación en la sección reducida y el valor del parámetro DGV no disminuye para las condiciones de conformado ya mencionadas.

De manera similar, la Fig. 4.24 (a) nos presenta una grieta obtenida en condiciones de ensayo de 950°C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹ donde se observa cómo una inclusión facilita que la grieta se propague a lo largo de los planos de fractura. La Fig. 4.24 (b) nos muestra la misma pieza pero a mayores aumentos con una inclusión de sulfuro. Para este estudio se deduce que el cobre utilizado para proteger las muestras de la oxidación y descarbonización fue el sitio donde se generaron las grietas, comportándose como una inclusión no metálica.

Resumiendo, en condiciones de ensayo de temperatura a 1050 °C y rapidez de deformación de 100 s⁻¹ las bandas de deformación se ven disminuidas sin que ello represente su desaparición, esto es producido por la fricción interna que existe en el material para lograr el flujo plástico y el estado de esfuerzos generado, existen diferencias en cuanto a tamaño de grano principalmente en las zonas donde se localiza la deformación, y de acuerdo a los resultados, éstas son las condiciones idóneas de formado para el material AISI 1045F.

Las Figs. 4.25 a 4.27 corresponden a probetas que fueron sometidas a condiciones de conformado de 950 °C y rapidez de deformación de 10 s⁻¹, donde se observa cómo se presenta el crecimiento de una grieta a través del mecanismo de nucleación y crecimiento de poros, característico de una fractura dúctil y se presenta la fractura de forma transgranular, se observa el desplazamiento de algunos granos. Las Figs. 4.28 y 4.29 muestran a mayor aumentos la punta de la grieta que se presenta en forma intergranular identificada con las flechas, en probetas sometidas a 950 °C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹.



Fig. 4.20 Macrografía del entalle de probeta de Compresión Restringida ensayada a 900 °C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹, deformación de 0.76, grieta generada al realizar el ensayo, 15x.

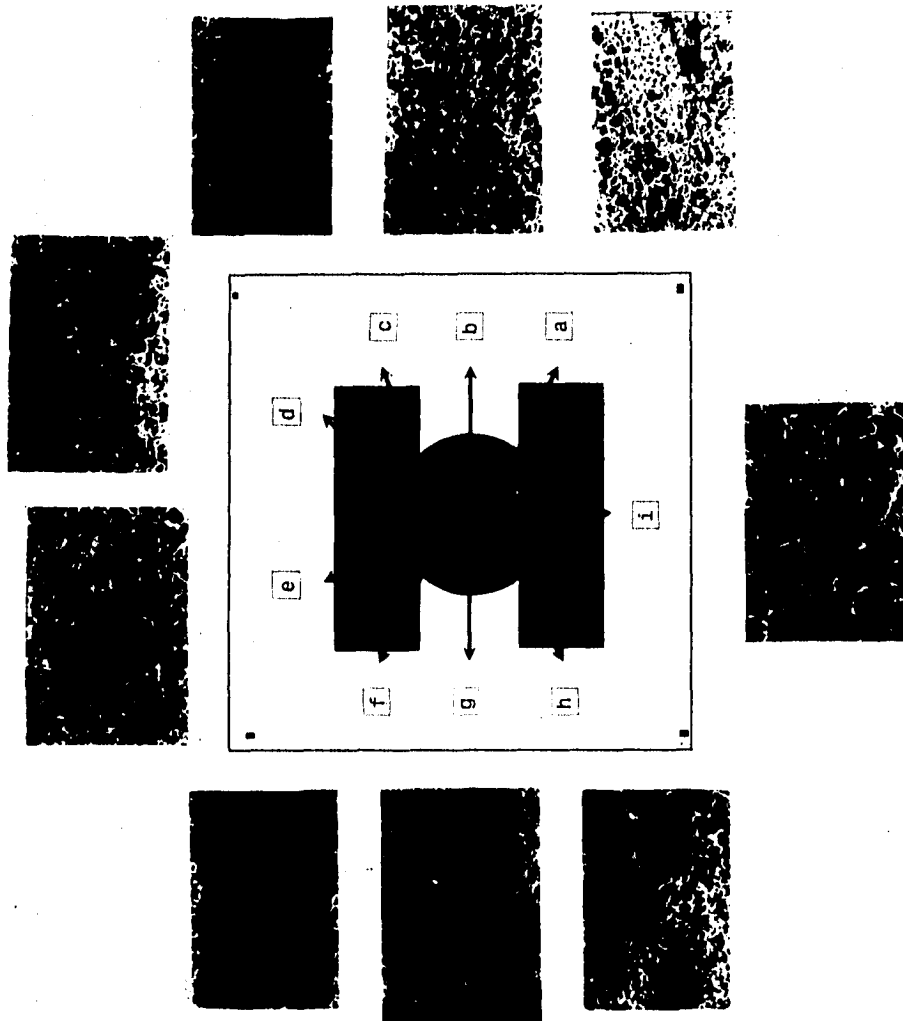


Fig. 4.21 Posición de microfotografías a 75x de probeta de Compresión Restringida ensayada a 1050 °C y una rapidez de deformación de 100 s^{-1} , deformación 0.92. Se observan las estructuras obtenidas y la modificación del tamaño de grano, primordialmente en donde la deformación tiende a localizarse, (punto g).

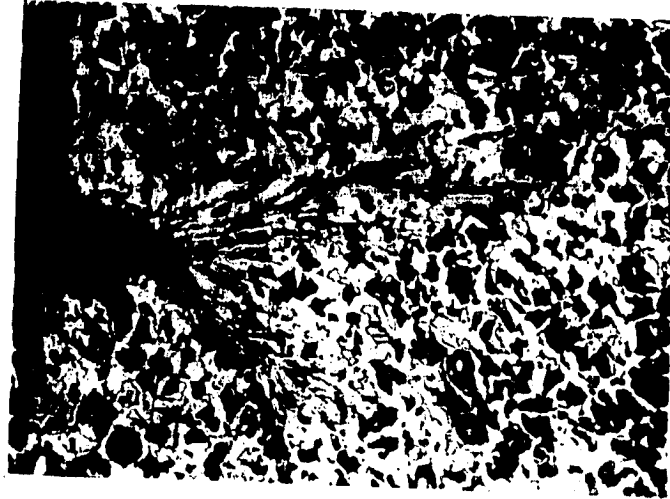


Fig. 4.22 Microfotografía de probeta de Compresión Restringida sometida a 950 °C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹, deformación 0.76, % DGV = 14.3, detalle de pliegues generados al realizar el ensayo.

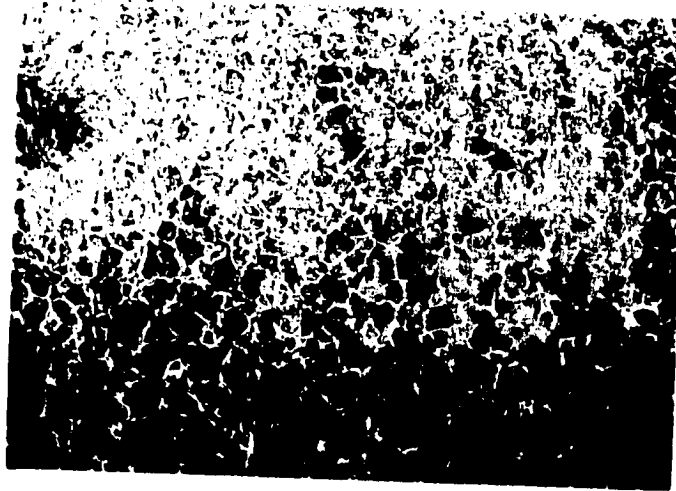
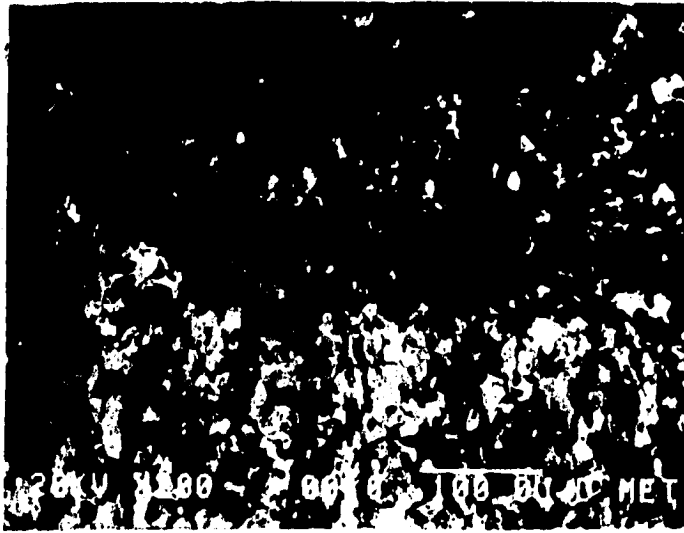


Fig. 4.23 Microfotografía de probeta de Compresión Restringida sometida a 1050 °C y una rapidez de deformación de 100 s⁻¹, deformación 0.92, % DGV = 21.4; detalle de una parte de la sección reducida, no se observan pliegues.



