

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**PROPIEDADES MECANICAS EN ACEROS DE
BAJO CARBONO LAMINADOS EN FRIJO**

PRESENTA

ING. FERNANDO MARTINEZ CONTRERAS

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

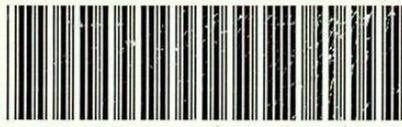
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. A JUNIO DE 2002

2002

TM
Z5853
.M2
FIME
2002
M37

PROPIEDADES MECANICAS EN ACEROS DE
BAJO CARBONO LAMINADOS EN FRIO.

F M C



1020147736

m

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA



DADES VTC ... V ...
RAJO ... ARRON ... AM ...

PRESEN A

ERNANDO MARINEZ ...

...
...
... LA INGENIERIA ...
... ESPECIALIDAD EN MAQUINAS

NICOLAS DE LOS GARZA. N. L. JUNIO DE 2002

975952

TM

Z 5853

.M2

FIME

2002

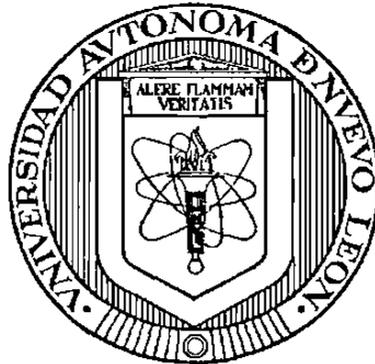
.M37.



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



PROPIEDADES MECÁNICAS EN ACEROS DE BAJO CARBONO
LAMINADOS EN FRÍO

PRESENTA

ING. FERNANDO MARTÍNEZ CONTRERAS

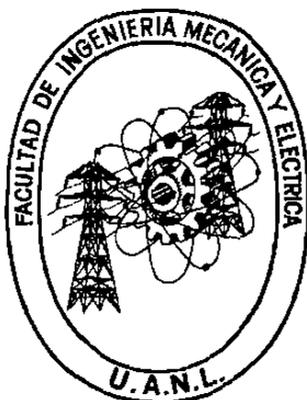
TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L., JUNIO DE 2002

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



PROPIEDADES MECÁNICAS EN ACEROS DE BAJO CARBONO
LAMINADOS EN FRÍO

PRESENTA
ING. FERNANDO MARTÍNEZ CONTRERAS

TESIS
EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L., JUNIO DE 2002

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

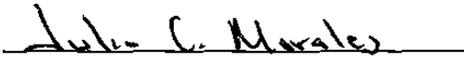
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Propiedades mecánicas en aceros de bajo carbono laminados en frío" realizada por el alumno Fernando Martínez Contreras, matrícula 786400 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis.



Asesor

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata.



Coasesor

Dr. Julio César Morales Chavela



Coasesor

Dr. José Luis Cavazos García



Vo. Bo.

Dr. Gpe. Alan Castillo Rodríguez

Subdirector

División de Estudios de Post-grado.

San Nicolás de los Garza, N.L., junio de 2002

DEDICATORIAS

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por ser parte de mi desarrollo profesional.

Al PDIM por estos dos años de mi vida que serán inolvidables.

Al CONACYT por el apoyo recibido y espero que siempre sigan impulsando esta clase de programas.

A todos los Doctores que tuvieron alguna influencia en mi de este programa por que gracias a ellos pude ampliar mi criterio y ver de otro enfoque este mundo.

Al Dr. Rafael Colás por permitirme trabajar con el y dejarme que me equivocara por que así me di cuenta que no soy perfecto y que el mundo tampoco lo es.

A la Dra. Martha Patricia Guerrero por aceptar ser mi asesora, estar siempre al pendiente de mis avances y ayudarme en los ensayos que realice.

A los Drs. Julio Cesar Morales Chavela y José Luis Cavazos García por su cooperación y rapidez en la revisión de la tesis presente.

A Adriana Salas por su gran paciencia y ayuda.

Al Dr. Moisés Hinojosa por ser uno de los mejores catedráticos que he tenido y darme la mano en cualquier duda.

Al M.C. Gerardo Salinas por apoyarme incondicionalmente y creer en este proyecto a pesar de todas las adversidades que se presentaron.

A todos los becarios que me ayudaron en la realización de las pruebas y especialmente a Ricardo González el cual me ayudo como becario y empleado de HYLSA.

A Julián Rodríguez por ser una especie de guía para mi y compartir algunos de sus bastos conocimientos conmigo.

A Rodrigo González por participar de una manera muy importante en el cambio de mi visión con respecto a la vida.

Al Ing. Omar Garza por sus consejos que me evitaron muchos problemas en mi experimentación.

A todos mis compañeros y familiares por estar ahí para mi.

ÍNDICE

Dedicatorias	I
Agradecimientos	II
Resumen	1
Capítulo 1 Introducción	3
Capítulo 2 Equipo y proceso de laminación	6
2.1 Introducción	6
2.1.1 Metalurgia mecánica	9
2.2 Laminación	9
2.2.1 Molinos de laminación	9
2.2.2 Clasificación de los molinos de laminación	11
2.2.3 Molinos de laminación en frío	14
2.2.4 Diferentes tipos de arreglos de rodillos	14
2.3 Requerimientos para que se efectúe la laminación	16
2.3.1 Términos utilizados en la teoría de laminación	16
2.3.2 Fuerzas y relaciones geométricas	18
2.3.3 Efecto de la colina de fricción en la laminación	21
Capítulo 3 Trabajado en frío	23
3.1 Introducción	23
3.2 Mecanismos de endurecimiento	25
3.2.1 Dislocaciones	25
3.2.2 Deformación por deslizamiento	28
3.3 Modelos reológicos	35

3.4 Teoría de plasticidad	37
3.4.1 Curvas de fluencia	39
3.4.2 Criterio de Considere	42
3.4.3 Criterios de cedencia	43
Capítulo 4 Procedimiento experimental	45
4.1 Trabajo de campo	46
4.1.1 Maquinado	47
4.2 Trabajo de laboratorio	49
4.2.1 Ensayos realizados	49
4.2.2 Tensión	50
4.2.3 Compresión	50
4.2.4 Dureza Vickers	51
4.2.5 Metalografía	51
4.2.6 Tamaño de grano	54
Capítulo 5 Resultados y discusión	55
5.1 Introducción y resultados	55
5.2 Relación del modulo de Young con la gráfica fuerza-espaciamento interatómico	56
5.3 Obtención de n y k	61
5.4 Relación dureza Brinell-resistencia a la tensión	70
5.5 Relación dureza Brinell dureza Vickers	71
5.6 Evolución microestructural	74
5.7 Relación esfuerzo-tamaño de grano	76
5.8 Tamaño de grano	79

Capítulo 6 Conclusiones y sugerencias para trabajos futuros	80
Referencias Bibliográficas	82
Apéndice A (Esfuerzo ingenieril-esfuerzo real)	84
Apéndice B (Curvas esfuerzo-deformación de las bandas y cada pase en los aceros A y B)	86
Apéndice C (Datos importantes de las bandas)	119
Apéndice D (Puntos de fluencias)	121
Apéndice E (Datos del molino)	123
Resumen Autobiográfico	126

RESUMEN

En el presente trabajo se caracteriza y analiza dos aceros de bajo contenido de carbono, los cuales pasan a través de un proceso de formado, el cual se efectúa en un molino reversible de laminación en frío.

Con el propósito de sentar las bases para el desarrollo posterior de un modelo matemático, el cual deberá describir lo más cercano posible el proceso de laminación, se tomarán en cuenta las variables críticas para este proceso y así se espera predecir el comportamiento de dicho proceso bajo condiciones específicas de laminación. Por lo cual es importante conocer las propiedades mecánicas de cada uno de estos aceros en cada uno de los pasos de laminación.

Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para conocer los antecedentes y la forma de resolver el problema planteado con anterioridad, después se procedió a recolectar información sobre el molino y los datos que podemos obtener del mismo y así poder seleccionar la información que sea conveniente para el análisis pasando a la elección de los aceros a estudiar así como la producción de las probetas necesarias para los diferentes análisis.

Se seleccionaron dos tipos de aceros a los cuales se referirá como A y B, de los cuales de los aceros tipo A se tomaron muestras de tres rollos y del acero tipo B dos rollos, a los cuales se les realizó análisis microestructural, se obtuvo la composición química, se realizaron ensayos de tensión en tres direcciones de la lamina, pruebas a compresión axial y dureza Vickers.

Se obtuvieron de las curvas de esfuerzo real-deformación equivalente, en las cuales se presentan la ecuación constitutiva de cada una de ellas, así como las curvas esfuerzo real-deformación real de las bandas de los aceros estudiados, en las cuales se puede observar el cambio de pendiente, la cual aumenta conforme aumenta la deformación en cada paso de laminación.

Se obtuvieron curvas de dureza Vickers-deformación equivalente con el objetivo de corroborar que existe una relación entre el esfuerzo de fluencia y la dureza de un material. Existe una discrepancia entre la curva de fluencia longitudinal y la transversal, lo cual probablemente se deba a un problema de textura.

Se caracterizó el tamaño de grano por el método Heyn Intercept y se observó la evolución microestructural de los aceros A y B. Se estableció una metodología para el estudio de las propiedades mecánicas de los aceros laminados en frío, también se encontraron las curvas de fluencia para cada uno de los aceros así como sus ecuaciones constitutivas, se observó que la relación que guarda la dureza con respecto al esfuerzo de fluencia ($1/3\sigma=HV$). Lo cual también sirvió para corroborar la validez de los ensayos de tensión realizados, además se observó la relación de las propiedades mecánicas con el tamaño de grano según la relación de Hall-Petch, lo cual lleva a la conclusión de que el tamaño de grano encontrado corresponde al valor del esfuerzo de fluencia de los ensayos de tensión realizados, por último se observó que no se presentó un comportamiento variable en las gráficas construidas para el mismo material y para ambos materiales también se presentó un comportamiento similar.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En cualquier proceso de formado se deben aplicar fuerzas externas a la pieza, ya sea, mediante una máquina o un dispositivo adecuado. Estas fuerzas deben ser cuantificadas para seleccionar la máquina o dispositivo capaz de efectuarlas y deformar así al material. La manera en que el material se resiste a ser deformado por la fuerza aplicada depende de las características físicas del material y de las condiciones en que se efectúa la deformación.

Las condiciones que influyen en las propiedades mecánicas del material se pueden dividir en dos grupos: las que dependen del tipo de carga aplicada (como el esfuerzo de cedencia del material, que puede ser mayor a la fuerza máxima que puede proporcionar el equipo para deformar el material de un solo pase, por lo tanto el material no se deformaría, teniendo que dividir el proceso en varios pasos) y las que modifican la respuesta del material debido a la naturaleza de éste (la ductilidad del material puede no ser la suficiente para que

se deforme hasta ciertos espesores o bien la velocidad de deformación puede no ser la adecuada para determinado proceso) [1].

En el desarrollo de la deformación de un material a una forma deseada se involucra un elemento que transmite la acción de la máquina al material: la herramienta. Es necesario considerar la interacción de la herramienta con el material, pues de ello depende la energía necesaria para realizar el proceso y otras propiedades físicas como forma, acabado superficial y dimensiones del producto, entre otras.

Existe una secuencia en el proceso de conformado determinada por los siguientes factores o una combinación de ellos:

a) La máxima fuerza que se puede realizar con el equipo disponible puede ser inferior a la necesaria para llevar a cabo el proceso en un solo paso. En tal caso, es necesario subdividir el proceso en etapas.

b) El material tiene una ductilidad limitada, lo cual puede afectar al proceso del mismo modo que la insuficiencia en capacidad del equipo mencionada en el punto anterior. La solución deberá ser similar a la anterior pero ahora vista por el lado del material.

c) La estructura interna del material debe satisfacer los requisitos del producto final en cuanto a sus propiedades, de manera que, a ciertas cantidades de deformación se lleven a cabo en determinados rangos de temperatura y que entre una deformación y otra transcurra cierto tiempo. El proceso deberá diseñarse con estas exigencias que aseguran la calidad del producto final.

De manera que, existe una cantidad importante de factores que actúan en forma conjunta determinando el fracaso o éxito de un proceso de conformado. Quien sea responsable de este proceso debe de ser capaz de establecer los

vínculos entre estos factores y la importancia relativa de cada uno de ellos en la calidad del producto final.

Por todo lo anterior, el objetivo fundamental de este trabajo es determinar las propiedades mecánicas de los aceros en este proceso de formado (laminación).

CAPÍTULO 2

LAMINACIÓN EN FRÍO

2.1 INTRODUCCIÓN.

Historia de la laminación.

El laminado del oro y la plata por medios manuales data del siglo XIV. Leonardo da Vinci diseñó un par de diagramas de los primeros molinos de laminación en 1480, figura 2.1.1, pero es dudoso que su modelo se haya construido alguna vez [2,3]. Alrededor del año 1600 se practicaba el laminado de plomo y estaño en molinos manuales. El hierro ya se laminaba en caliente en Alemania, Bélgica, Francia, Inglaterra y Suecia para el año 1700. Estos molinos se usaron para hacer lámina a partir de barras de hierro. Antes de esta época, los únicos molinos laminadores que existían eran molinos ranuradores, figura 2.1.2, pares de molinos opuestos con collares (discos cortantes) que cortaban el hierro y el acero en tiras angostas para hacer clavos y productos similares. Los molinos ranuradores no estaban diseñados para reducir el espesor del metal.

La práctica moderna del laminado data del año 1783, cuando se expidió en Inglaterra una patente para un proceso que producía barras de hierro usando rodillos acanalados.

La revolución industrial creó una tremenda demanda de productos de hierro y de acero, estimulando el desarrollo de la laminación. El primer molino que laminaba rieles para ferrocarril se inició en Inglaterra en 1820. Las primeras vigas en I se laminaron en Francia en 1849. Además, el tamaño y la capacidad de los molinos de laminado plano se incrementaron dramáticamente durante este periodo.

El laminado es un proceso que requiere una fuente muy grande de potencia. Hasta el siglo XVIII se usaron las ruedas accionadas por agua para mover los molinos de laminación. Las máquinas de vapor incrementaron la capacidad de estos molinos de laminación hasta poco después de 1900, cuando los motores eléctricos reemplazaron al vapor.

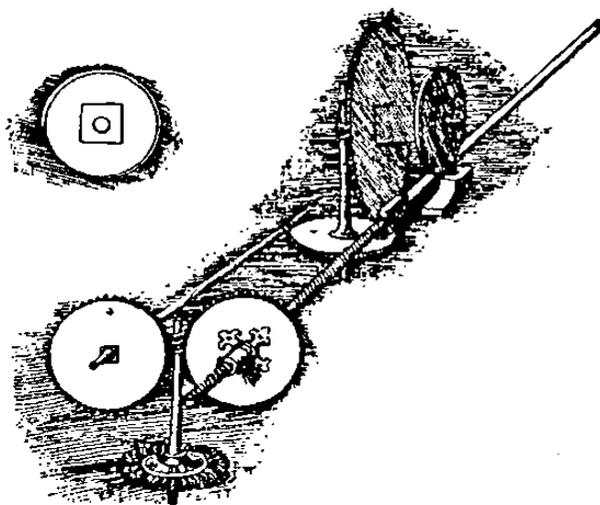
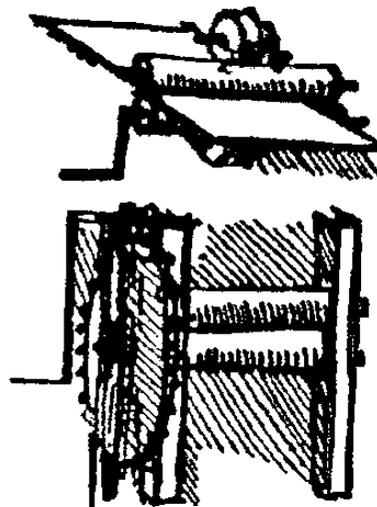
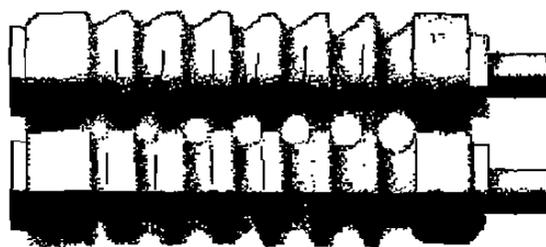
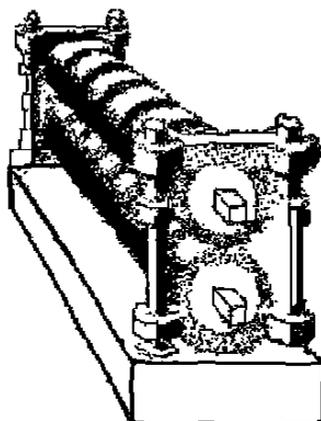


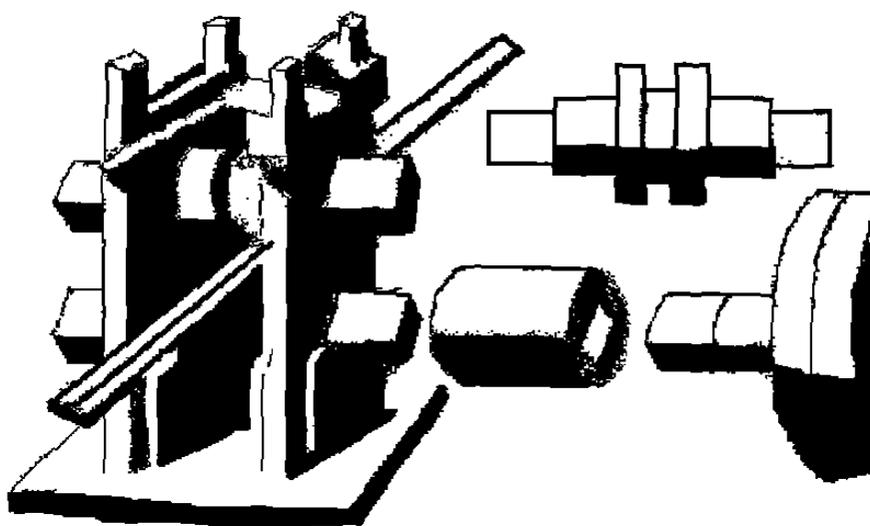
FIGURA 2.1.1
a) Dibujo de Leonardo da Vinci de una máquina para formar el plomo de los vitrales.



b) Diagrama de un molino laminador por Leonardo da Vinci [2].



a)



b)

FIGURA 2.1.2 a) Rodillos ranuradores para hacer clavos, siglo XVI
b) Rodillos ranuradores utilizados alrededor del siglo XVI [4].

2.1.1 Metalurgia Mecánica.

Es la parte de la metalurgia que se ocupa de la respuesta de los metales frente a las fuerzas o cargas que se le aplican [5,6]. Los metales, en la tecnología moderna, tienen gran importancia económica, debido a la facilidad con que se les pueden dar formas útiles. Existen diferentes procesos para trabajar los metales destinados a funciones específicas en base a como se aplican las fuerzas de conformación. Estos se pueden clasificar como:

1. -Proceso de compresión directa.
2. -Proceso de compresión indirecta.
3. -Proceso de tensión.
4. -Proceso de plegado, flexión o doblado.
5. -Proceso de cizallamiento.

En los procesos de compresión directa, la fuerza se aplica a la superficie de la pieza del metal que se trabaja y éste fluye siguiendo una dirección normal a la de compresión [5,6,7]. Los ejemplos más representativos de estos procesos son la forja y la laminación.

2.2 LAMINACIÓN.

El proceso de deformación plástica de un metal pasando a través de dos rodillos es conocido como laminación (proceso de compresión directa) [8].

2.2.1 Molinos de laminación.

La laminación se efectúa en una máquina conocida como molino, definiéndose como el equipo mecánico que consta del castillo, rodillos, transmisión motor, herrajes y equipos auxiliares [8].

Los rodillos pueden tener una periferia plana o acanalada los cuales van montados en una carcasa como la que se presenta en la figura 2.2.1.

Los rodillos en contacto con la lamina son, llamados rodillos de trabajo mientras que aquellos rodillos que proveen el soporte para que los rodillos de trabajo no se deflexionen ya sea vertical o lateralmente son conocidos como rodillos de apoyo ver figura 2.2.1.

El mecanismo de ajuste del entrehierro provee la apertura requerida entre los rodillos de trabajo y permite el ajuste de la altura del pase.

El tren motriz principal provee la rotación de los rodillos con la velocidad deseada y el torque de rolado.

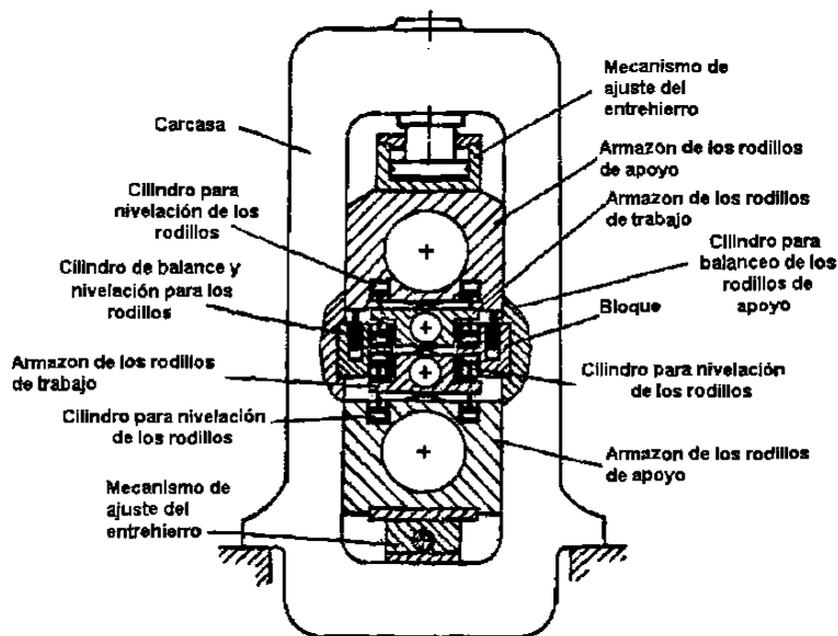


FIGURA 2.2.1 Ilustración de un castillo horizontal visto de lado [9].

2.2.2 Clasificación de los molinos de laminación.

En términos generales los molinos de laminación para aceros al carbono se pueden clasificar con respecto a la temperatura de laminación, tipo de producto y arreglo de los castillos.

1.-Temperatura de laminación.

Molinos de laminación en frío para aceros.

Este proceso es considerado cuando la temperatura inicial de trabajo es igual a la temperatura ambiente, durante el proceso de laminación se incrementa la temperatura entre los 50 y 65°C

Molinos de laminación en tibio para aceros.

Generalmente se lleva a una temperatura sustancialmente debajo de la temperatura crítica A_1 , ver figura 2.2.2, la cual para aceros de bajo carbono es aproximadamente de 730°C. La temperatura deseada en la laminación se obtiene por un precalentamiento de la pieza o por una lubricación controlada utilizando el calor generado durante el proceso de laminación.

Molinos de laminación en caliente para aceros.

El proceso de laminación en caliente en los aceros generalmente empieza cuando la temperatura de trabajo es igual o menor a 1315 °C, siendo usualmente la temperatura de trabajo alrededor de los 1000 °C y es completado cuando la temperatura alcanza la zona crítica A_3 , ver figura 2.2.2, la cual para aceros de bajo carbono es alrededor de los 900°C de este modo la mayor parte del proceso se lleva a cabo cuando el material se encuentra en la fase austenítica [10].

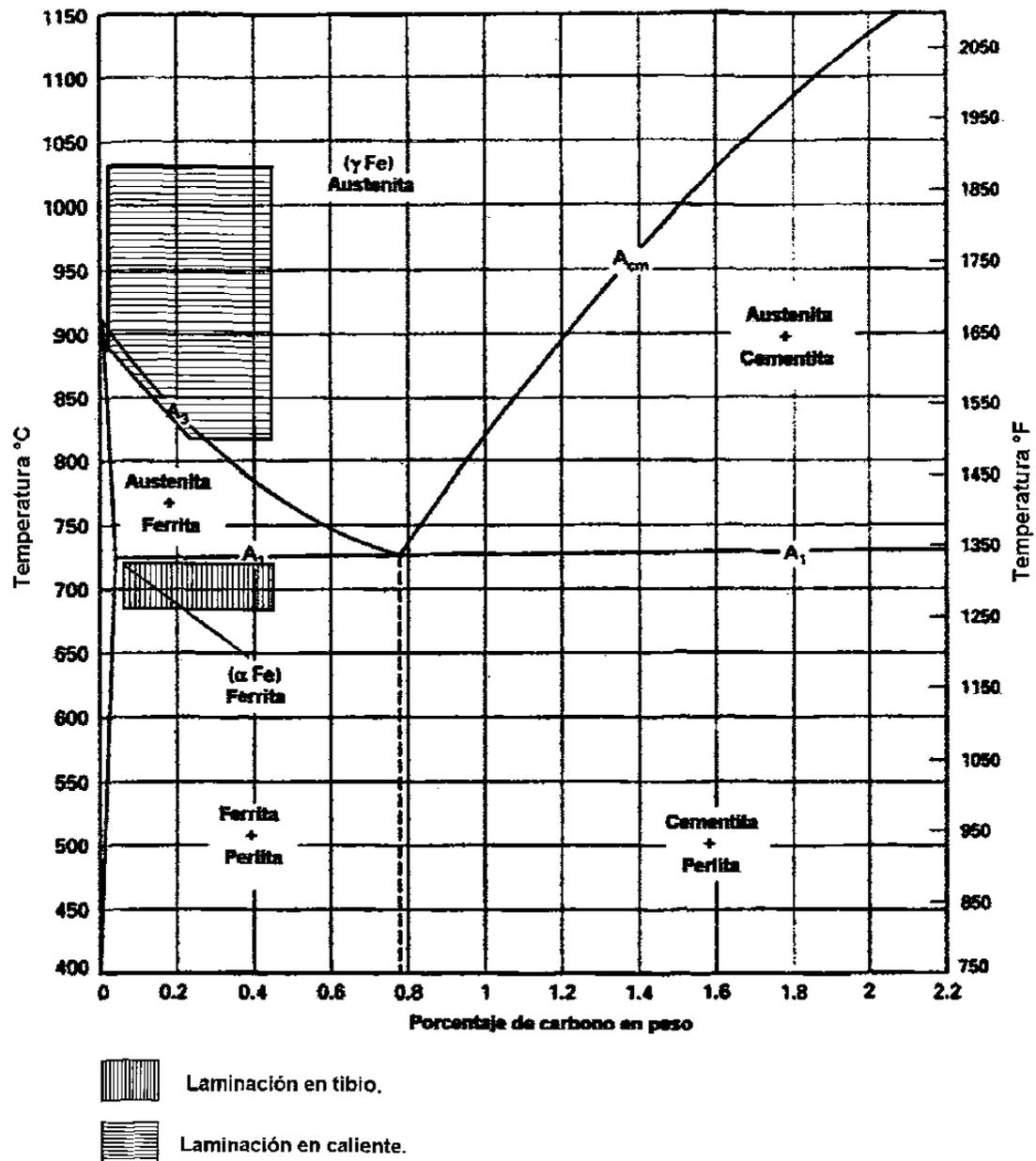


FIGURA 2.2.2 Diagrama de hierro-carburo de hierro, en el cual se presentan las zonas de laminación en tibio y caliente para aceros al carbono [11].

2.-Productos laminados.

También se pueden clasificar a los molinos según el producto que se lamina, los cuales pueden ser:

a) Molino para tocho.

Los tochos se laminan para generar perfiles estructurales y rieles para los ferrocarriles, figura 2.2.3.

b) Molino para plancha.

Las planchas se laminan para convertirlas en placas, laminas y tiras, figura 2.2.2.

c) Molino para palanquilla.

Las palanquillas se laminan para producir barras y varillas, figura 2.2.3.