(a)



(b)

Fig. 4.24 Microfotografías del entalle de una probeta de Compresion Restringida mostrando una grieta generada durante el ensayo, a una temperatura de 950°C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹, deformación 0.59, % DGV = 10. (a) Bandas de deformación (líneas negras) alineadas de acuerdo a los esfuerzos cortantes máximos, se observa que la grieta corre a través de la inclusión presente (200X), y (b) Inclusión de sulfuro fracturada, la grieta presenta pequeños poros que corren paralelos a la misma de forma irregular, se presenta fractura transgranular (1800X).



Fig. 4.25 Microfotografía de probeta de Compresión Restringida sometida a 950°C y una rapidez de deformación de 10 s⁻¹, deformación 0.59, %DGV = 10, se observa que la punta de la grieta generada durante el ensayo, se propaga a través del mecanismo de nucleación y crecimiento de poros consecuencia de un mecanismo de fractura dúctil, se observan líneas de corte (líneas blancas) las cuales desplazan fragmentos de granos. (2000x)

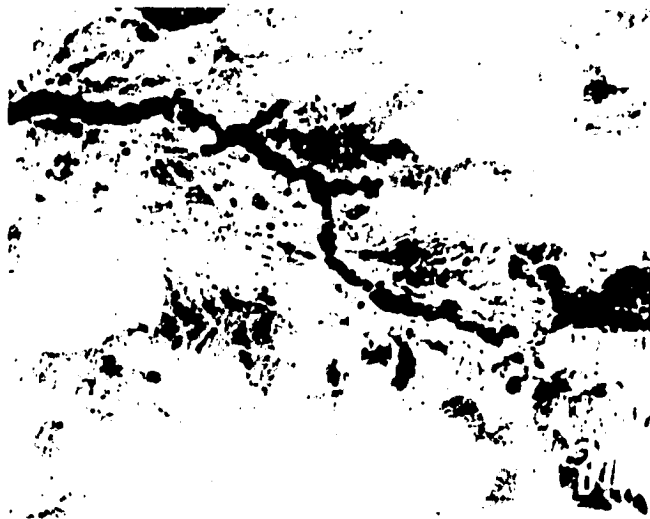


Fig. 4.26 Microfotografía similar a la mostrada en Fig. 4.25. se observan en la punta de la grieta coalescencia de poros que provocaron el crecimiento de la misma, se observan microporos que corren a lo largo de la grieta.



Fig. 4.27 Microfotografía mostrando fractura por coalescencia de poros. se observan líneas de corte (líneas blancas). 3000x, condiciones idénticas a la Fig. 4.26.

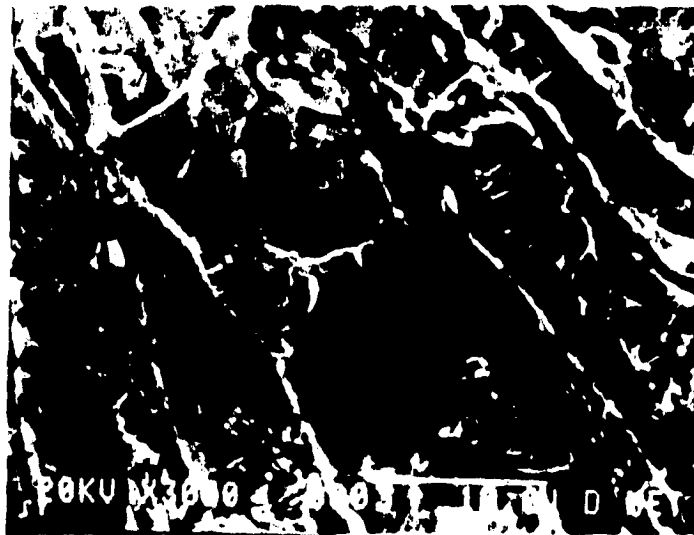


Fig. 4.28 Microfotografía de la punta de una grieta generada en el ensayo de Compresión Restringida, se observa fractura intergranular. (3000x)



Fig. 4.29 Microfotografía mostrando fractura intergranular en granos de ferrita. (5000x).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones derivadas de este estudio se resumen en los siguientes puntos:

- 1) Con el ensayo de Compresión Restringida es posible obtener las curvas de flujo y por lo tanto determinar propiedades mecánicas.
- 2) El grado de deformación crítica se ve disminuido al incrementar la rapidez de deformación, y la temperatura de conformado.
- 3) La curva de flujo se eleva al incrementar la rapidez de deformación y disminuye al incrementar la temperatura, esto es debido a que el índice de endurecimiento se incrementa al aumentar la rapidez de deformación, o disminuye al aumentar la temperatura.
- 4) La ductilidad del material se ve disminuida al incrementar la rapidez de deformación e inversamente si se aumenta la temperatura, por lo que se recomienda evaluar los parámetros en los cuales el material proporcione una condición adecuada para el servicio al que será sometido.
- 5) Las curvas de flujo presentan un pico o máximo en el valor del esfuerzo, manifestación de la activación del proceso de ablandamiento denominado recristalización dinámica.
- 6) Éste máximo en el esfuerzo se ve influenciado por la temperatura y la rapidez de deformación.
- 7) El parámetro DGV es una herramienta útil para determinar las condiciones de flujo plástico que producirán piezas con una deformación más homogénea, disminuyendo con ello el riesgo de fallas o piezas defectuosas.
- 8) El flujo plástico localizado está asociado a la presencia de recristalización dinámica y a su vez a un bajo valor del parámetro DGV.
- 9) De acuerdo a los resultados reportados en el presente, se recomienda que al conformar el acero AISI 1045F en caliente, se lleve a cabo bajo condiciones tales que eliminen en parte las condiciones que presentaron un bajo valor del parámetro del DGV, puesto que en éstas condiciones el material presentó fisuramiento (Figs. 4.20; 4.22; 4.24), en específico deformaciones que caen en el rango del 20% al 50% con temperaturas de 850°C y 950°C donde se presentó este problema.

- 10) Las grietas se nuclearon debido al cobre que quedó atrapado en el cambio de sección, utilizado para proteger las probetas de la descarbonización, generando una concentración de esfuerzos.
- 11) Se recomienda para trabajos posteriores utilizar atmósferas inertes o controladas para eliminar la nucleación de grietas, y materiales monofásicos como por ejemplo un acero inoxidable austenítico que permita hacer un seguimiento de la evolución microestructural.

El objetivo del presente trabajo se cumplió al obtener los parámetros y condiciones de conformado más adecuados para deformar plásticamente el acero en estudio, al considerar el parámetro DGV, éste nos proporcionó información valiosa que en estudios subsecuentes permitirá de igual manera evaluar las condiciones óptimas, para operaciones similares en materiales diversos, se evaluó de igual manera la tendencia que presentó el material al agrietamiento y al flujo localizado.

APÉNDICE I

```
10 REM programa de formabilidad [prueba22.bas]
20 REM
30 REM fecha de re-elaboración 'abril DE 1994'
40 SCREEN 9
50 KEY OFF
60 DIM P(20),DM(20),H0(20),H(20),D(20),KM(20),L(20),DF(20),TT(20),DH(20),R(20)
70 DIM W(20),Z(20),S(20),Y(20),X(20),A(20),C(20),F(20),DG(20),VF(20),GM(20)
80 DIM AZ(20),ZZA(20),ZZ(20),T(20),DI(20),HA(20),VO(20),RB(20),RC(20),DDO(20)
90 CLS:COLOR 10,I
100 CLEAR
110 REM CLS
120 LOCATE 6,15:PRINT "P A R A M E T R O S   D E   F O R M A B I L I D A D"
130 LOCATE 9,18:COLOR 7,I:PRINT "SELECCIONE UNA DE LAS SIGUIENTES RUTINAS"
140 LOCATE 12,28:PRINT "[A] EXPLICACION DEL PROGRAMA"
150 LOCATE 14,28:PRINT "[B] COMPRESION"
160 LOCATE 16,28:PRINT "[C] COMPRESION RESTRINGIDA"
170 LOCATE 20,28:PRINT "[E] SISTEMA OPERATIVO"
180 LOCATE 18,28:PRINT "[D] ELIMINAR BASES DE DATOS"
190 COLOR 14:LOCATE 22,30:INPUT "CUAL ES TU OPCION":ES
200 IF ES="" THEN PRINT"opcion no valida":GOTO 190
210 IF ES="A" OR ES="a" THEN GOTO 280
220 IF ES="B" OR ES="b" THEN GOTO 470
230 IF ES="C" OR ES="c" THEN GOTO 1380
240 IF ES="D" OR ES="d" THEN GOTO 2950
250 IF ES="E" OR ES="e" THEN GOTO 2750
260 PRINT, "OPCION NO VALIDA PRESIONA 'R' PARA CONTINUAR"
270 BS=INKEY$:IF BS="R" OR BS="r" THEN GOTO 90 ELSE GOTO 260
280 REM rutina de explicacion del programa DE COMPRESION RESTRINGIDA
290 CLS:LOCATE 7,15:COLOR 10:PRINT "C O M P R E S I O N   R E S T R I N G I D A"
300 COLOR 7,I:PRINT:PRINT
310 LOCATE 9,10:PRINT " El programa esta diseñado para evaluar las propiedades"
320 LOCATE 10,10:PRINT "de formabilidad de un material sometido a ensayo de com-"
330 LOCATE 11,10:PRINT "presión uniaxial con una probeta con entalle (fig.1),"
340 LOCATE 12,10:PRINT "a través del par metro 'DGV' cuya naturaleza es exclu-"
350 LOCATE 13,10:PRINT "sivamente geométrica."
360 LINE (405,190)-(524,290),I,BF
370 LINE (405,225)-(435,255),I,BF
380 LINE (493,225)-(524,255),I,BF
390 PRINT:PRINT:PRINT:COLOR 7,I
400 LOCATE 16,10:PRINT "Los parámetros que determina son:"
410 LOCATE 17,20:PRINT "El esfuerzo efectivo"
420 LOCATE 18,20:PRINT "La deformación efectiva"
430 LOCATE 19,20:PRINT "El parámetro DGV":PRINT:PRINT
440 LOCATE 22,55:PRINT "Fig. 1"
450 LOCATE 24,10:PRINT, "PARA CONTINUAR PRESIONE CUALQUIER TECLA"
460 AS=INKEY$:IF AS="" GOTO 460 ELSE GOTO 90
470 REM RUTINA PARA COMPRESION
480 CLS
490 X=1
500 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
510 COLOR 10,I:PRINT TAB(20)"E n s a y o   d e   C o m p r e s i ó n":PRINT:PRINT
520 COLOR 7,I:PRINT TAB(25)"P a r á m e t r o s   ":PRINT
530 PRINT TAB(30)" T : Esfuerzo efectivo en MPa"
540 PRINT TAB(30)" D H : Deformación efectiva ":PRINT
550 COLOR 14,I:PRINT TAB(10)"Proporcione los datos en el siguiente orden"
560 COLOR 7,I:PRINT TAB(15)"H: altura INICIAL en mm"
570 PRINT TAB(15)"P : carga en KN"
580 PRINT TAB(15)"DM:diámetro MAYOR en mm"
590 PRINT TAB(15)"Dm:diámetro MENOR en mm"
600 PRINT TAB(15)"H : altura FINAL en mm":PRINT
```

```

610 PRINT TAB(35)"PRESIONA CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
620 XS=INKEYS:IF XS="" THEN 620 ELSE 630
630 CLS:LOCATE 3,18:COLOR 10,1:PRINT "CONDICIONES DEL ENSAYO"
640 COLOR 7,1:LOCATE 5,5:INPUT "MATERIAL=";MS
650 LOCATE 5,25:INPUT "FECHA=";K$
660 LOCATE 7,15:COLOR 7,1:INPUT "TEMPERATURA DEL ENSAYO (°C)=";SS
670 LOCATE 9,15:INPUT "VELOCIDAD DE DEFORMACION (s-1)=";VS
680 REM LOCATE 12,18:COLOR 10,1:PRINT "DIMENSIONES INICIALES DE LA PROBETA"
690 REM LOCATE 15,15:COLOR 7,1:INPUT "Diámetro INICIAL (mm)=";DO
700 COLOR 4:LOCATE 17,10:INPUT "LOS DATOS SON CORRECTOS (S/N)";ES
710 IF ES="" THEN PRINT " OPCION NO VALIDA":GOTO 700
720 IF ES="N" OR ES="n" THEN GOTO 630
730 COLOR 14:LOCATE 20,15:INPUT "Número de Datos (M x 18)";NN
740 FOR J=1 TO NN
750 CLS:LOCATE 5,30:COLOR 10,1:PRINT "DATO #";J;PRINT
760 LOCATE 6,20:COLOR 7,1:INPUT "Diámetro INICIAL (mm)=";DDO(J)
770 LOCATE 8,20:INPUT "Altura INICIAL (mm)=";H0(J)
780 LOCATE 10,20:INPUT "Carga (KN)=";P(J)
790 LOCATE 12,20:INPUT "Diámetro MAYOR (mm)=";DM(J)
800 LOCATE 14,20:INPUT "Diámetro MENOR (mm)=";D(J)
810 LOCATE 16,20:INPUT "Altura FINAL (mm)=";H(J)
820 NEXT J
830 CLS:LOCATE 3,30:PRINT "D A T O S"
840 COLOR 10,1:LOCATE 5,8:PRINT "DATO # D/ini Al/ini Carga D/may D/men Al/fin"
850 FOR J=1 TO NN
860 COLOR 10,1:LOCATE J+5,9:PRINT J;
870 COLOR 9,1:LOCATE J+5,13:PRINT USING "#####.## ";DDO(J);H0(J);P(J);DM(J);D(J);H(J)
880 NEXT J
890 COLOR 14,11:LOCATE 24,25:INPUT "LOS DATOS SON CORRECTOS (S/N)";ES
900 IF ES="" THEN PRINT " opcion no valida":GOTO 890
910 IF ES="N" OR ES="n" THEN GOTO 2780
920 REM COLOR 4,7
930 CLS:LOCATE 2,20:PRINT "R e s u l t a d o s"
940 LOCATE 3,15:PRINT "Dato Esfuerzo(MPa) Deformación "
950 FOR J=1 TO NN
960 DF(J)=DM(J)-(DM(J)-D(J))/3
970 TT(J)=((P(J)*4)/(DF(J)^2*3.1416))*1000
980 DH(J)=ABS(LOG(H(J)/H0(J)))*100
990 REM TT es el esfuerzo , y DH es la deformación
1000 LOCATE J+3,17:PRINT J;
1010 LOCATE J+3,20:PRINT USING "#####.## ";TT(J);DH(J)
1020 NEXT J
1030 LOCATE 25,20:PRINT "PRESIONA CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
1040 XS=INKEYS:IF XS="" THEN 1040 ELSE 1050
1041 LOCATE 25,20: INPUT "QUIERES VER GRAFICAS (S/N)?" ;XS
1042 XS=INKEYS:IF XS="" THEN 1041
1043 IF XS="N" OR XS="n" THEN GOTO 1050
1044 IF XS="S" OR XS="s" THEN GOTO 3065
1050 REM rutina para nombre de archivo PARA salvar datos y resultados COMPRESION
1060 CLS:LOCATE 10,20:PRINT "Por favor teclea el nombre del archivo a ser"
1070 LOCATE 12,20: PRINT"almacenado a diskette, recuerda que sólo son "
1080 LOCATE 14,20:PRINT "8 caracteres, NO OLVIDAR la extensión 'INI'"
1090 LOCATE 16,25:PRINT "EJEMPLO:NOMARCH.INI"
1100 LOCATE 18,30: INPUT "c":ASD$
1110 REM ESPACIO
1120 OPEN "A",#1,ASD$
1130 CLS:LOCATE 2,10:COLOR 2,4:PRINT "Guardando DATOS y RESULTADOS de compresión en ";ASD$;
1140 PRINT #1,"Material Temperatura(°C) Vel.Def(S-1) Fecha"
1150 PRINT #1, " ";MS;" ";SS;" ";VS;" ";K$;"
1160 PRINT #1,"DATO D/ini Al/ini Carga(KN) D/may D/men Al/fin ESF(MPa) % DEF"
1170 FOR J=1 TO NN
1180 PRINT #1,J;