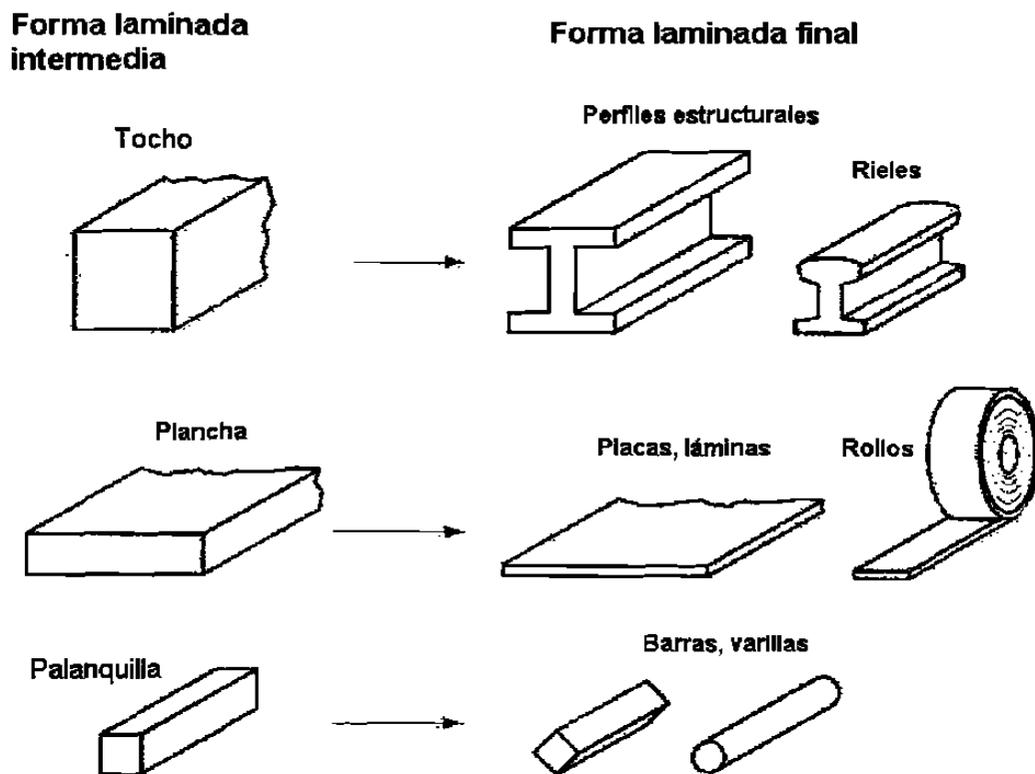


FIGURA 2.2.3 Varios productos laminados hechos en diferentes molinos de laminación [12].

3.-Arreglo de los castillos.

a) Molino de castillos abiertos. Este se compone de los cilindros, cojinetes, la carcasa que es la que soporta todos los dispositivos incluyendo los rodillos y se dice que es de castillos abiertos cuando los dispositivos no están completamente cerrados por la carcasa, ver figura 2.2.1.

b) Castillos cerrados dobles. Es en los cuales los dispositivos se encuentran completamente cubiertos por la carcasa y se pueden clasificar en:

- i) Molino Universal
- ii) Molino Continuo

2.2.3 Molinos de laminación en frío.

Los molinos de laminación en frío más comunes son:

1. De castillo simple. Este tipo de equipo tiene dos variantes.

- a) Molino frío de alta reducción. Los cuales son capaces de dar una reducción del 50% en un solo pase.
- b) Molino de pases superficiales. Los cuales se utilizan para reducciones pequeñas de 0.5 a 4.0 % (éstos pueden ser reversibles).

2. De castillos gemelos o molino frío de doble reducción. Comúnmente este es un equipo no reversible.

3. Molino frío continuo. Tres o más castillos cerrados usualmente constituyen un tren continuo.

2.2.4 Diferentes tipos de arreglo de rodillos.

Un arreglo de rodillos montado en un par de carcasas constituye un castillo, el cual se puede combinar de varias formas para dar diferentes tipos de arreglos de molinos para funciones distintas, de aquí se puede clasificar a un molino en base a su arreglo de rodillos.

En la práctica de la laminación en frío los molinos dúo, cuarto y los molinos de grupo incluyendo el de tipo racimo constituyen los principales ejemplos de castillos simples, ver figura 2.2.4.

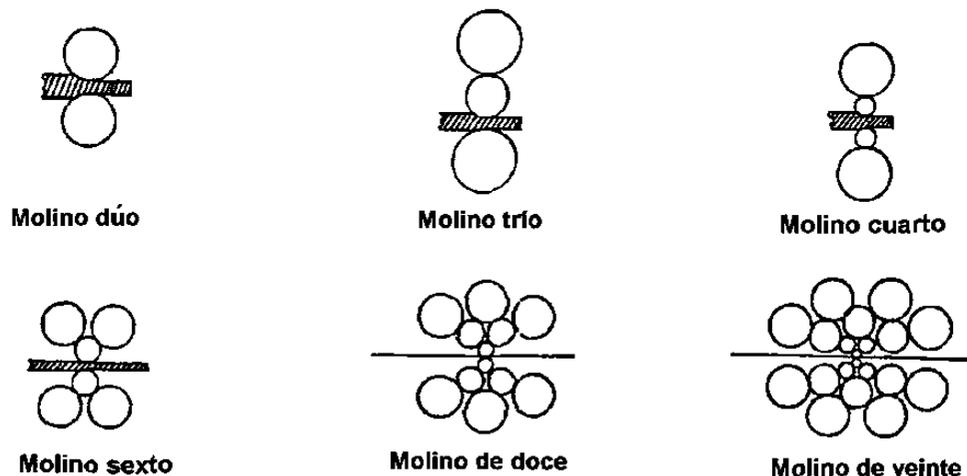


FIGURA. 2.2.4 Diferentes tipos de arreglos en molinos fríos de laminación [2].

También se pueden clasificar según la dirección de los ejes de los rodillos. Para facilidad de comprensión la clasificación de este tipo se muestra en la figura 2.2.5.

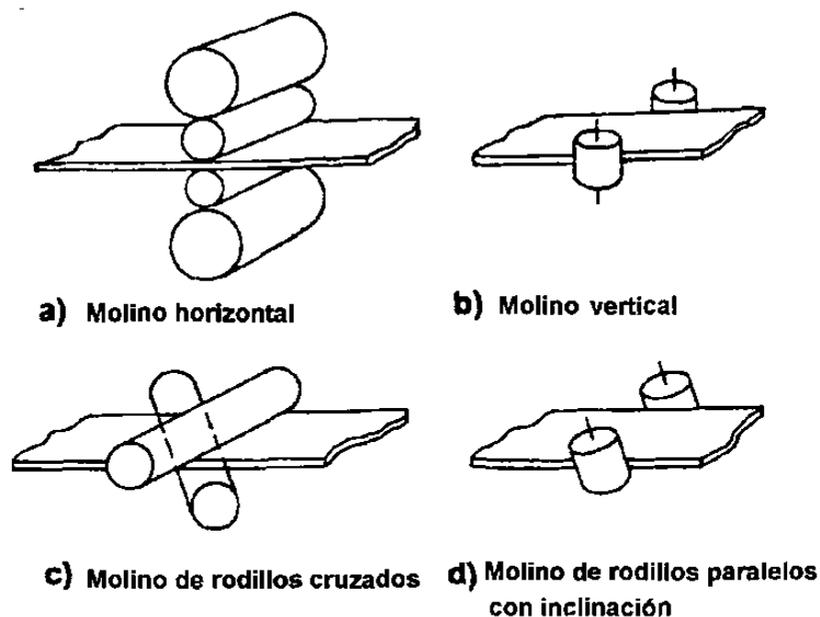


FIGURA 2.2.5 Molinos con diferentes direcciones en los ejes de laminación [9].

Dirección de laminación. Se pueden clasificar en dos tipos.

- a) Molino continuo. Este molino está diseñado para laminar en una sola dirección.
- b) Molino reversible. Este molino puede laminar en ambas direcciones.

2.3 REQUERIMIENTOS PARA QUE SE EFECTÚE LA LAMINACIÓN.

Anteriormente se mencionó que para que el proceso de conformación pueda ser llamado laminación, se requiere que el metal se deforme al pasar entre dos rodillos, sin embargo, para que el metal se introduzca entre ellos se requiere de varias condiciones sin las cuales el proceso no puede llevarse a cabo.

Un principio básico de la mecánica establece que cuando dos cuerpos en movimiento relativo son colocados en contacto, aparece una fuerza de fricción a lo largo de la tangente común y en dirección del movimiento relativo del otro cuerpo [8]. Lo cual da lugar a utilizar una terminología para describir estas fuerzas, la cual se presenta en la sección siguiente.

2.3.1 Términos utilizados en la teoría de laminación.

Los términos que siguen son los más comúnmente utilizados en la teoría de la laminación;

Espesor promedio de la pieza de trabajo.

$$h_a = (h_1 + h_2) / 2 \quad (2.3.1)$$

donde h_1 , h_2 son los espesores a la entrada y a la salida respectivamente.

Espesor medio de la pieza de trabajo es:

$$h_m = (h_1 h_2)^{1/2} \quad (2.3.2)$$

Entrehierro el cual es expresado como:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (2.3.3)$$

La reducción relativa está dada por:

$$R = \Delta h / h_1 = 1 - h_1/h_2 \quad (2.3.4)$$

La elongación es expresada como:

$$e = h_1/h_2 \quad (2.3.5)$$

El ángulo de mordida (α) es el ángulo que se forma entre los centros de los rodillos y los puntos de entrada y salida de la lámina, ver figura 2.3.1

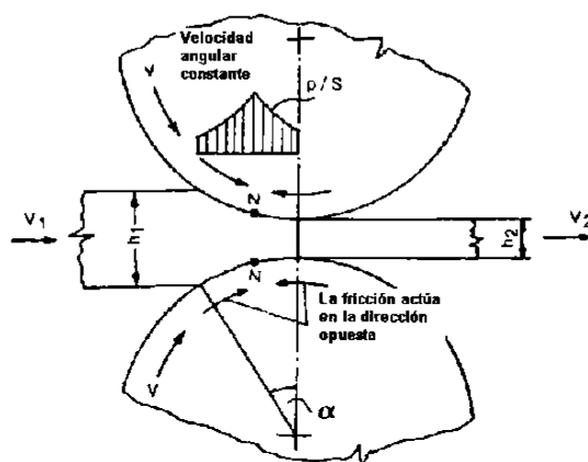


FIGURA 2.3.1 Representación de la zona de deformación durante la laminación [9].

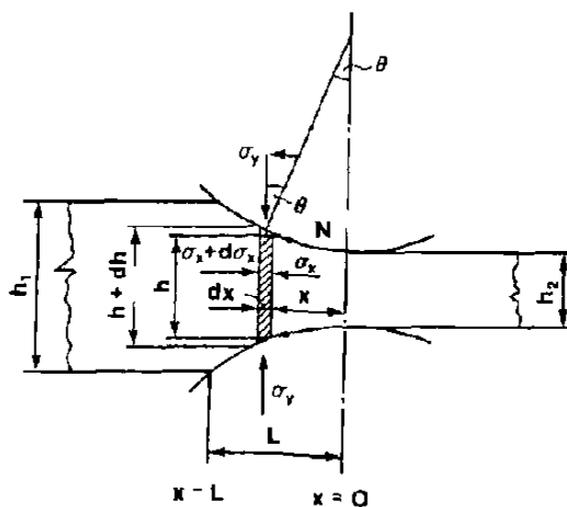


FIGURA 2.3.2 Representación de la zona de deformación durante la laminación [9].

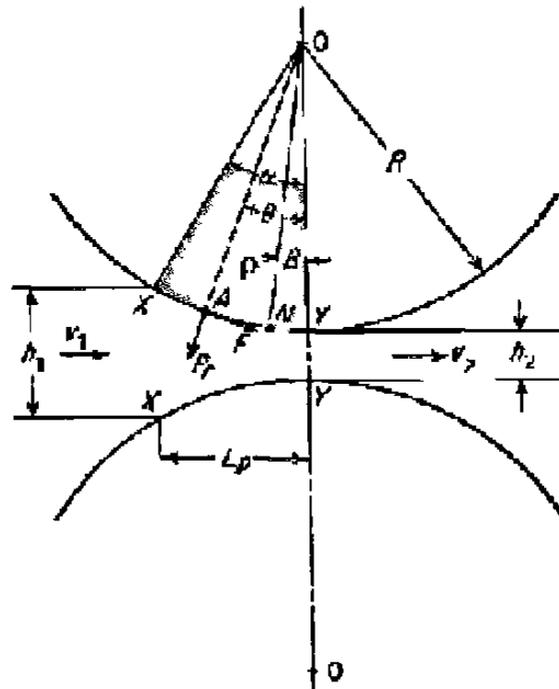


FIGURA 2.3.3 Fuerzas que actúan durante la laminación modificada de [5].

2.3.2 Fuerzas y relaciones geométricas.

Una de las consideraciones que se hace en la laminación es que el aumento del ancho de la lámina al reducir el espesor es despreciable, por lo que esta reducción se traduce en aumento de longitud y hay flujo de volumen constante en toda la línea de laminación.

De lo anterior resultan las siguientes igualdades:

$$bhv = bh_1v_1 = bh_2v_2 \quad (2.3.6)$$

donde:

b= ancho de la lámina

v= velocidad

h= espesor

(Los subíndices 1 y 2 significan inicial y final respectivamente, ver figura 2.3.2).

Otros conceptos importantes de la geometría y las fuerzas en la laminación son los siguientes:

Arco de contacto: es el arco de contacto entre el rodillo y la lámina.

Punto neutro (N): en este se consideran que las velocidades tangenciales del rodillo y la velocidad de la lámina son iguales, figuras 2.3.2 y 2.3.3.

Fuerza radial (P_r): es la fuerza radial que ejerce el rodillo sobre cualquier punto del arco de contacto, figura 2.3.3.

Fuerza tangencial de fricción (F): fuerza tangencial al arco de contacto debido a la fricción entre el rodillo y la lámina, figura 2.3.3.

Carga de laminación (P): componente vertical de la fuerza radial P_r .

Presión específica de los rodillos (p): Es igual a la carga de laminación dividida entre la proyección de la superficie de contacto (L_p). $P=P/bL_p$.

Donde :

$$L_p = [R(h_1 - h_2) - (h_1 - h_2)^2/4]^{1/2} \quad (2.3.7)$$

Angulo de contacto o mordida (α): Angulo formado por la línea entre el punto O (centro del rodillo) y el punto de entrada X y la línea entre centros de los rodillos, figura 2.3.3.

El seno del ángulo α es igual a la proyección horizontal del arco de contacto dividido por el radio del rodillo, figura 2.3.3.

$$\text{sen } \alpha = [R(h_1 - h_2)]^{1/2} / R = [2(h_1 - h_2)/D]^{1/2} \quad (2.3.8)$$

Siendo D el diámetro del rodillo. Entonces el ángulo de no-deslizamiento puede expresarse por:

$$\beta \approx [(h_1 - h_2)/2D]^{1/2} - 1/F (h_1 - h_2)/2D \quad (2.3.9)$$

Angulo de no-deslizamiento (β): Angulo formado por la línea entre el punto O (centro del rodillo) y el punto neutro N y la línea entre centros de los rodillos, figura 2.3.3.

La distribución de la presión del rodillo a lo largo del arco de contacto se indica en la figura 2.3.4. La presión alcanza un máximo en el punto neutro, y a partir de este empieza a disminuir hasta llegar a cero. El área que queda bajo la curva es proporcional a la carga de laminación y para fines de cálculo se admite que actúa en el centro de gravedad de la distribución de presión. El área rayada de la figura 2.3.4 representa la fuerza requerida para vencer a la fricción, mientras que el área no rayada bajo la línea AB, corresponde a la fuerza necesaria para deformar homogéneamente al metal en compresión plana.