```

```

1190 PRINT #1,USING "####.## ";DDO(J);I10(J);P(J);DM(J);D(J);H(J);TT(J);DH(J)
1200 NEXT J
1210 CLOSE #1
1220 COLOR 14,1:LOCATE 24,10:PRINT "PARA CONTINUAR PRESIONA CUALQUIER TECLA"
1230 D$=INKEY$:IF D$="" THEN 1230 ELSE 1240
1240 LOCATE 24,10:INPUT "DESEAS IMPRIMIR DATOS Y RESULTADOS(S/N)":F$
1250 IF F$="" THEN PRINT "Opción no v lida":GOTO 1240
1260 IF F$="N" OR F$="n" THEN GOTO 1370
1270 LOCATE 24,10:INPUT "ESTA LISTA LA IMPRESORA (S/N)":W$
1280 IF W$="S" OR W$="s" THEN 1290 ELSE 1220
1290 LPRINT "Material Temperatura(°C) Vel.Def(S-1) Fecha COMPRESION"
1300 LPRINT ".,.,MS;.,.,SS;.,.,.,VS;.,.,.,KS;"
1310 LPRINT "DATO D/ini Alt/ini Carga(KN) D/may D/men Alt/fin ESF(MPa) % DEF"
1320 FOR J=1 TO NN
1330 LPRINT J;
1340 LPRINT USING "####.## ";DDO(J);I10(J);P(J);DM(J);D(J);H(J);TT(J);DH(J)
1350 NEXT J
1360 REM ESPACIO
1361 LOCATE 25,20: INPUT "QUIERES VER GRAFICAS (S/N)":X$
1362 X$=INKEY$:IF X$="" THEN 1362
1363 IF X$="N" OR X$="n" THEN GOTO 90
1364 IF X$="S" OR X$="s" THEN GOTO 3065
1370 GOTO 90
1380 CLS:LOCATE 5,10:PRINT "COMPRESION RESTRINGIDA"
1390 LOCATE 10,15:PRINT "PARA METROS"
1400 LOCATE 12,15:PRINT "T : ESFUERZO EN MPa"
1410 LOCATE 14,15:PRINT "DH:DEFORMACION EFECTIVA"
1420 LOCATE 16,15:PRINT "DGV:DISTRIBUTED GAGE VOLUME "
1430 LOCATE 20,30:PRINT "PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
1440 C$=INKEY$:IF C$="" THEN 1440
1450 CLS:LOCATE 3,10:PRINT "PROPORCIONE LOS DATOS EN EL SIGUIENTE ORDEN"
1460 LOCATE 5,10:PRINT "DI :Di metro Inicial (mm)"
1470 LOCATE 7,10:PRINT "HA :Altura Inicial (mm)"
1480 LOCATE 9,10:PRINT "P :CARGA (KN) "
1490 LOCATE 11,10:PRINT "DM :DIAMETRO MAYOR (mm) "
1500 LOCATE 13,10:PRINT "D :DIAMETRO MENOR (mm) "
1510 LOCATE 15,10:PRINT "H :ALTURA FINAL (mm) "
1520 LOCATE 17,10:PRINT "RB :RADIO MAXIMO (mm) "
1530 LOCATE 19,10:PRINT "RC :RADIO DE CURVATURA (mm) "
1540 LOCATE 21,20:PRINT "PRESIONA CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
1550 C$=INKEY$:IF C$="" THEN 1550
1560 CLS:LOCATE 5,10:COLOR 10,1:PRINT "CONDICIONES DEL ENSAYO"
1570 COLOR 7,1:LOCATE 8,10:INPUT "MATERIAL":M$
1580 LOCATE 8,45:INPUT "FECHA=":K$
1590 LOCATE 10,10:INPUT "TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)=":S$
1600 LOCATE 12,10:INPUT "VELOCIDAD DE DEFORMACION (S-1)=":V$
1610 COLOR 4:LOCATE 15,10:INPUT "LOS DATOS SON CORRECTOS (S/N)":E$
1620 IF E$="" THEN PRINT "OPCION NO VALIDA"
1630 IF E$="N" OR E$="n" THEN GOTO 1570
1640 LOCATE 23,30:COLOR 14:INPUT "Número de datos (M x 18)=":NN
1650 REM ESPACIO
1660 CLS:COLOR 10,1:LOCATE 3,5:PRINT "DIMENSIONES DE LA PROBETA"
1670 FOR J=1 TO NN
1680 CLS:LOCATE 4,30:COLOR 20,8:PRINT "DATO #":J;
1690 COLOR 7,1:LOCATE 6,10:INPUT "Di metro inicial (mm)=":DI(J)
1700 LOCATE 8,10:INPUT "Altura inicial (mm)=":HA(J)
1710 VO(J)=(DI(J)2*HA(J)*3.1415)/4
1720 LOCATE 10,10:INPUT "Carga (KN)=":P(J)
1730 LOCATE 12,10:INPUT "Diámetro MAYOR (mm)=":DM(J)
1740 LOCATE 14,10:INPUT "Diámetro MENOR (mm)=":D(J)
1750 LOCATE 16,10:INPUT "Altura final (mm)=":H(J)
1760 LOCATE 18,10:INPUT "Radio Máximo (mm)=":KM(J)