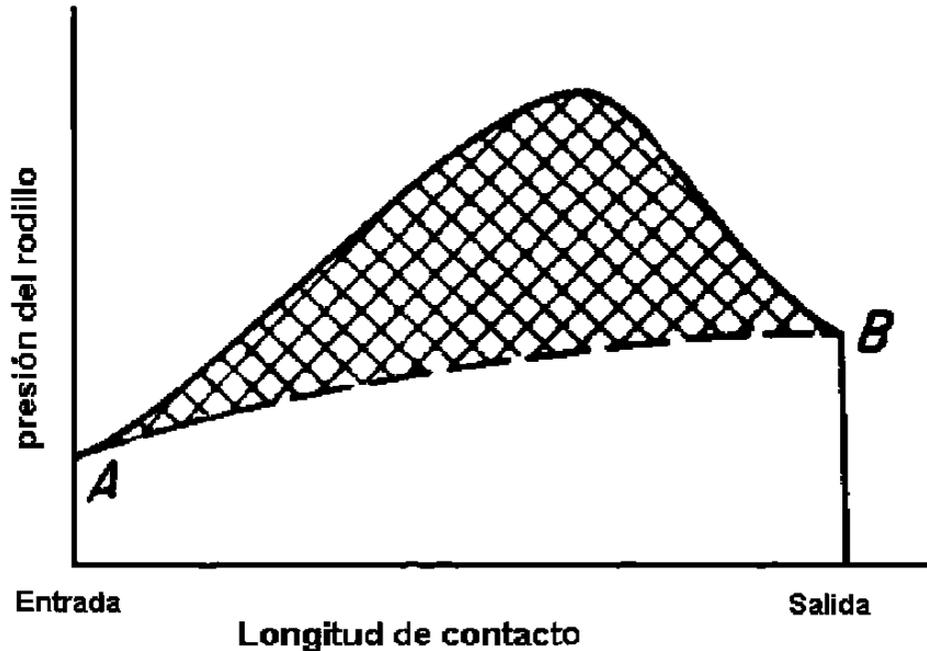


FIGURA 2.3.4 Distribución de la presión de laminación a lo largo del arco de contacto [5].

2.3.3 Efecto de la colina de fricción en la laminación.

El efecto de la geometría de la zona de deformación y la fricción en la laminación puede ser comprendido en términos de la colina de fricción

La fricción se presenta en el laminado con un cierto coeficiente que multiplicado por la fuerza de compresión de los rodillos da por resultado una fuerza de fricción entre los rodillos y la pieza de trabajo. En el lado de entrada la fricción tiene una dirección; en el otro lado, tiene la dirección opuesta. Sin embargo, las dos fuerzas no son iguales. La fuerza de fricción es mayor en la entrada de manera que la fuerza neta jala a la pieza de trabajo a través de los rodillos. El laminado no sería posible sin esta diferencia.

En un punto denominado N la velocidad superficial de los rodillos y la velocidad de la pieza de trabajo son iguales por lo que a este punto se le conoce como punto neutro ver figura 2.3.1. A la izquierda de este punto la velocidad superficial del metal V_1 es menor que la velocidad V . Esta diferencia produce fricción entre el metal y los rodillos. A la derecha del punto N la velocidad del metal V_2 es mayor que la velocidad de los rodillos V así que el metal resbala en la entrada del rodillo y éste no se puede laminar [11]. Esta relación de velocidad de rodillo-metal produce una colina de fricción.

Hay un límite máximo para la reducción posible que puede alcanzar el laminado plano con un coeficiente de fricción dado por:

$$d_{\max} = \mu^2 R \quad (2.3.10)$$

Donde: d_{\max} es la reducción máxima, μ es el coeficiente de fricción y R es el radio del rodillo. La ecuación indica que si la fricción fuera cero, sería imposible el laminado.

El coeficiente de fricción en el laminado depende de varios factores como lo son la lubricación, material de trabajo, de los rodillos y la temperatura de trabajo. En el laminado en frío el valor es alrededor de 0.1 [12].

Dado un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, la fuerza requerida para mantener la separación entre los rodillos se puede calcular

integrando la presión unitaria de laminado, mostrada como p en la figura 2.3.3 sobre el área de contacto rodillo-metal. Esto se puede expresar como:

$$F = w \int_0^L p dL \quad (2.3.11)$$

Donde F es la fuerza del laminado, w es el ancho del material de trabajo, p es la presión de laminado y L es la longitud de contacto del rodillo con la pieza que esta siendo trabajada. La integración requiere de dos términos separados, uno a cada lado del punto neutro. Las variaciones en la presión a lo largo de la longitud de trabajo son significativas, la figura 2.3.5 indica esta variación.

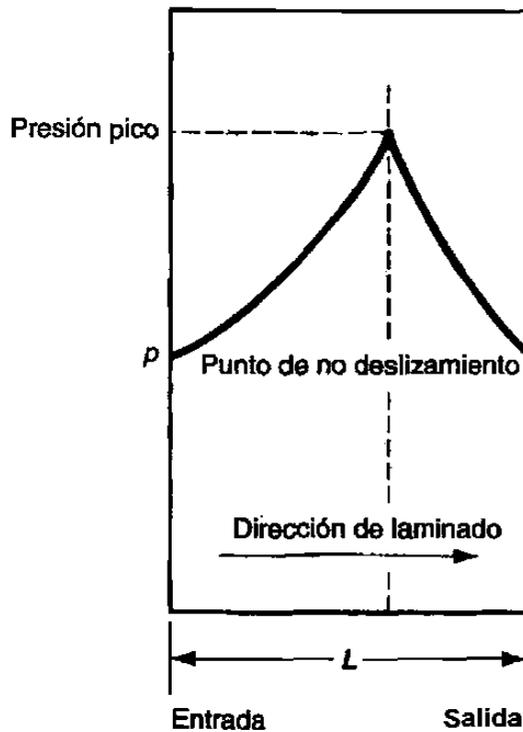


Figura 2.3.5 Variaciones típicas de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la integración del espesor final menos el inicial que esto es la fuerza de laminación F [12].

CAPÍTULO 3

TRABAJADO EN FRÍO

3.1 INTRODUCCIÓN

El arreglo de los átomos en todos los materiales contiene imperfecciones, que imparten un efecto profundo sobre su comportamiento. Hay cuatro tipos básicos de imperfecciones en un arreglo de átomos denominado red: defectos puntuales, lineales (dislocaciones), de superficie y de volumen.

Gracias a las teorías de dislocaciones se puede dar una explicación del comportamiento plástico de los materiales relacionándolo con las fuerzas interatómicas que actúan en la estructura cristalina de un metal. En el comportamiento plástico las deformaciones son irreversibles mientras que en el comportamiento elástico son reversibles.

Deformación elástica: Es un cambio en dimensiones directamente proporcional a una fuerza aplicada. En la deformación elástica la distorsión de

la red cristalina se produce cuando la fuerza es aplicada y desaparece tan pronto como la fuerza es removida. Como se aprecia en la figura 3.1.1.

Deformación plástica: Es un cambio en dimensiones permanente aún después de que la fuerza causante de la distorsión es removida. En la deformación plástica toma lugar un reacondamamiento de los átomos en la red cristalina lo cual se manifiesta en una distorsión permanente. Como se aprecia en la figura 3.1.1.

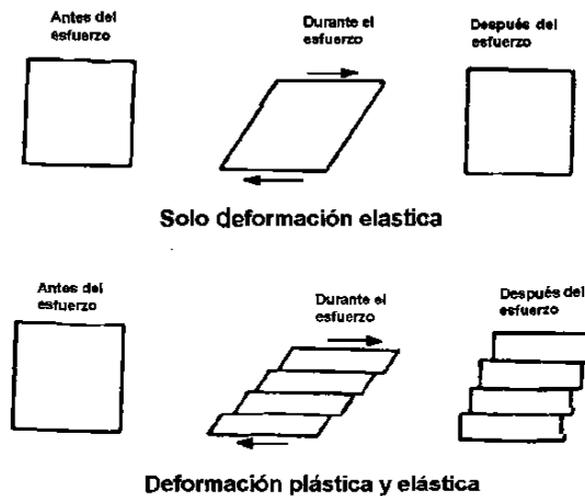


FIGURA 3.1.1 Diagrama que ilustra la diferencia entre la acción y el efecto de la deformación elástica y plástica [6].

3.2 MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO

3.2.1 Dislocaciones

El concepto de dislocación fue propuesto independientemente por Taylor, Orowan y Polani en 1934, pero la idea permaneció prácticamente sin desarrollarse hasta finales de la segunda guerra mundial. Después de esto siguió un periodo de aproximadamente diez años durante el cual la teoría del comportamiento de las dislocaciones fue desarrollada ampliamente y aplicada a casi todos los aspectos de la deformación plástica de los metales. Al no conocer métodos verdaderamente seguros para detectar las dislocaciones en los materiales, fue preciso basar la mayor parte de esta teoría en observaciones indirectas del comportamiento de las dislocaciones. Afortunadamente a partir de 1955 el avance de las técnicas hizo posible observar las dislocaciones tal y como existen. Siendo los últimos 20 años de extensivas investigaciones descubriendo una gran variedad de técnicas para estudiar y observar las dislocaciones en los materiales [5]. Estos estudios no dejan duda de que las dislocaciones existen y se ha comprobado experimentalmente la mayoría de los conceptos teóricos de la teoría de dislocaciones [5].

Dislocaciones. Son imperfecciones lineales en un arreglo cristalino de átomos. Se supone que la mayoría de las dislocaciones se forman durante el proceso de solidificación [13]. Pero si se trabaja en frío el material se nota un incremento cuantioso de las mismas. Estas imperfecciones se pueden clasificar en:

Dislocación tornillo. Esta se llama así debido a la superficie espiral formada por los planos atómicos alrededor de la línea de la dislocación tornillo. Si en un plano cristalográfico se describe una revolución completa alrededor del eje sobre el cual el cristal fue torcido. Partiendo del punto x y recorriendo espaciamentos atómicos iguales en cada dirección, se termina a un espacio atómico y por debajo del punto de partida, como se puede observar en la figura

3.2.1. El vector que se requiere para cerrar la trayectoria y volver al punto inicial se conoce como el vector de Burgers \vec{b} . Si se continua la rotación, se trazaría una trayectoria en espiral. El eje, es decir la línea alrededor de la cual se traza esta trayectoria es la dislocación tornillo. El vector de Burgers es paralelo a la dislocación tornillo.

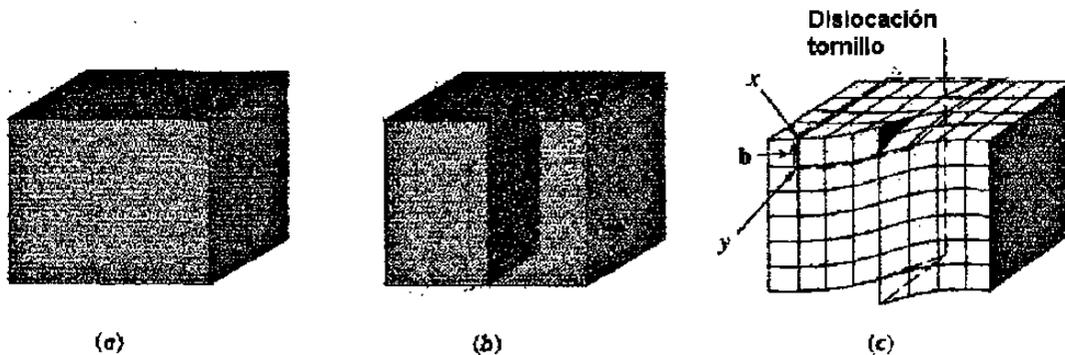


FIGURA 3.2.1 El cristal perfecto (a) es cortado y deformado una distancia igual a un espaciamento atómico, (b) y (c). La línea a lo largo de la cual ocurre este corte es una dislocación tornillo. Se requiere de un vector de Burgers b para cerrar la trayectoria de espaciamentos atómicos alrededor de la dislocación tornillo. (5).

Dislocación de borde. Se puede considerar como un medio plano de átomos extras en el cristal. Si se sigue una trayectoria en círculo a favor de las manecillas del reloj alrededor de la dislocación de borde, partiendo del punto x y recorriendo un número igual de espaciamentos atómicos en cada dirección, terminarían alejados un espaciamento atómico y respecto al punto de partida como se observa en la figura 3.2.2. El vector que se requiere para completar el circuito es, de nuevo el vector de Burgers. En este caso, el vector de Burgers es perpendicular a la dislocación. Al introducir la dislocación, los átomos por encima de la línea de dislocación se comprimen acercándose unos a otros, en tanto en los que quedan por debajo se estiran alejándose de sus posiciones de equilibrio. La red que los rodea ha sido distorsionada debido a la presencia de la dislocación.

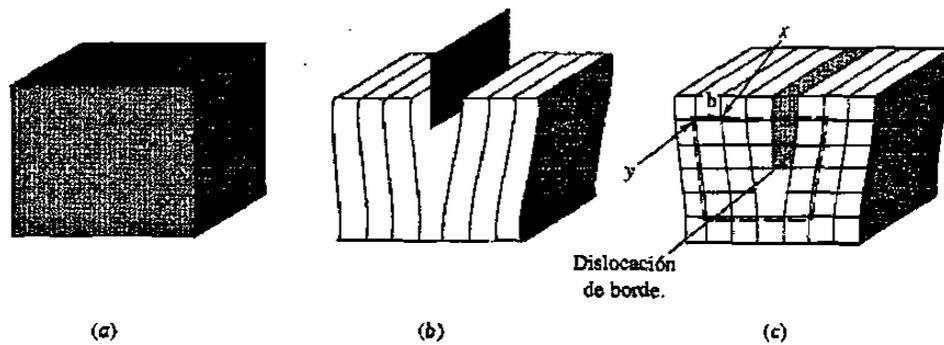


FIGURA 3.2.2 El cristal perfecto (a) es cortado y un plano adicional de átomos es insertado (b). El borde inferior del plano adicional es la dislocación de borde (c). Se requiere de un vector de Burgers b para cerrar un círculo de igual cantidad de espaciamentos atómicos alrededor de la línea de dislocación [14].

Dislocación mixta. La figura 3.2.3, muestra que las dislocaciones mixtas tienen componentes tanto de borde como tornillo, con una región de transición entre ambas. El vector de Burgers, sin embargo, se conserva igual para todas las porciones de la dislocación mixta.