```

```

1770 LOCATE 20,10:INPUT "Radio de curvatura (mm)=",L(J)
1780 NEXT J
1790 CLS:COLOR 10,1: LOCATE 3,30:PRINT " D A T O S "
1800 LOCATE 4,13:PRINT "DATO D/ini Al/ini CARGA D/May d/Men Al/FIN RADIO/M x RADIO/curvatura"
1810 FOR J=1 TO NN
1820 COLOR 10,1:LOCATE J+5,1:PRINT J;
1830 COLOR 3,1:LOCATE J+5,3:PRINT USING "####.### ";DI(J);IA(J);P(J);DM(J);D(J);H(J);KM(J);L(J)
1840 NEXT J
1850 COLOR 14,11:LOCATE 24,25:INPUT ";LOS DATOS SON CORRECTOS (S/N)";ES
1860 IF ES="" THEN PRINT "OPCION NO VALIDA":GOTO 1850
1870 IF ES="S" OR ES="s" THEN GOTO 2070
1880 COLOR 14,1:LOCATE 24,25:INPUT ";QUE NÚMERO DE DATO DESEAS CORREGIR"J
1890 CLS:LOCATE 3,30:PRINT " D A T O S "
1900 CLS:LOCATE 5,30:COLOR 10,1:PRINT "DATO #":J;:PRINT
1910 COLOR 10,1:LOCATE 5,13:PRINT "DATO D/ini Al/ini CARGA D/May d/Men Al/FIN RADIO/M x RADIO/curv"
1920 LOCATE J+6,1:PRINT J;
1930 COLOR 7,1:LOCATE J+6,5:PRINT USING "####.### ";DI(J);IA(J);P(J);DM(J);D(J);H(J);JM(J);L(J)
1940 COLOR 10,1:LOCATE 24,20:INPUT "ESTE ES EL DATO A CORREGIR";ES:CLS
1950 IF ES="S" OR ES="s" THEN 1960 ELSE 1790
1960 CLS:LOCATE 5,30:COLOR 10,1:PRINT "DATO #":J;:PRINT
1970 LOCATE 6,20:COLOR 7,1:INPUT "Di metro INICIAL (mm)=";DI(J)
1980 LOCATE 8,20:INPUT "Altura Inicial (mm)=";IA(J)
1990 LOCATE 10,20:INPUT "Carga (KN)=";P(J)
2000 LOCATE 12,20:INPUT "Diámetro MAYOR (mm)=";DM(J)
2010 LOCATE 14,20:INPUT "Diámetro MENOR (mm)=";D(J)
2020 LOCATE 16,20:INPUT "Altura FINAL (mm)=";H(J)
2030 LOCATE 18,20:INPUT "Radio M ximo (mm)=";KM(J)
2040 LOCATE 20,20:INPUT "Radio de Curvatura (mm)=";L(J)
2050 LOCATE 24,25:PRINT "para continuar PRESIONE CUALQUIER TECLA"
2060 CS=INKEY$:IF CS="" GOTO 2060 ELSE 1790
2070 FOR I=1 TO NN
2080 DF(I)=(DM(I)-(DM(I)-D(I))/3
2090 T(I)=((P(I)*4)/(DF(I)^2*3.1416))*1000
2100 DH(I)=ABS(LOG(I(I)/IA(I))*100)
2110 R(I)=L(I)-SQR(4*L(I)^2-H(I)^2)/2
2120 W(I)=(1-(R(I)/L(I)))
2130 ZZ(I)=2*ATN(SQR(1-W(I)^2)/W(I))
2140 Z(I)=ZZ(I)*57.2958
2150 S(I)=(0.01745*L(I)^2*Z(I)-(H(I)*(L(I)-R(I))))/2
2160 Y(I)=(H(I)^3)/(12*S(I))
2170 X(I)=KM(I)-(L(I)-Y(I))
2180 A(I)=6.2832*X(I)*S(I)
2190 C(I)=3.1416*H(I)*(KM(I)-R(I))^2
2200 F(I)=A(I)+C(I)
2210 DG(I)=(1-(F(I)/VO(I)))*100
2220 VF(I)=(3.1416*DF(I)^2*H(I))/4
2230 GM(I)=(1-(VF(I)/VO(I)))*100
2240 NEXT I
2250 CLS:LOCATE 2,3:COLOR 2,4:PRINT " RESULTADOS de COMPRESION RESTRINGIDA "
2260 COLOR 2,4:LOCATE 4,8:PRINT "DATO ESFUERZO DEFORMACION DGV1 DGV(M) "
2270 FOR I=1 TO NN
2280 LOCATE I+4,8:PRINT I;
2290 LOCATE I+4,13:PRINT USING "#####.###";T(I);DH(I);DG(I);GM(I)
2300 NEXT I
2310 LOCATE 25,20:PRINT "PRESIONA CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
2320 XS=INKEY$:IF XS="" THEN 2320 ELSE 2321
2321 COLOR 14,11:LOCATE 24,25:INPUT ";DESEAS VER LAS GRAFICAS (S/N)";ES
2322 IF ES="" THEN PRINT "OPCION NO VALIDA":GOTO 2321
2323 IF ES="S" OR ES="s" THEN GOSUB 3065
2324 REM espacio
2330 REM rutina para nombre de archivo PARA salvar datos y resultados compresion RESTRINGIDA
2340 CLS:LOCATE 10,20:PRINT "Por favor tecllea el nombre del archivo a ser"

```

```

2350 LOCATE 12,20: PRINT "almacenado a diskette, recuerda que sólo son "
2360 LOCATE 14,20: PRINT "8 caracteres, NO OLVIDAR la extensión 'INI'"
2370 LOCATE 16,25: PRINT "EJEMPLO:NOMARCHINI"
2380 LOCATE 18,30: INPUT "¿";ASD$
2390 REM ESPACIO
2400 OPEN "A",#2,ASD$
2410 CLS:LOCATE 2,10:COLOR 2,4:PRINT "Guardando DATOS y RESULTADOS de COMPRESION RESTRINGIDA en ";ASD$;
2420 PRINT #2,"Material Temperatura(°C) Vel.Def(S-I) Fecha COMPRESION RESTRINGIDA"
2430 PRINT #2, " ","MS"," ","SS"," ","VS"," ","KS;"
2440 PRINT #2,"DATO D/ini ALT/ini Carga D/MAY D/men ALT/final Radio/M x Radio/Curv "
2450 FOR J=1 TO NN
2460 PRINT #2,J;
2470 PRINT #2,USING "#####.## ",DI(J);HA(J);P(J);DM(J);D(J);H(J);KM(J);L(J)
2480 NEXT J
2490 PRINT #2,"DATO ESFUERZO DEFORMACION DGV DGV(M)"
2500 FOR I=1 TO NN
2510 PRINT #2,I;
2520 PRINT #2,USING "#####.### ",T(I);DH(I);DG(I);GM(I)
2530 NEXT I
2540 CLOSE #2
2550 COLOR 14,1:LOCATE 24,10:PRINT "PARA CONTINUAR PRESIONA CUALQUIER TECLA"
2560 DS=INKEYS:IF DS="" THEN 2560 ELSE 2570
2570 LOCATE 24,10:INPUT "DESEAS IMPRIMIR DATOS Y RESULTADOS(S/N)";FS
2580 IF FS="" THEN PRINT "Opción no v lida":GOTO 2580
2590 IF FS="N" OR FS="n" THEN GOTO 2740
2600 LOCATE 24,10:INPUT " ESTA LISTA LA IMPRESORA (S/N)";WS
2610 IF WS="S" OR WS="s" THEN 2620 ELSE 2550
2620 LPRINT "Material Temperatura(°C) Vel.Def(S-I) Fecha [COMPRESION RESTRINGIDA]"
2630 LPRINT " ","MS"," ","SS"," ","VS"," ","KS;"
2640 LPRINT "DATO D/ini ALT/ini Carga D/MAY D/men ALT/final Radio/M x Radio/Curv "
2650 FOR J=1 TO NN
2660 LPRINT J;
2670 LPRINT USING "#####.## ",DI(J);HA(J);P(J);DM(J);D(J);H(J);KM(J);L(J)
2680 NEXT J
2690 LPRINT "DATO ESFUERZO DEFORMACION %DGV % DGV(Modificado)"
2700 FOR J=1 TO NN
2710 LPRINT J;
2720 LPRINT USING "#####.### ",T(J);DH(J);DG(J);GM(J)
2730 NEXT J
2731 LOCATE 25,20: INPUT "QUIERES VER GRAFICAS (S/N)";XS
2732 XS=INKEYS:IF XS="" THEN 1362
2733 IF XS="N" OR XS="n" THEN GOTO 2324
2734 IF XS="S" OR XS="s" THEN GOTO 3065
2740 REM ESPACIO
2750 SYSTEM
2760 REM ESPACIO
2770 REM ESPACIO
2780 COLOR 14,1:LOCATE 24,25:INPUT "QUE NÚMERO DE DATO DESEAS CORREGIR":J
2790 CLS
2800 CLS:COLOR 10,1:LOCATE 3,30:PRINT "D A T O S"
2810 LOCATE 5,8:PRINT "DATO # D/ini Alt/ini Carga D/may D/men Alt/in"
2820 LOCATE J+5,9:PRINT J;
2830 COLOR 9,1:LOCATE J+5,13:PRINT USING"#####.## ",DDO(J);H0(J);P(J);DM(J);D(J);H(J)
2840 COLOR 10,1:LOCATE 24,20:INPUT "ESTE ES EL DATO A CORREGIR":ES:CLS
2850 IF ES="S" OR ES="s" THEN 2860 ELSE 830
2860 CLS:LOCATE 5,30:COLOR 10,1:PRINT "DATO #":J;PRINT
2870 LOCATE 6,20:COLOR 7,1:INPUT "Di metro inicial (mm)=";DIDO(J)
2880 LOCATE 8,20:INPUT "Altura INICIAL (mm)=";H0(J)
2890 LOCATE 10,20:INPUT "Carga (KN)=";P(J)
2900 LOCATE 12,20:INPUT "Diámetro MAYOR (tun)=";DM(J)
2910 LOCATE 14,20:INPUT "Diámetro MENOR (mm)=";D(J)
2920 LOCATE 16,20:INPUT "Altura FINAL (mm)=";H(J)