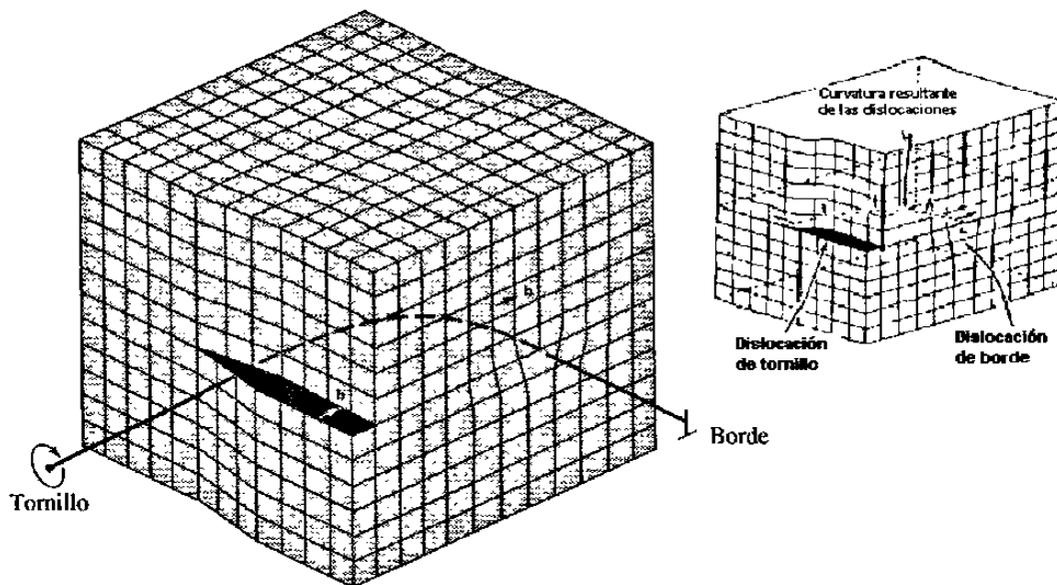


FIGURA.3.2.3 Dislocación mixta. La dislocación de tornillo en la cara frontal del cristal gradualmente se convierte en dislocación de borde en el costado del cristal [14].

3.2.2 Deformación por deslizamiento

Las capas de átomos o los planos sobre los cuales están ordenados los átomos se conocen como planos atómicos o cristalinos los cuales influyen en el comportamiento y propiedades de un material.

La orientación de un plano cristalino se determina mediante tres puntos del plano los cuales no deben de ser colinéales. Si cada punto se encuentra sobre un eje cristalino diferente, el plano puede especificarse dando las coordenadas de los puntos en función del parámetro de red a_1 , a_2 y a_3 .

Direcciones en la celda unitaria. Siendo una celda unitaria la mínima división de una red que conserva sus características. Ciertas direcciones en la celda unitaria son de particular importancia. Los metales se deforman en aquellas direcciones en las cuales los átomos se encuentran en contacto más estrecho. La relación que guarda un conjunto de planos con los ejes de la celda unitaria se designan por los índices de Miller [15-17]. El procedimiento para obtener los índices de Miller es como sigue (ver figura 3.2.4)

- Se encuentran las intersecciones sobre los ejes en función del parámetro de red a_1 , a_2 y a_3 . Para esto reste las coordenadas del punto inicial de las coordenadas del punto final para obtener el número de parámetros de red recorridos en la dirección de cada eje del sistema de coordenadas
- Reduzca la fracción y/o los resultados obtenidos de la resta a mínimos enteros, lo recomendado es tomar los recíprocos de los resultados y luego reducirlos a tres números que tengan la misma relación o cociente, el resultado se encierra entre corchetes o paréntesis. Si se obtiene un signo negativo represéntelo con una barra sobre el número.

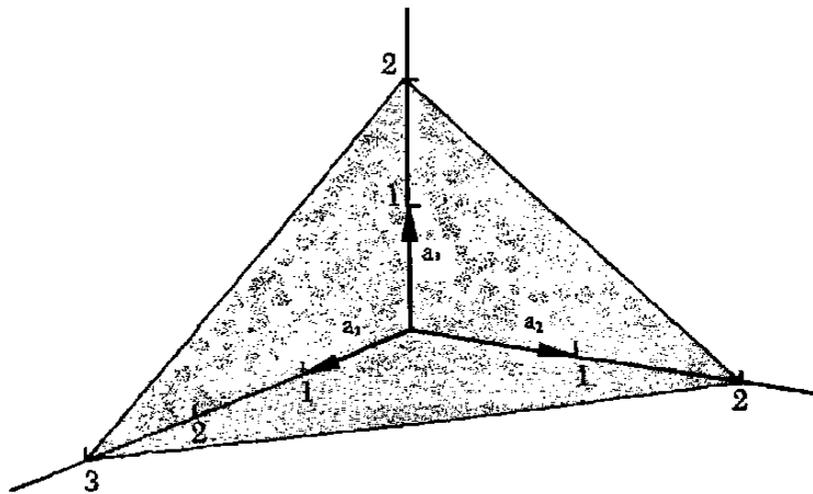


FIGURA 3.2.4 Este plano corta a los ejes a_1 , a_2 y a_3 en $3a_1$, $2a_2$ y $2a_3$. Los inversos de estos números son $1/3$, $1/2$, $1/2$. Los tres enteros más pequeños que poseen la misma relación son 2,3 y 3 por tanto los índices del plano son (233) [13].

Se pueden comprender las diferencias en el comportamiento de los metales que tienen estructuras cristalinas distintas examinando la fuerza que se requiere para iniciar el proceso de deslizamiento. Supóngase que se aplica una fuerza unidireccional F a un cilindro de metal que está formado por un solo cristal (figura 3.2.5). Se puede orientar el plano de deslizamiento y la dirección de deslizamiento respecto a la fuerza aplicada definiendo los ángulos λ y ϕ donde λ es el ángulo entre la dirección de deslizamiento y la fuerza aplicada y ϕ es el ángulo entre la perpendicular al plano de deslizamiento y la fuerza aplicada.

Para que una dislocación se mueva en este sistema de deslizamiento, la fuerza aplicada debe producir una fuerza cortante actuando en la dirección de deslizamiento. Esta fuerza resultante F_r está dada por:

$$F_r = F \cos \lambda \quad (3.2.1)$$

Se divide la ecuación entre el área del plano de deslizamiento,

$$A = A_0 / \cos \phi \quad (3.2.2)$$

se obtiene la ley de Schmid [13].

$$\tau_r = \sigma \cos\phi \cos\lambda, \quad (3.2.3)$$

donde:

$\tau_r = F_r/A =$ esfuerzo cortante en la dirección de deslizamiento

$\sigma = F/A_0 =$ esfuerzo unidireccional aplicado al cilindro.

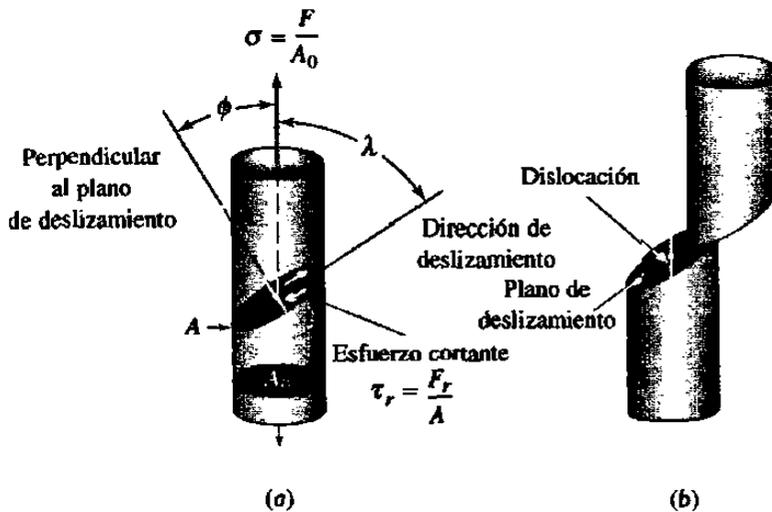


FIGURA 3.2.5 (a) Se produce un esfuerzo cortante resultante τ en un sistema de deslizamiento. (b) El movimiento de las dislocaciones en el sistema de deslizamiento deforma al material. [14].

La deformación plástica en muchos cristales tiene lugar por deslizamiento como se muestra en la figura 3.2.6. En el deslizamiento una parte del cristal se desliza como un todo con respecto a otra parte adyacente. La superficie en la que tiene lugar el desplazamiento se llama planos de deslizamiento. Este fenómeno se presenta en los planos donde los átomos se encuentran lo más cercano posible entre sí (planos compactos), se requiere menos cantidad de energía [13].

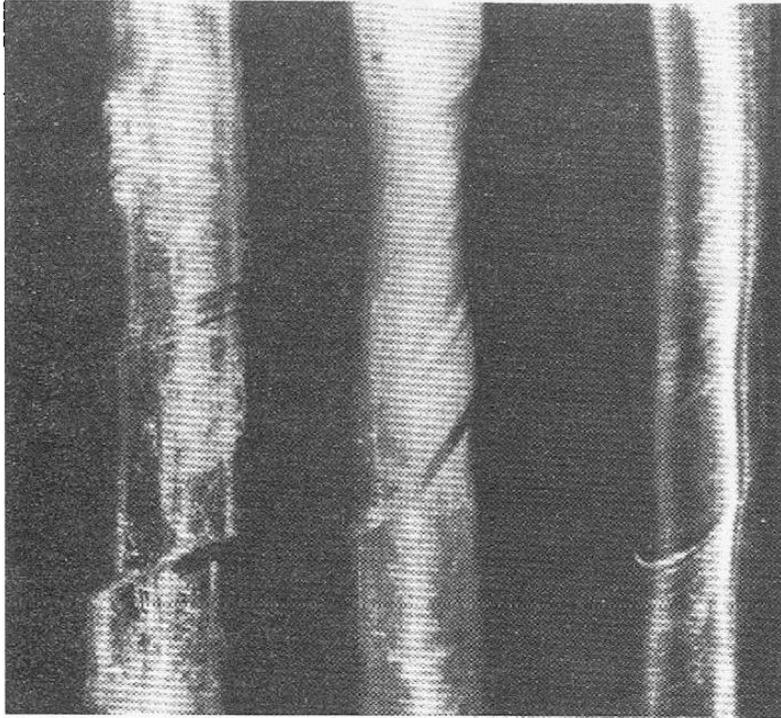


FIGURA. 3.2.6 Deslizamiento de translación en monocristale de cinc . [13].

La dirección del movimiento se llama dirección de deslizamiento. La naturaleza anisotrópica del deslizamiento indica la gran importancia de las propiedades de la red en la deformación plástica. El deslizamiento tiene lugar en los planos cristalográficos con mayor densidad atómica, como son los planos $\{111\}$ en los metales fcc y los planos $\{110\}$, $\{112\}$ y $\{123\}$ en metales bcc.

La dirección de deslizamiento se lleva a cabo en la línea atómica más compacta, $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ en metales fcc ver figura 3.2.7 y $\langle 111 \rangle$ en metales bcc. Para que se mantenga la estructura cristalina después del deslizamiento, el vector de deslizamiento tiene que ser igual a un vector de translación de la red. El menor

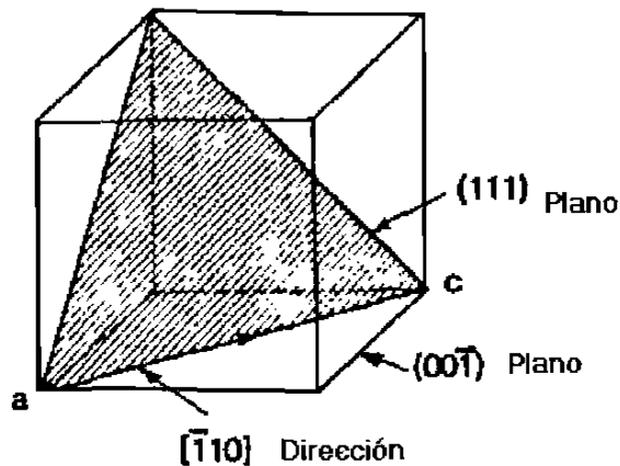


FIGURA 3.2.7 Dirección y planos de deslizamiento en una estructura FCC [9].

vector de translación expresado en función de la constante a de la red en una estructura fcc tiene la forma $(a/2)(x+y+z)$. Pero en los cristales fcc se observan también desplazamientos parciales que modifican la secuencia regular ABCABC... (Las estructuras fcc y hcp están construidas por planos de empaquetamiento compacto de átomos. Las estructuras difieren en la secuencia de apilamiento de los planos, teniendo la estructura fcc la secuencia ABCABC... mientras que la estructura hcp tiene la secuencia ABAB...) de los planos compactos y producen lo que se conoce como falla de apilamiento como ABCABABC... El resultado es una mezcla de apilamiento del fcc y del hcp, esta falla interfiere en el proceso de deslizamiento [13,14].

Se observa que la deformación de un cristal mediante deslizamiento es heterogénea. Los desplazamientos grandes de cizallamiento tienen lugar en unos pocos planos muy separados mientras que las partes del cristal entre estos planos quedan básicamente sin deformar. Una propiedad del deslizamiento es la ley de Schmid referente a la tensión crítica de cizallamiento, puesto que la deformación tiene lugar en un plano y en una dirección cuando la tensión de cizallamiento alcanza el valor crítico.

El proceso mediante el cual se mueve una dislocación causando que se deforme un material se conoce como deslizamiento. La dirección en la cual se mueve la dislocación, es la de deslizamiento, que corresponde a la dirección del vector de Burgers para las dislocaciones de borde. Durante el deslizamiento, la dislocación de borde barre el plano formado por el vector de Burgers y la dislocación; este plano se conoce como plano de deslizamiento. La combinación de dirección y plano de deslizamiento se le conoce como sistema de deslizamiento. Una dislocación de tornillo produce el mismo resultado, la dislocación se mueve perpendicularmente al vector de Burgers, aunque el cristal se deforma en una dirección paralela a dicho vector.

Se puede relacionar el movimiento de las dislocaciones con el movimiento de un gusano la figura. 3.2.8 muestra como con la aplicación de una fuerza tangencial se ha formado un plano extra de átomos (llamado dislocación) encima del plano de deslizamiento. Esta dislocación se mueve a lo largo del plano de deslizamiento y deja un escalón cuando sale a la superficie del cristal. Cada vez que la dislocación se mueve a través del plano de deslizamiento, el cristal se mueve un espacio de un átomo. Como los átomos no terminan en posiciones exactamente normales después del paso de la dislocación, movimientos posteriores de la dislocación a través del mismo plano de deslizamiento encuentran mayor resistencia [16]. Eventualmente esta resistencia creada por una distorsión del plano de deslizamiento llega a ser lo suficientemente grande para trabar la dislocación en la estructura cristalina y el movimiento se detiene. Para deformaciones posteriores se necesitará movimiento sobre otro plano de deslizamiento. Aunque la distorsión es mayor sobre el plano de deslizamiento activo, su efecto se siente en toda la estructura reticular y la carga aplicada debe aumentarse para producir movimiento sobre otro plano de deslizamiento.

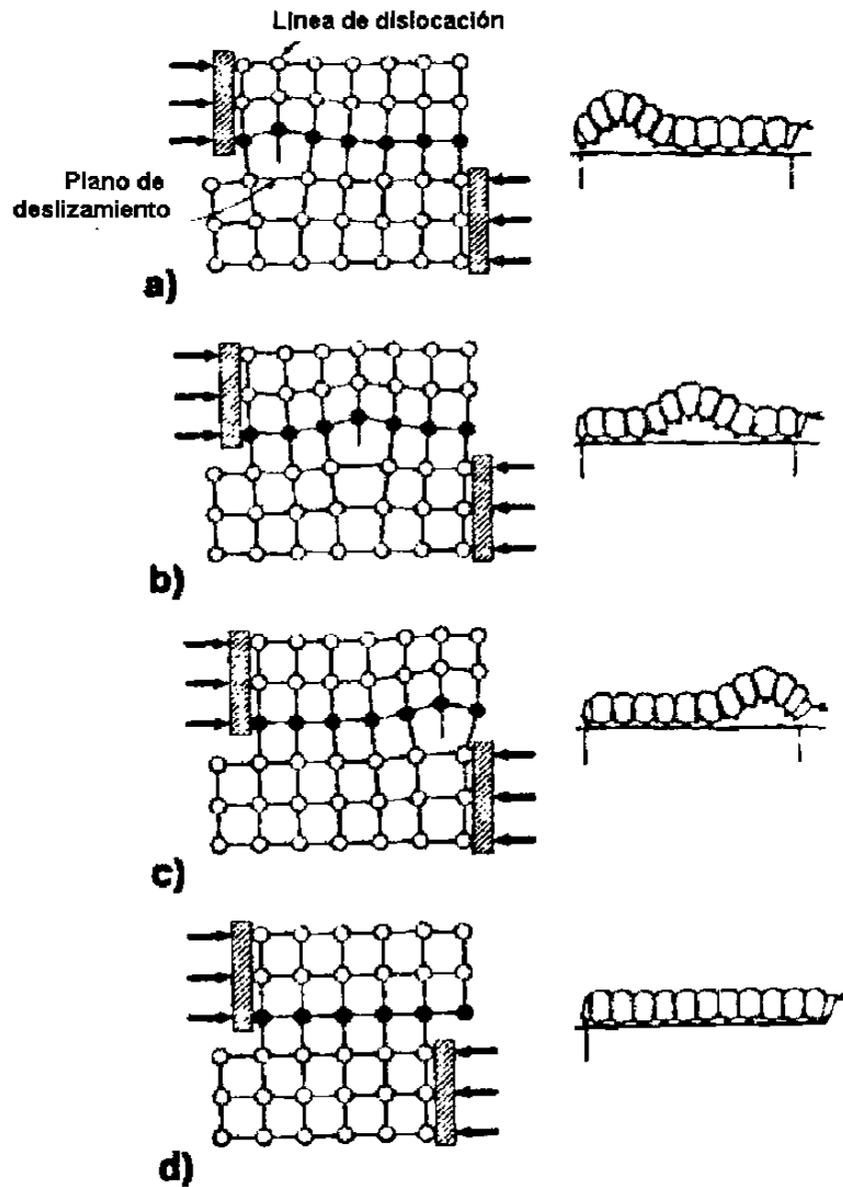


FIGURA. 3.2.8 Analogía entre el movimiento de una dislocación a través de un cristal y el movimiento de un gusano conforme arquea su parte posterior mientras avanza [9].

3.3 MODELOS REOLOGICOS

La reología es la ciencia que estudia el comportamiento del flujo y deformación de la materia y describe la interrelación entre fuerza, tiempo y deformación. El término procede del griego "rheos" que significa fluir. La reología abarca el estudio de todos los materiales, de gases a sólidos [18].

La ciencia de la reología tiene cerca de 70 años y fue fundada por dos científicos, Marcus Reiner y Eugene Bingham, a finales de los años 20 con el interés de describir las propiedades de flujo de la materia. El propio filósofo griego Heráclito describió la reología como "panta rei" que significa todo fluye, donde traducido en terminos reológicos por el profesor Reiner significa que todo fluye incluso las montañas, si tan solo se espera el tiempo necesario [18].

Algunos de los modelos reológicos más utilizados son:

Perfectamente elástico. El comportamiento de este material está completamente definido por su rigidez indicada por el modulo de elasticidad E , en lugar de ceder a la fluencia plástica el material se fractura, figura 3.3.1a).

Rígido perfectamente plástico. Estos materiales tiene una deformación elástica igual a cero hasta que se alcanza el punto de fluencia y el material se deforma plásticamente al mismo nivel de esfuerzo. Los materiales dúctiles fuertemente trabajados en frío se aproximan a este comportamiento, figura 3.3.1b).

Elástico perfectamente plástico. Este material tiene una rigidez definida por E . Una vez que alcanza el punto de fluencia σ_0 , el material se deforma plásticamente al mismo nivel de esfuerzo. La curva de fluencia está dada por $K=\sigma_0$ y $n=0$. Los materiales se comportan de esta manera cuando han sido calentados a temperaturas lo suficientemente altas para recristalizar más que endurecerse por trabajo durante la deformación, figura 3.3.1c).

Rígido endurecible por deformación. La deformación continua de estos materiales requiere esfuerzos siempre crecientes, dados para una curva de fluencia cuyo coeficiente de consolidación K es mayor que σ_0 , cuyo exponente

de endurecimiento por deformación n es mayor que cero. La curva de fluencia se representa generalmente como una función lineal en una gráfica doble logarítmica, figura 3.3.1d).

Elástica endurecible por deformación. Estos materiales obedecen la ley de Hooke en la región elástica y comienza a ceder en su punto de fluencia σ_0 . Su deformación continua requiere esfuerzos siempre crecientes, La mayoría de los metales dúctiles se comportan de esta manera cuando se trabajan en frío, figura 3.3.1e).

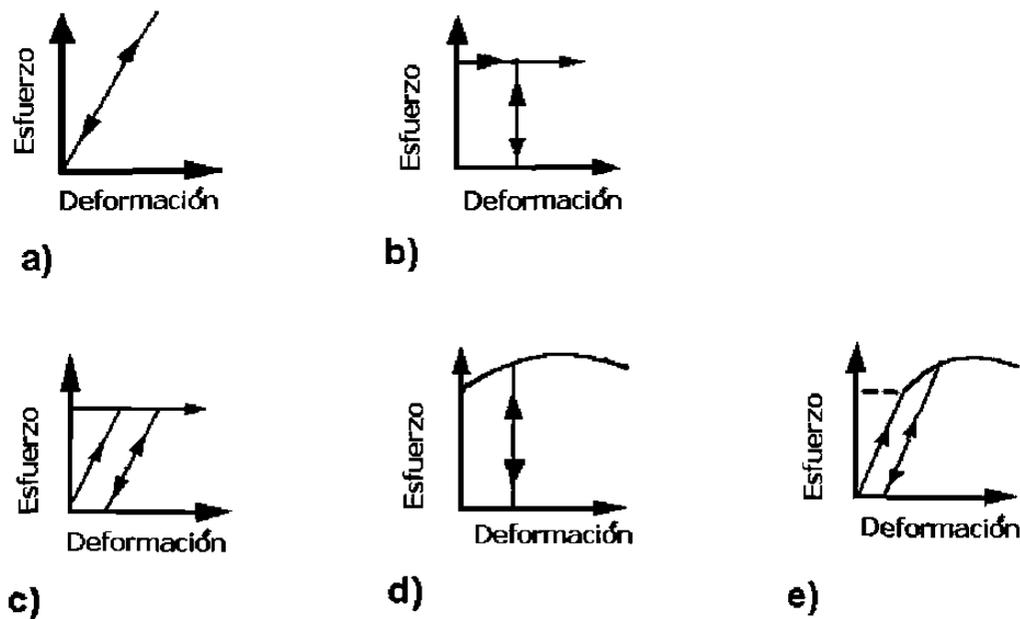


FIGURA 3.3.1 Curvas idealizadas de esfuerzo-deformación: (a) perfectamente elástico, (b) rígida perfectamente plástico, (c) elástico perfectamente plástico, (d) rígido con endurecimiento por deformación, (e) elástico con endurecimiento por deformación [9].

3.4 TEORÍA DE PLASTICIDAD.

Como se expuso en la sección 3.1 la deformación plástica es el resultado del reacomodo de partículas en el interior del material. En experimentos se ha encontrado que la deformación plástica presenta las siguientes características:

1. Es irreversible: esto significa que aunque macroscópicamente se pueda deformar un cuerpo y después volverlo a deformar para obtener la forma inicial, la condición interna habrá cambiado. Las causas de la irreversibilidad son el endurecimiento por deformación, que hace que el esfuerzo de cedencia aumente después de cierta deformación plástica y el hecho de que la deformación plástica es acumulativa.

2. Depende de la trayectoria: aun y cuando la forma inicial y final sean iguales, la deformación total dependerá de la trayectoria que se haya seguido durante la deformación.

3. Constancia de volumen: generalmente es aceptado que los sólidos son incompresibles, por lo que el volumen no cambiará durante la deformación plástica. En términos de deformación se puede expresar lo siguiente:

$$\Delta V/V = [(1+e_x)dx (1+e_y)dy (1+e_z)dz - dx dy dz] / (dx dy dz) \quad (3.4.1)$$

$$\Delta V = (1+e_x)(1+e_y)(1+e_z) = 0 \quad (3.4.2)$$

Despreciando la multiplicación de componentes:

$$e_x + e_y + e_z = 0 \quad (3.4.3)$$

Esta ecuación indica que si durante la deformación plástica el volumen permanece constante, la suma de las componentes de la deformación normal es cero a esto se le llama compatibilidad.

El comportamiento plástico es caracterizado por la curva esfuerzo-deformación en tensión uniaxial, figura 3.4.1. La curva presenta las siguientes características importantes:

1. Punto de cedencia. Es el valor de esfuerzo al cual el material empieza a deformarse plásticamente. El comportamiento deja de ser lineal en este punto. El límite elástico es una propiedad del material.

2. Zona plástica. Es la zona donde se presenta la deformación plástica la cual comprende el área bajo la curva del punto de cedencia hasta el de fractura. (la aparición de la plasticidad no implica que se pierda la elasticidad.)

3. Endurecimiento por deformación. Después de la cedencia se requiere incrementar el esfuerzo para continuar deformando el material, produciendo la trayectoria curva.

4. Resistencia máxima o resistencia tensil. Es el valor máximo de esfuerzo de tensión que soporta el material. Aunque básicamente es una propiedad del material, depende de la velocidad de la deformación.

5. Formación del cuello. Después de que se alcanza el máximo esfuerzo en la curva este decrece, por que el material sufre una contracción severa en su sección transversal llamada cuello.

6. Punto de fractura. Donde se fractura el material. Usualmente se caracteriza por la deformación máxima alcanzada y no por un esfuerzo de fractura, ya que éste es muy variable.

7. Ductilidad. Es la máxima deformación de alargamiento plástico que alcanza el material justo antes de la fractura; por eso, se determina bajando una recta paralela a la línea de elasticidad, para restar la deformación elástica. En la practica se determina simplemente uniendo las dos partes de la fractura y midiendo el largo final

8. Histéresis. Si en el intervalo plástico el esfuerzo se reduce a cero y se vuelve a incrementar, la trayectoria de incremento del esfuerzo es diferente a la de decremento, formando un bucle o rizo de histéresis.

9. Anelasticidad. Algunos materiales presentan una recuperación plástica, semejante a la elasticidad, después de que han sido deformados plásticamente y el esfuerzo ha regresado a cero.

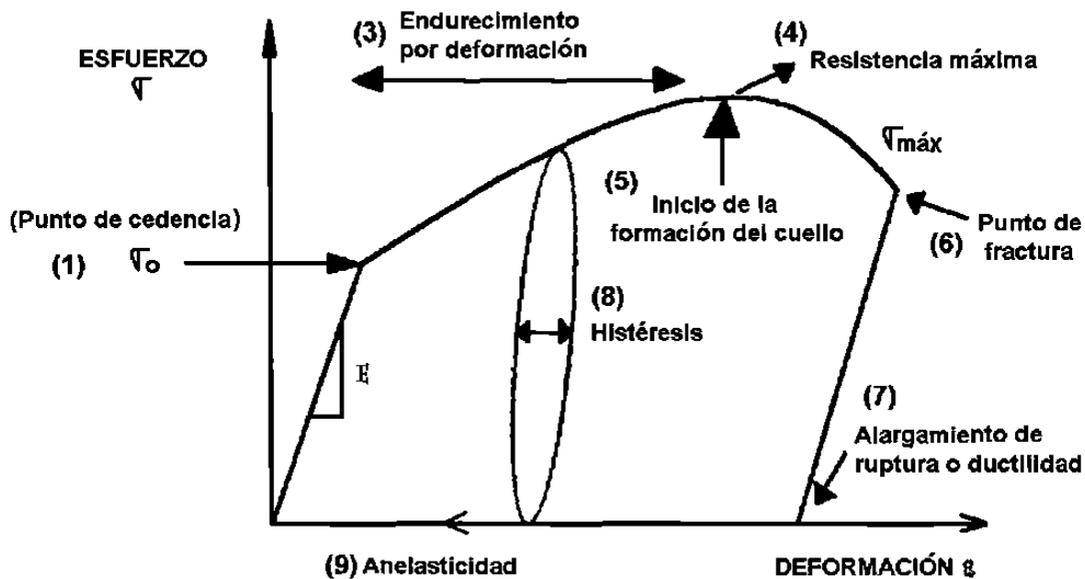


FIGURA 3.4.1 Puntos importantes de la curva esfuerzo-deformación [6].