```

```

2930 GOTO 830
2940 REM ESPACIO
2950 REM RUTINA QUE BORRA BASES DE DATOS EXISTENTES
2960 REM DE DATOS PREVIOS: *.INI en drive o subdirectorio predeterminado
2970 ON ERROR GOTO 3050
2980 FILES "*.INI"
2990 PRINT "para continuar PRESIONE CUALQUIER TECLA"
3000 CS=INKEY$:IF CS="" GOTO 3000 ELSE 3010
3010 CLS:LOCATE 10,10:PRINT "LA BUSQUEDA FUE POSITIVA, REALMENTE"
3020 LOCATE 11,10:INPUT "DESEAS ELIMINAR LAS BASES DE DATOS EXISTENTES (S/N)";WS
3030 IF WS="S" OR WS="s" THEN GOTO 3040 ELSE GOTO 3060
3040 KILL "*.INI"
3050 REM ESPACIO RESUME NEXT
3060 GOTO 90
3065 REM SUBROUTINA DE GRAFICACION
3070 REM Grafica2.bas:
3080 SCREEN 9 '2,0:
3081 GOTO 4000
3082 GOTO 4740
3090 COLOR 10,0
3100 A=35
3110 B=30
3120 C=350
3130 D=30
3140 LINE (0,0)-(639,310),14,B
3150 PAINT (2,2),9,14
3160 LOCATE 2,15: PRINT " ESFUERZO (MPa) ";LOCATE 2,55:COLOR 14,9:PRINT "% D G V "
3310 LOCATE 20,5:color 14,9: PRINT " 1 3 5 7 9 11 13";PRINT " 1 3 5 7 9 11 13".
3320 rem espacio
3330 LOCATE 22,20: COLOR 14,9:PRINT " D E F O R M A C I O N L O G A R I T M I C A ";
3340 LOCATE 24,2: COLOR 12,0:PRINT "VER DATOS EN PANTALLA= 1 ";REM IR A 1790
3350 LOCATE 24,40: COLOR 12,9:PRINT "VER RESULTADOS EN PANTALLA= 2";REM IR A 2250
3351 LOCATE 25, 2: COLOR 12,9:PRINT "REGRESAR A MENÚ PRINCIPAL= 3";REM IR A 10
3352 LOCATE 25,40: COLOR 12,9:PRINT "CONTINUAR CON EL PROGRAMA= 4"; REM IR A 2324
3360 LINE (A,B)-(315,260),7,BF: REM C U A D R O 1
3370 LINE (C,D)-(630,260),7,BF: REM C U A D R O 2
3380 FOR X=1 TO 15:REM este valor tambien debe de estar en funcion de algo
3390 LINE((20*X)+A-20,B+225)-((20*X)+A-20,B+5+225)
3400 NEXT X
3410 REM intervalo de esfuerzo primer cuadro (escala y)
3420 FOR X=1 TO 6
3430 LINE(A,(46*X)+B-46)-(A+5,(46*X)+B-46)
3440 NEXT X
3450 REM intervalo de %Def segundo cuadro (escala y)
3460 FOR X=1 TO 15
3470 LINE((20*X)+C-20,B+225)-((20*X)+C-20,B+5+225):REM ESCALA X
3480 NEXT X
3490 FOR X=1 TO 11
3500 LINE(C,(23*X)+B-23)-(C+5,(23*X)+B-23)
3510 NEXT X
3520 REM espacio
3521 REM aqui se tiene que iniciar la primer línea
3522 REM desde el primer dato hasta el último
3523 REM dependiendo de la escala ser el factor de multiplicación
3524 LINE (35,260)-(35+(DI(1)/0.5),260-(T(1)*FAC)),5
3530 for i=1 to NN-1 : rem número de datos (NN), ESFUERZO, DEFORMACION
3540 line ((35+(DH(i)/0.5)),(260-(T(i)*FAC)))-(((35+(DH(i+1)/0.5)),260-(T(i+1)*FAC))),5
3550 next i
3560 REM espacio
3570 for i=1 to NN-1 : REM %DGV, DEFORMACION
3571 IF DG(i)<0 TIEN 3572 ELSE 3580
3572 LET SUMA=46

```



```

3580 line ((350+(DH(I)/0.5)),(260-(DG(I)*FAA+SUMA)))-((350+(DH(I+1)/0.5)),260-(DG(I+1)*FAA+SUMA)),5
3590 next i
3600 REM espacio
3650 DO
3660 CCS=INKEY$
3670 LOOP UNTIL CCS="1" OR CCS="2" OR CCS="3" OR CCS="4"
3680 SCREEN 0,1
3690 IF CCS="3" THEN GOTO 10
3700 IF CCS="2" THEN GOTO 2250
3710 IF CCS="1" THEN GOTO 1790
3720 IF CCS="4" THEN GOTO 2324
4000 REM INICIO DE ESCALAS Y TABULACIONES EN GRAFICAS
4010 CLS:LOCATE 5,10: PRINT "ESCOGE SOLAMENTE UNA DE LAS SIGUIENTES OPCIONES"
4030 LOCATE 7,10:COLOR 7,1:PRINT "ESCALAS PARA ESFUERZO (MPa)"
4040 LOCATE 9,15:PRINT "[A] 0 - 100 "
4050 LOCATE 11,15:PRINT "[B] 0 - 150"
4060 LOCATE 13,15:PRINT "[C] 0 - 200"
4070 LOCATE 15,15:PRINT "[D] 0 - 250"
4080 LOCATE 17,15:PRINT "[E] 0 - 300"
4090 LOCATE 19,15:PRINT "[F] 0 - 350"
4100 LOCATE 21,15:PRINT "[G] 0 - 400"
4110 COLOR 14:LOCATE 23,15:INPUT "CUAL ES TU OPCION";ES
4120 IF ES="" THEN PRINT"opcion no valida":COLOR 10,0:GOTO 4110
4121 GOSUB 4740
4130 IF ES="A" OR ES="a" THEN GOTO 4200
4140 IF ES="B" OR ES="b" THEN GOTO 4280
4150 IF ES="C" OR ES="c" THEN GOTO 4340
4160 IF ES="D" OR ES="d" THEN GOTO 4420
4170 IF ES="E" OR ES="e" THEN GOTO 4500
4171 IF ES="F" OR ES="f" THEN GOTO 4590
4180 IF ES="G" OR ES="g" THEN GOTO 4670
4190 REM ESPACIO
4200 REM ESPACIO
4210 LOCATE 3,2: PRINT "100"
4220 LOCATE 6,2: PRINT "80"
4230 LOCATE 9,2: PRINT "60"
4240 LOCATE 12,2: PRINT "40"
4250 LOCATE 16,2: PRINT "20"
4251 LET FAC=2.3
4260 GOTO 3090
4270 REM ESPACIO
4280 REM ESPACIO
4290 LOCATE 3,2: PRINT "150"
4300 LOCATE 6,2: PRINT "120"
4310 LOCATE 9,2: PRINT "90"
4320 LOCATE 12,2: PRINT "60"
4321 LOCATE 16,2: PRINT "30"
4322 LET FAC=1.5
4331 GOTO 3090
4332 REM ESPACIO
4340 REM ESPACIO
4350 LOCATE 3,2: PRINT "200"
4360 LOCATE 6,2: PRINT "160"
4370 LOCATE 9,2: PRINT "120"
4380 LOCATE 12,2: PRINT "80"
4390 LOCATE 16,2: PRINT "40"
4391 LET FAC=1.15
4400 GOTO 3090
4410 REM ESPACIO
4420 REM ESPACIO
4430 LOCATE 3,2: PRINT "250"
4440 LOCATE 6,2: PRINT "200"

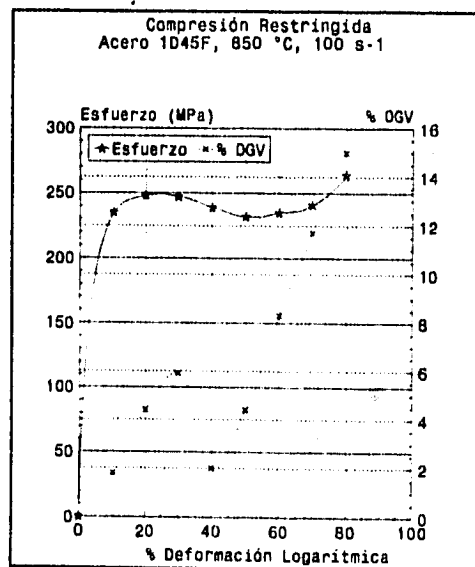
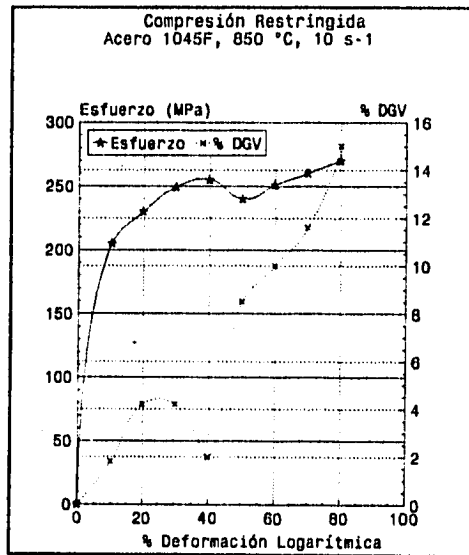
```