3.4.1 Curvas de fluencia

Una vez que un material es deformado más allá de cierto nivel. Este deja de obedecer la ley de Hooke y cierta porción cambia permanentemente de forma. El tratamiento matemático de las relaciones que describen al comportamiento plástico son más complejas que las que tratan al elástico. La solución a un problema general entre tensión y deformaciones en el intervalo plástico debe contener:

- Las relaciones entre las tensiones y deformaciones elásticas
- La relación entre los esfuerzos que provocan el inicio del flujo plástico (criterio de fluencia.)
- La relación entre tensiones y deformaciones plásticas

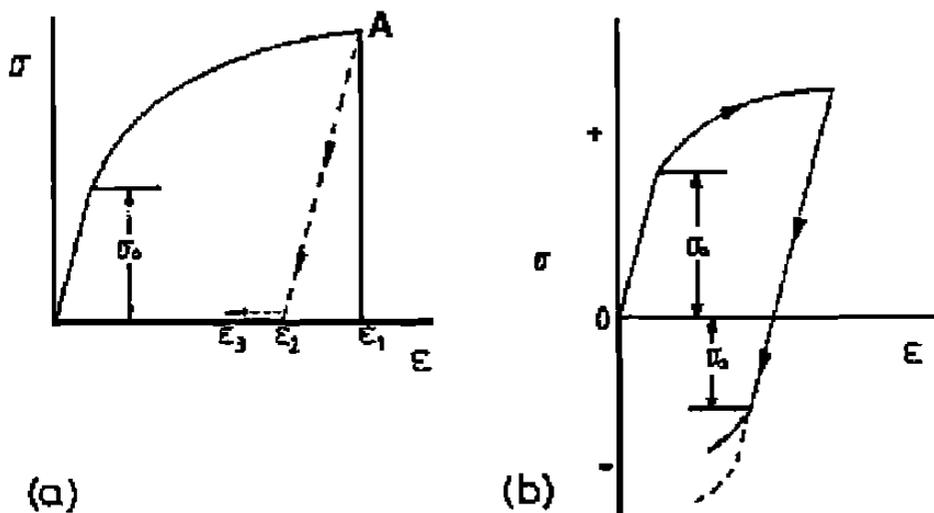


FIGURA 3.4.2 Curvas típicas para metales dúctiles [3].

La curva resultante de un ensayo mecánico, como el de tensión, es de interés fundamental para entender el comportamiento plástico de los materiales. El comportamiento típico de un material dúctil se muestra esquemáticamente en la figura 3.4.2 (a). La ley de Hooke se cumple a valores inferiores al de fluencia (σ_0); si el material se deforma hasta el punto A, la deformación disminuirá una cantidad igual a σ/E (de ϵ_1 a ϵ_2) al relajarse la carga como resultado de la recuperación elástica. Es posible que una pequeña cantidad de deformación (de ϵ_2 a ϵ_3) desaparezca con el tiempo, dependiendo del material y de la temperatura, lo que se denomina efecto anelástico y generalmente se desprecia en el tratamiento matemático de la plasticidad.

Por otro lado, si el material se deforma por encima del límite elástico en una dirección por ejemplo en tensión y después de la descarga se deforma en la dirección contraria (compresión) se encuentra que el esfuerzo de fluencia en la recarga es menor que el valor original, figura. 3.4.2 (b). La dependencia del límite de fluencia con respecto al modo de descarga es denominado efecto

Bauschinger y es normalmente ignorado en la teoría de plasticidad al considerar que el valor de fluencia es igual tanto en tensión como en compresión.

La solución de un problema de plasticidad requiere utilizar muchas veces de relaciones idealizadas que facilitan el tratamiento matemático. En algunos casos se puede despreciar la deformación elástica o el efecto de consolidación, siempre y cuando se tenga la validez relativa de las aproximaciones así como las posibles restricciones en su aplicación. Algunas de las relaciones idealizadas se muestran en la figura 3.3.1.

En algunos problemas sencillos es útil establecer ecuaciones empíricas que describan el comportamiento durante la deformación de una pieza. Una de las

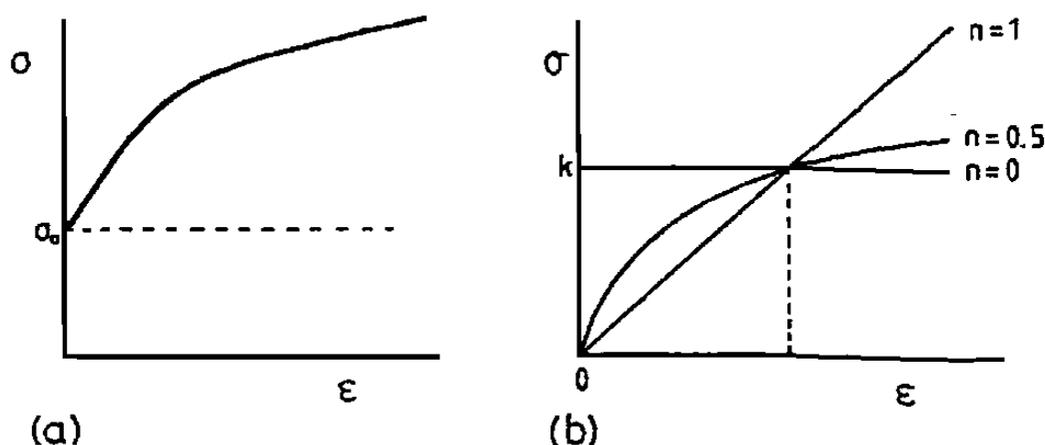


FIGURA 3.4.3 Material rígido con consolidación (a); curvas para $\sigma = k\epsilon^n$ (b) [3].

ecuaciones más empleadas es la propuesta por Lüdwik [3].

$$\sigma = \sigma_0 + k\epsilon^n \quad (3.4.4)$$

Donde σ_0 es el límite elástico y k y n son los coeficientes y exponentes de consolidación. En la figura 3.4.3 (b) se ejemplifica el caso en que n toma valores de 0, 0.5 y cuando σ_0 es igual a cero; este último caso, cuando n es igual a cero, el comportamiento observado es el de un material rígido perfectamente plástico,

Fig. 3.3.1 (b), en tanto que cuando n es igual a 1, el comportamiento es el de un material rígido con una tasa de consolidación igual a K Fig. 3.3.1 (e). Es importante notar que cuando el coeficiente n es menor a uno, la consolidación calculada por la ecuación 3.4.2 es infinita cuando la deformación es igual a cero, por lo que esta expresión no debe ser usada para deformaciones muy pequeñas.

3.4.2 Formación del cuello en tensión (Criterio de Considéré)

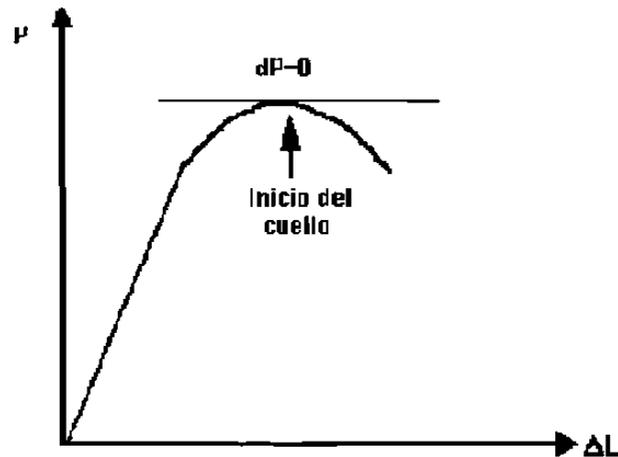


FIGURA 3.4.4 Curva carga-alargamiento [6].

El criterio de Considéré es un método que permite estimar la deformación a la que aparece el cuello en tensión. De acuerdo con la curva carga-alargamiento, en el máximo $dP = 0$, como muestra la figura 3.4.4.

De la definición de esfuerzo:

$$P = \sigma A \quad (3.4.5)$$

En el inicio del cuello (máximo):

$$dP = \sigma dA + A d\sigma = 0 \quad (3.4.6)$$

Reacomodando:

$$d\sigma/\sigma = -dA/A \quad (3.4.7)$$

Por conservación de volumen:

$$V = Al \quad (3.4.8)$$

$$dV = Adl + ldA \quad (3.4.9)$$

$$dA/A = dl/l = de \quad (3.4.10)$$

De modo que en el cuello:

$$\sigma = d\sigma/de \quad (3.4.11)$$

Sustituyendo la ecuación de Hollomon:

$$Ke^n = ke^{n-1} \quad (3.4.12)$$

Por tanto

$$e = n \quad (3.4.13)$$

Es decir la deformación real en el momento del inicio de la formación del cuello es igual al coeficiente de endurecimiento por deformación.

3.4.3 Criterios de cedencia

Críterio de Tresca

El criterio de Tresca o del esfuerzo cortante máximo establece que la deformación plástica iniciará cuando el esfuerzo cortante máximo rebase un valor crítico (k). Para un estado cualquiera de esfuerzos, el esfuerzo cortante máximo está dado por la diferencia entre el esfuerzo principal máximo y el mínimo como se muestra en el círculo de Mohr y está dado por:

$$\tau_{\text{máx}} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = k \quad (3.4.14)$$

Para el caso de tensión uniaxial.

El esfuerzo principal máximo es:

$$\sigma_1 = \sigma_0 \quad (3.4.15)$$

Los otros esfuerzos principales valen:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (3.4.16)$$

Entonces:

$$\tau_{\text{máx}} = \sigma_0/2 = k, \quad (3.4.17)$$

Por lo tanto el criterio de Tresca es:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (3.4.19)$$

Críterio de Von Mises

Este criterio establece que la cedencia inicia cuando el valor del esfuerzo efectivo sea mayor que un valor crítico dado por k^2 . El esfuerzo efectivo es el segundo invariante del tensor de esfuerzo y está dado por:

$$1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3.4.20)$$

De nuevo k es evaluada a partir del caso de tensión uniaxial, donde los esfuerzos principales son:

$$\sigma_1 = \sigma_0. \quad (3.4.21)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (3.4.22)$$

sustituyendo:

$$\sigma_0 = (3)^{1/2} k \quad (3.4.23)$$

Lo que hace que el criterio de Von Mises sea:

$$\sigma_0 = 1/2^{1/2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (3.4.24)$$

La interpretación física de los criterios de cedencia es la siguiente:

En experimentos se ha demostrado que la deformación plástica es resultado de los esfuerzos cortantes [4], por lo tanto la cedencia iniciará en aquella orientación donde el esfuerzo cortante sea más alto y alcance el valor crítico para iniciar la deformación. Esto justifica el criterio de Tresca, por otra parte, el cálculo de la energía de distorsión en un material deformado y encontró que ésta es proporcional al valor del esfuerzo efectivo. Por tanto el criterio de Von Mises es válido si se considera que para iniciar la deformación plástica se debe suministrar un valor crítico de energía.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en el primer capítulo de este trabajo, se realizó el procedimiento experimental, el cual se dividirá en dos partes: trabajo de campo y trabajo de laboratorio.

Para la realización de este trabajo se seleccionaron dos tipos de acero a los cuales se les referirá como acero A y B, las composiciones químicas de A y B se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Composición química de los aceros A y B

Tipo de acero	Porcentaje en peso de cada elemento								
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Al
A	.04/.07	.20/.35	.025	.020	-----	.15	.10	.08	.050
B	.06	.10/.20	.015	.012	.03	.10	.10	.03	.025/.050

4.1 TRABAJO DE CAMPO.

Los materiales tanto A como B se obtuvieron de puntas y colas de un molino reversible de laminación en frío de una empresa de la localidad, del cual se muestra un esquema en la figura 4.1.1.

En la figura 4.1.1 se pueden ver los enrolladores poniente y oriente (6 y 12) en los cuales se queda material laminado en cada paso, en este caso los pasos nones quedaron en el enrollador oriente mientras los pasos pares en el poniente. En el riel de entrada (1) es donde se alimenta el material proveniente de colada continua o de los molinos laminadores en caliente, el cual para los aceros tipo A entraron con un espesor de 212 mm obteniendo reducciones de 30, 51, 64, 73 y 79% con respecto al espesor de entrada (banda), para los aceros tipo B se tuvo un espesor inicial de 196 mm y reducciones de 28, 48, 62, 72, 80 y 84% tomando como referencia el espesor de entrada. Con el material obtenido de estos enrolladores se maquinaron probetas para pruebas de tensión, se realizaron análisis químicos y se caracterizó la forma del grano. Adicionalmente se obtuvo material en un atorón de colada continua (laminación en caliente), el cual cumple con la composición química del material B, este atorón tuvo lugar en la entrada del segundo paso, por lo que su reducción aproximada fue de un 60% en colada continua, de este material se maquinaron probetas para realizar ensayos a compresión.

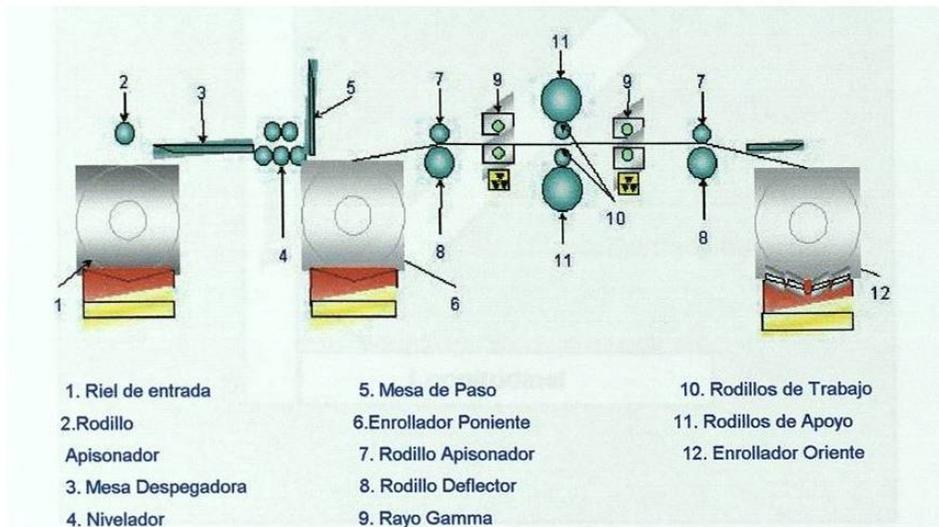


FIGURA 4.1.1 Partes de un molino reversible de laminación en frío.

4.1.1 Maquinado.

Como se menciona con anterioridad, el material se obtuvo de las puntas y colas de un molino reversible de laminación en frío, de este material se maquinaron probetas para ensayos de tensión en dirección de la laminación así como a cuarenta y cinco grados y perpendicular a la dirección de laminación, ver figura 4.1.2. La obtención de las probetas se realizó bajo las recomendaciones de la norma ASTM E-8 [19] en cuanto al dimensionado de los especímenes se muestra en la figura 4.1.3.

En lo que respecta a las probetas de compresión se obtuvieron de un atorón (paso intermedio) del molino caliente de colada continua, de los cuales se maquinaron probetas cilíndricas de 10 mm de diámetro por 15 mm de alto, ver figura 4.1.4.