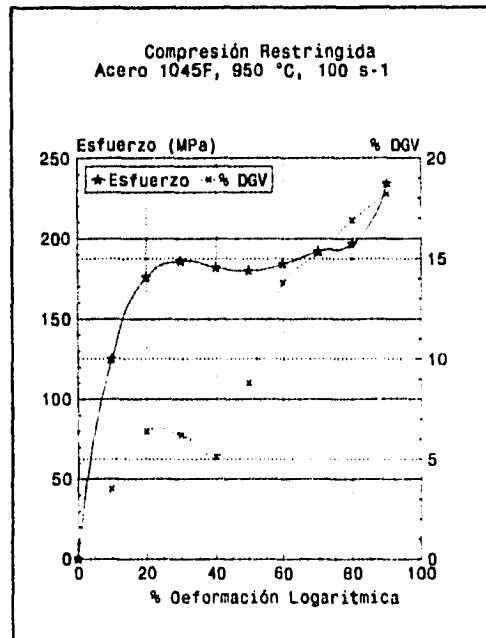
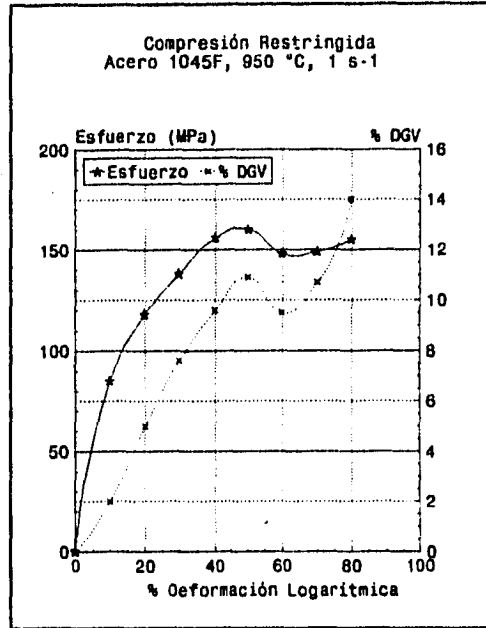
```

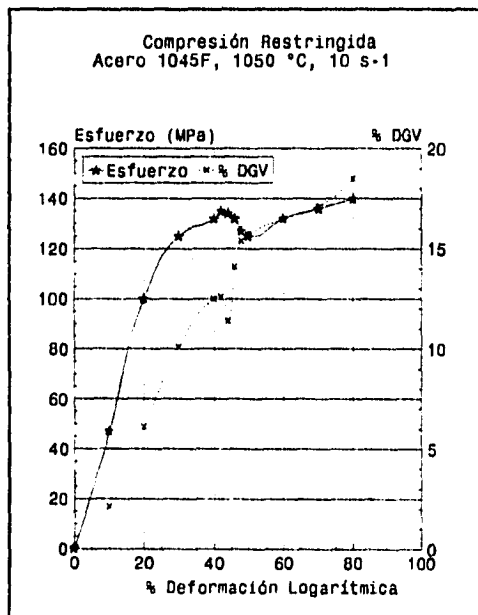
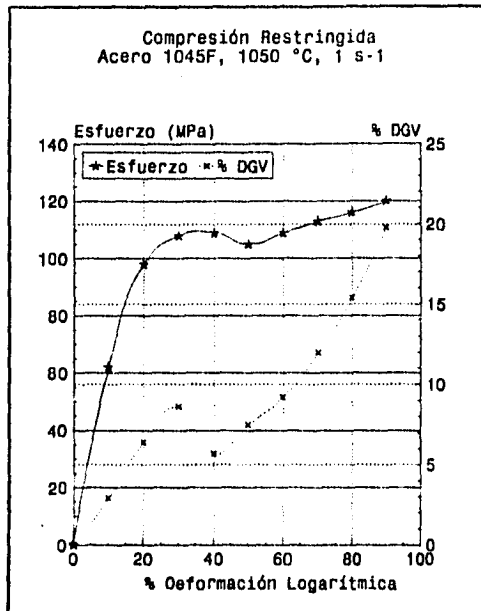
4450 LOCATE 9,2: PRINT "150"
4460 LOCATE 12,2: PRINT "100"
4470 LOCATE 16,2: PRINT "50"
4471 LET FAC=0.92
4480 GOTO 3090
4490 REM ESPACIO
4500 REM ESPACIO
4510 LOCATE 3,2: PRINT "300"
4520 LOCATE 6,2: PRINT "240"
4530 LOCATE 9,2: PRINT "180"
4540 LOCATE 12,2: PRINT "120"
4550 LOCATE 16,2: PRINT "60"
4551 LET FAC=0.76
4560 GOTO 3090
4570 REM ESPACIO
4580 REM ESPACIO
4590 REM ESPACIO
4600 LOCATE 3,2: PRINT "350"
4610 LOCATE 6,2: PRINT "280"
4620 LOCATE 9,2: PRINT "210"
4630 LOCATE 12,2: PRINT "140"
4640 LOCATE 16,2: PRINT "70"
4641 LET FAC=0.65
4650 GOTO 3090
4660 REM ESPACIO
4670 REM ESPACIO
4680 LOCATE 3,2: PRINT "400"
4690 LOCATE 6,2: PRINT "320"
4700 LOCATE 9,2: PRINT "240"
4710 LOCATE 12,2: PRINT "160"
4720 LOCATE 16,2: PRINT "80"
4721 LET FAC=0.575
4730 GOTO 3090
4740 LOCATE 7,45: COLOR 7,1: PRINT "ESCALAS PARA EL %DGV"
4750 LOCATE 9,45: PRINT "[A] 0 - 25 "
4760 LOCATE 11,45: PRINT "[B] -5 - 20"
4810 COLOR 14: LOCATE 15,40: INPUT "CUAL ES TU OPCION".WS:CLS
4820 IF WS="" THEN PRINT "OPCION NO VALIDA".COLOR 10,0:GOTO 4810
4830 IF WS="A" OR ES="a" THEN GOTO 4850
4840 IF WS="B" OR ES="b" THEN GOTO 4940
4850 LOCATE 3,42: PRINT "25"
4860 LOCATE 6,42: PRINT "20"
4870 LOCATE 9,42: PRINT "15"
4880 LOCATE 13,42: PRINT "10"
4890 LOCATE 16,42: PRINT "5"
4900 LOCATE 19,42: PRINT "0"
4901 LET FAA=9.2
4910 RETURN
4920 REM ESPACIO
4930 REM ESPACIO
4940 LOCATE 3,42: PRINT "20"
4960 LOCATE 6,42: PRINT "15"
4970 LOCATE 9,42: PRINT "10"
4980 LOCATE 13,42: PRINT "5"
4990 LOCATE 16,42: PRINT "0"
5000 LOCATE 19,42: PRINT "-5"
5001 LET FAA=9.2
5010 RETURN
5020 REM ESPACIO
5030 REM ESPACIO

```

APÉNDICE II







APÉNDICE III

Tablas de Resultados

Compresión Uniaxial

Rapidez de deformación :1s⁻¹

(Resultados en MPa)

% Deformación	T e m p e r a t u r a s		
	850 °C	950 °C	1050 °C
0	0	0	0
10	180	135	80
20	230	175	120
30	255	191	142
40	260	195	130
50	250	185	132
60	248	177	135
70	265	189	140
80	285	215	149
90	305	232	165
100	325	265	190
110	345	295	225
120	370		

Compresión Uniaxial

Rapidez de deformación :10 s⁻¹

(Resultados en MPa)

% Deformación	T e m p e r a t u r a s		
	850 °C	950 °C	1050 °C
0	0	0	0
10	182,5	135	105
20	245	182	136
30	265	210	152
40	280	216	148
50	282	208	141
60	276	201	140
70	262	202	141
80	263	209	147
90	285	219	155
100	325	240	162
110		271	195
120			

Compresión Uniaxial

Rapidez de deformación :100 s⁻¹

(Resultados en MPa)

% Deformación	Temperaturas		
	850 °C	950 °C	1050 °C
0	0	0	0
10	197	120	80
20	255	170	125
30	275	202	155
40	270	198	149
50	262	185	145
60	262	175	144
70	272	177	143
80	295	189	144
90		205	155
100		239	175
110			210
120			

Compresión Restringida

Rapidez de deformación :1s⁻¹

% Deformación	Temperaturas					
	850 °C		950 °C		1050 °C	
	σ(MPa)	%DGV	σ(MPa)	%DGV	σ(MPa)	%DGV
0	0	0	0	0	0	0
10	175	0.5	120	2	65	2.9
20	200	1.25	138	5	95	6.4
30	210	2.4	145	7.6	105	8.6
32		2.6				
34		0.9				
36		0.55				
38		0.65				
40	195	0.7	154	9.6	106	5.7
42		1.4				
44		2.35				
46		3.2				
48		4.4				
50	198	5.8	160	10.9	104	7.5
60	201	12.3	148	9.5	106	9.2
70	203	14.3	148	10.7	110	12
80	212		154	14	113	15.4
90	222		165		115	19.8

Compresión Restringida
 Rapidez de deformación :10s⁻¹

% Deformación	<u>T e m p e r a t u r a s</u>					
	<u>850 °C</u>		<u>950 °C</u>		<u>1050 °C</u>	
	σ (MPa)	%DGV	σ (MPa)	%DGV	σ (MPa)	%DGV
0	0	0	0	0	0	0
10	205	1.8	127	3.7	73	2.1
20	237	4.2	162	6.4	112	6.1
30	250	4.2	180	8.3	129	10.1
40	245	2	190	10.4	131	12.5
42						12.6
44				10.9		11.4
46				10.2		14.1
48				8.4		15.4
50	240	8.5	186	8.6	126	15.7
52				9		
54				9.7		
56				11		
58				11.1		
60	243	10	186	13.1	132	16.5
70	254	11.6	192	15.8	135	17.1
80	260	15	196		141	18.5

Compresión Restringida
 Rapidez de deformación :100s⁻¹

% Deformación	<u>T e m p e r a t u r a s</u>					
	<u>850 °C</u>		<u>950 °C</u>		<u>1050 °C</u>	
	σ (MPa)	%DGV	σ (MPa)	%DGV	σ (MPa)	%DGV
0	0	0	0	0	0	0
10	249	1.8	129	3.5	87	3.9
20	252	4.4	172	6.4	116	5.8
30	253	5.9	185	6.2	126	6.9
40	232	2	181	5.1	131	8.1
50	231	4.4	180	8.8	136	9.6
60	233	8.3	182	13.8	139	11.1
70	240	11.7	192	15.3	141	12.7
80	278	15	195	16.9	146	15.3
90				8.2		

APÉNDICE IV

Referencias de Figuras

- Fig. 1.1 Metals Handbook Vol. 8 p-363
- Fig. 1.2 Metals Handbook Vol. 8 p-364
- Fig. 1.3 Metals Handbook Vol. 8 p-364
- Fig. 1.4 Metals Handbook Vol. 8 p-365
- Fig. 1.5 Metals Handbook Vol. 8 p-365
- Fig. 1.6 Shey , J.A. Tribology in Metalrworking
- Fig. 1.7 Metals Handbook Vol. 8 p-366
- Fig. 1.8 Metals Handbook Vol. 8 p-367
- Fig. 1.9 Trabajo Mecánico de Metales J.M. Harris p-98
- Fig. 1.10 Trabajo Mecánico de Metales J.M. Harris p-99
- Fig. 1.11 Trabajo Mecánico de Metales J.M. Harris p-94
- Fig. 1.12 Trabajo Mecánico de Metales J.M. Harris p-69
- Fig. 1.13 Mechanical Metalurgy 3a. Ed. G. Dietter p-298
- Fig. 1.14 Trabajo Mecánico de Metales J.M. Harris p-66
- Fig. 1.15 Mechanical Metalurgy 3a. Ed. G. Dietter p-314
- Fig. 1.16 Workability Testing Techniques, G.Dietter p-56
- Fig. 1.17 Shey , J.A. Tribology in Metalrworking
- Fig. 1.18 Metals Handbook Vol. 8 p-370
- Fig. 1.19 Shey , J.A. Tribology in Metalrworking
- Tabla 2.1 Handbook of Metal Forming, Kurt Lange ; McGraw-Hill. ISBN 0-07-036285
- Fig. 2.1 Shey , J.A. Tribology in Metalrworking
- Fig. 2.2 Mechanical Metalurgy 3a. Ed. G.Dietter p-522
- Fig. 2.3 Mataya M.C. & Kraus, J. Applied Metalworking, Vol. 2, No. 1
- Fig. 2.4 Mataya M.C. & Kraus, J. Applied Metalworking, Vol. 2, No. 1
- Fig. 2.5 Mataya M.C. & Kraus, J. Applied Metalworking, Vol. 2, No. 1
- Fig. 2.6 Mechanical Metalurgy 3a. Ed. p-339
- Fig. 2.7 Mechanical Metalurgy 3a. Ed. p-346
- Fig. 2.8 Mechanical Metalurgy 3a. Ed. p-343
- Fig. 2.9 Handbook of Metal Forming, Kurt Lange ; McGraw-Hill. ISBN 0-07-036285

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Dieter, G.E. (ed), Workability Testing Techniques. ASM, 198, pp 1-19
- 2.- Metals Handbook Vol 8: Mechanical Testing, 9ª Ed., ASM, 1982, pp 571-597
- 3.- Van Stone, R.H., Int Met Rev, Vol 30, pp 157-179, 1985
- 4.- Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, 3ª Ed., McGraw-Hill, 1986, pp 432-470
- 5.- May, I.L., Principles of Mechanical Metallurgy, Elsevier N.H., 1981, pp 359-362
- 6.- Schey, J.A., Tribology in Metalworking, ASM, 1983, pp 11-24
- 7.- idem 4, pp 532-539
- 8.- Semiatin, S.L. & Jonas, J.J., Formability & Workability of Metals, ASM, 1984, PP 10-18
- 9.- idem 8, PP 23-28
- 10.- Harris, J.N., Mechanical Working of Metals, Pergamon Press Inc. New York, 1983, pp 71-84
- 11.- idem 10, pp 54-70
- 12.- idem 4, pp 295-304
- 13.- idem 5, pp 69-74
- 14.- Apuntes del Curso Panamericano de Metalurgia
- 15.- idem 4, pp 524-526
- 16.- idem 4, pp 70-100
- 17.- idem 5, pp 28-54
- 18.- idem 4, pp 539-549
- 19.- idem 6, pp 476-487
- 20.- Pöhlndt, K., Materials Testing for the Metal Forming Industry, Springer-Verlag, 1989
- 21.- Hoffmann, A.L., Metal Forming, Plenum Press, 1977
- 22.- McQueen, H.J. & Baudalet, B., en Strength of Metals and Alloys, Ed. P. Hassen, 1978, pp 329-336
- 23.- Bunshah, R.F., Techniques of Materials Research, Vol I, Pte 3, Interscience Publisher, 1968
- 24.- Norma ASTM E209: Standard Practice for Compression Test of Metallic Materials. 1988
- 25.- Mataya, M.C. & Krauss, G., en J. Applied Metalworking, Vol 2, No. 1, pp 28-37, 1981
- 26.- Norma SAE J412h, SAE Handbook, Vol I: Materials, 1985
- 27.- Norma NOM-E112
- 28.- Metals Handbook Vol 9: Metallography and Microstructure, 9ª Ed., ASM, 1985, pp 123-134
- 29.- Norma ASTM E9: Compression Testing of Metallic Materials
- 30.- Manuales de Referencia MTS, Vol I a III
- 31.- Fitzsimons, G., en Journal of Metals, May 1981, pp 11-17
- 32.- Strimel, R., en en Journal of Metals, May 1981, pp 18-21
- 33.- Hartley, C. & Jenkins, D., en Journal of Metals, July 1980
- 34.- Cooper, W. & Zweigorum, en Journal of Metals, July 1980
- 35.- Gálvez Tovar, R., Tesis Licenciatura, ESIQIE-IPN, 1990
- 36.- Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol II: Forming, SME, 4ª Ed., 1984
- 37.- Schey, J.A., Introduction to Manufacturing Proceses, McGraw- Hill. 2ª Ed., 1987