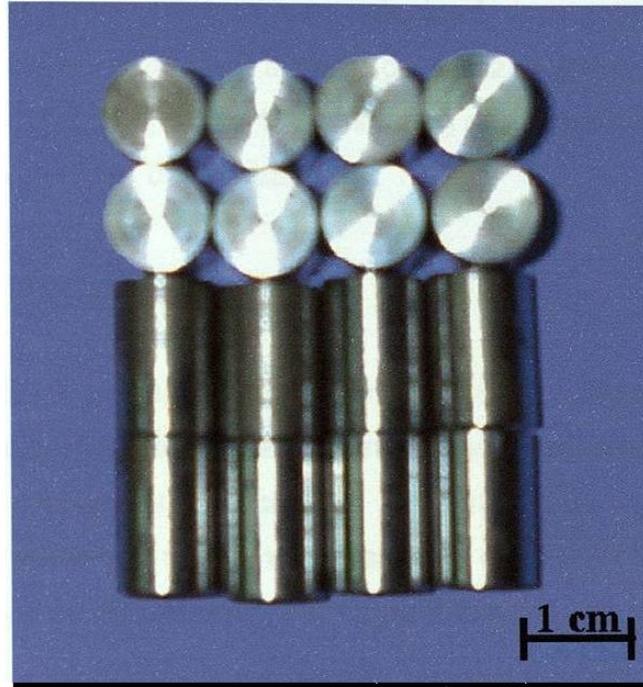


FIGURA 4.1.4 Piezas maquinadas en forma cilíndrica.

4.2 TRABAJO DE LABORATORIO.

4.2.1 Ensayos Realizados

Con el propósito de obtener un análisis completo del material, se realizaron los siguientes ensayos: tensión, compresión, análisis químico, dureza, metalografía y medición de tamaño de grano, los cuales se describen a continuación.

4.2.2 Tensión

Las probetas de tensión descritas en la primera parte de este capítulo fueron ensayadas en una máquina servo hidráulica universal de ensayos mecánicos INSTRON, ver figura 4.2.1, a una velocidad constante del cabezal de 300 mm/min, la cual se determinó a partir de realizar varios ensayos a diferentes velocidades (6, 60, 100, 600 y 1000 mm/min) para determinar la sensibilidad del material a la velocidad del cabezal.

4.2.3 Compresión

Para efectuar las pruebas de compresión se utilizó una máquina servo hidráulica universal de ensayos mecánicos INSTRON utilizando varias velocidades constantes del cabezal (60, 100, 600 y 1000 mm/min) para determinar la velocidad constante del cabezal óptima a ensayar las muestras, la cual resultó ser de 300 mm/min, ver figura 4.2.1.



FIGURA 4.2.1 Máquina universal servo hidráulica.

4.2.4 Dureza Vickers

Para determinar los cambios de dureza en cada paso de la laminación se utilizó un microdurometro Shimdzu. Las muestras para este ensayo se obtuvieron de las orejas de las probetas de tensión ver figura 4.2.2.

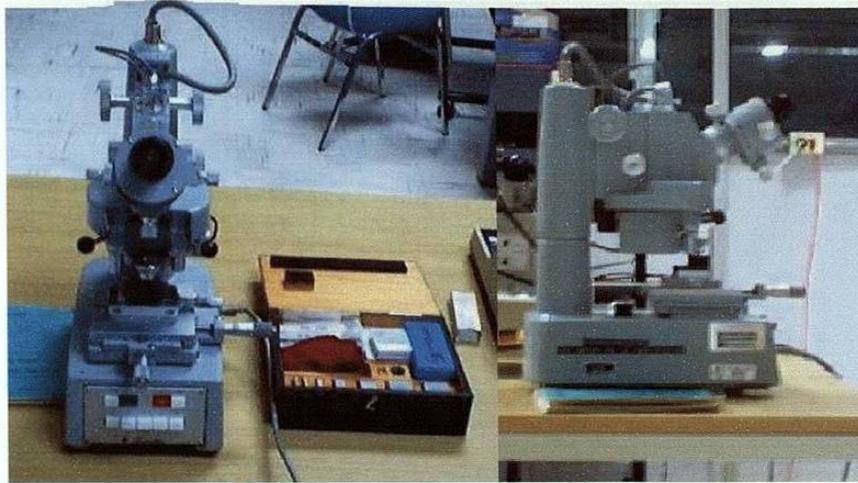


FIGURA 4.2.2. Microdurometro Shimdzu

4.2.5 Metalografía

A continuación se describe el método empleado para la realización del análisis metalográfico, primeramente se tomaron muestras de la banda y los pases del acero a estudiar, después se montaron en una máquina montadora marca BUHEHLER SIMPLIMENT II, ver figura 4.2.3 quedando como se muestra en la figura 4.2.4, después éstas se pulieron hasta quedar en acabado espejo pasando por los siguientes números de lijas: 80, 120, 220, 320, 400, 500, 600, 800, 1200, 2400. Después por paño con alumina de $1\ \mu$, así mismo se tomaron fotografías con el microscopio óptico que se muestra en la figura 4.2.5, de las cuales se presentan algunas en las figuras 5.6 y 5.7. El ataque realizado a las muestras fue con un reactivo conocido como NITAL al dos por ciento, el cual consta de alcohol etílico ó metílico y ácido nítrico, si se toma una base de cien se tendrían noventa y ocho de alcohol y un dos por ciento de ácido nítrico. De

las fotografías obtenidas se realizó la medición del tamaño de grano. La cual es descrita en la siguiente sección.

De las muestras pulidas se realizaron ensayos de microdureza, ver figura 4.2.4.

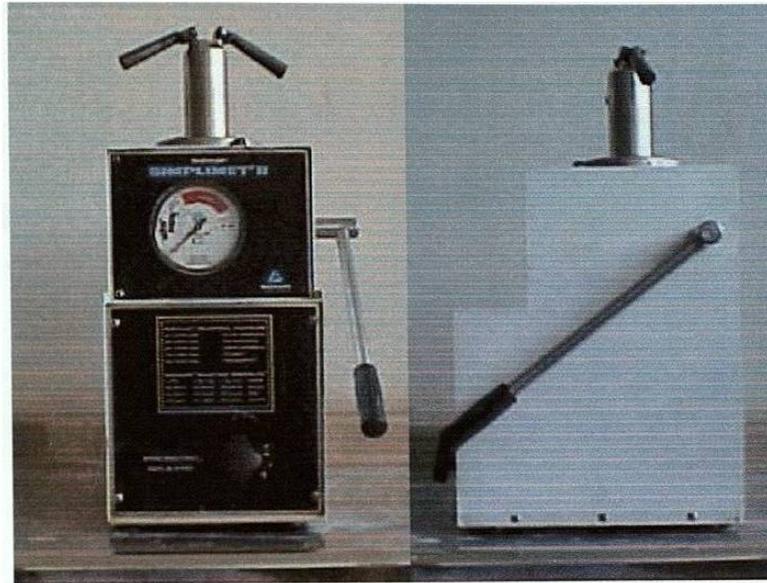


FIGURA 4.2.3 Montadora BUHEHLER SIMPLIMENT II

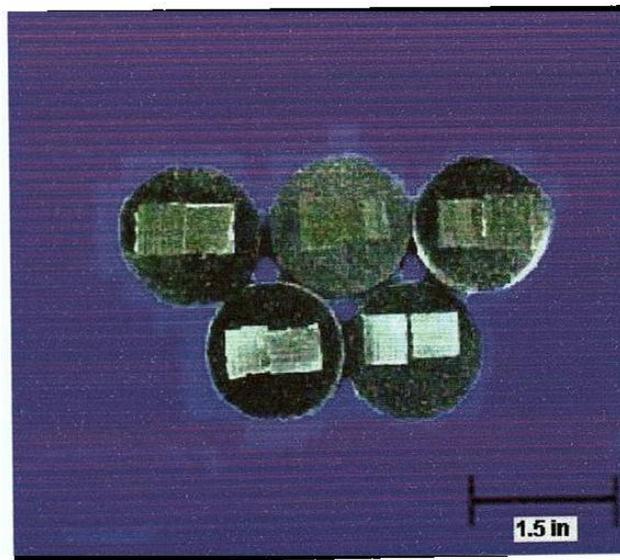
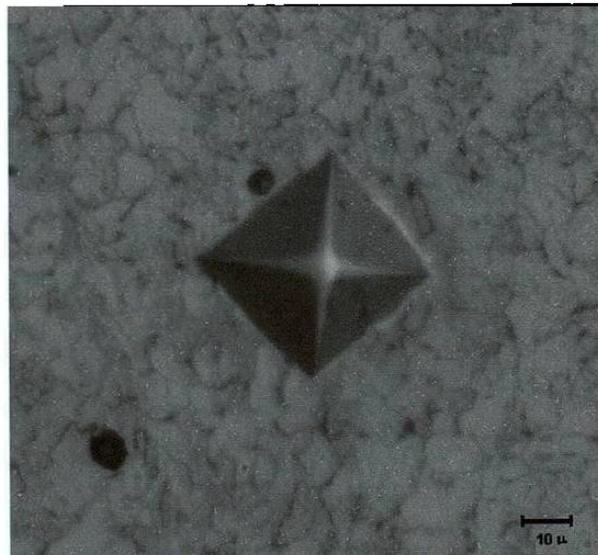


FIGURA 4.2.4 Muestras de aceros A y B pulidas y montadas



FIGURA 4.2.5. Microscopio Nikon Epiphot



**FIGURA 4.2.6 Identación realizada en un acero A
(fotografía a 400 aumentos)**

4.2.6 Tamaño De Grano

Para determinar el tamaño de grano en los aceros estudiados, se utilizó el método Heyn Intercept [20]. Este método consiste en elaborar una plantilla que contenga tres círculos concéntricos, donde los círculos tienen diámetros de 79.58, 53.05 y 26.53 mm, dando una circunferencia total de 500 mm. La plantilla se coloca sobre la fotografía de la microestructura y se cuentan las intercepciones con las fronteras de grano que son cortadas por las circunferencias de los círculos. Posteriormente para determinar el tamaño de grano se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$N_L = (N) / (L_T / M) \quad (4.1)$$

Donde:

N_L es el número de intercepciones por unidad de longitud.

N es el total de las intercepciones por las tres circunferencias.

L_T es la suma de las tres circunferencias 500 mm.

M es la magnificación en la que se realiza la medición.

Después se calcula la línea de intercepción media L_3 .

$$L_3 = 1 / N_L \quad (4.2)$$

Por último se determina el tamaño de grano G , ASTM.

$$G = (-6.6457 \log (L_3)) - 3.298 \quad (4.3)$$

Después de obtener el tamaño de grano ASTM se comparó en una tabla [20] que relaciona el tamaño de grano con el diámetro promedio, área promedio y otras variables. En este trabajo se reporta el diámetro promedio de los granos ferríticos de los aceros estudiados.

Los resultados de los análisis descritos en este punto se presentan en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1 Introducción y resultados

Como es sabido, el flujo plástico de un metal durante el trabajado en frío es dependiente del movimiento de las dislocaciones, vacancias y otros defectos. Teniendo como efecto principal del movimiento de las dislocaciones el endurecimiento del material por deformación. Pero además de este trabajo por deformación, se realizan otros durante el proceso de formado como lo son: el trabajo redundante, el realizado debido a la fricción y el trabajo almacenado por el material o interno del mismo.

T_t es el trabajo total el cual es la suma de todos los trabajos o energías en la laminación en frío. Estos trabajos son:

T_E es el trabajo requerido para cambiar de forma al material, si éste se deformará homogéneamente.

T_R es el trabajo innecesario que se realiza en dicho material.

T_F es el trabajo necesario para vencer la fuerza de fricción entre el material y los componentes a deformarlo.

T_A es la energía interna del material, está varía entre un 5 y un 10% en la laminación en frío y es usualmente omitido en el cálculo de la eficiencia de la maquinaria.

En las figuras 5.8 a 5.22, todos los trabajos mencionados están presentes por lo que estas curvas representan las curvas de fluencia del material en este proceso en específico.

5.2 Relación del módulo de Young con la gráfica fuerza-espaciamiento interatómico.

El módulo de elasticidad (o módulo de Young) es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. Esta relación se le denomina ley de Hooke.

$$E = \sigma / \varepsilon = \text{módulo de elasticidad} \quad (5.2.1)$$

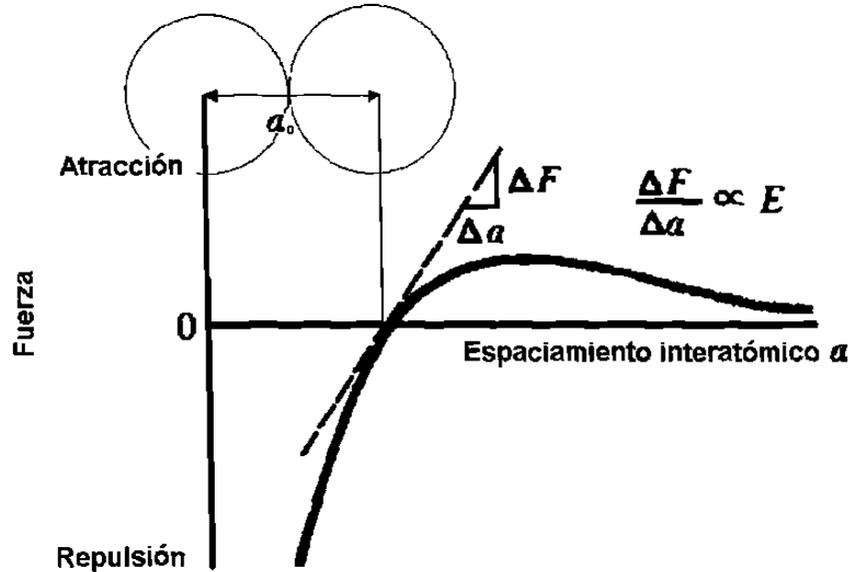


FIGURA 5.1 La pendiente de la curva fuerza-espaciamiento interatómico se relaciona con el módulo de elasticidad, modificada de [22].

El módulo está estrechamente relacionado con las fuerzas que unen los átomos en el material, ver figura 5.1. Una pendiente muy acentuada en la gráfica de las fuerzas y el espaciado interatómico en la zona de equilibrio indica que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y producir la deformación elástica del metal, lo cual indica que éste tiene un alto módulo de elasticidad. Las fuerzas de unión y en consecuencia, el módulo de elasticidad son mayores para los metales de alto punto de fusión.

La cantidad (E) anterior es una medida de la rigidez del material.

Como se ha visto, se pueden estimar directamente las propiedades de los materiales, como es el caso del módulo de elasticidad a partir de la gráfica 5.1. Sin embargo hay que reconocer que esas estimaciones son solo válidas en las direcciones específicas para las que se trazan esas curvas, es decir en las direcciones de empaquetamiento compacto. La separación entre los átomos en cualquier dirección que no sea la de empaquetamiento (a_0) compacto será mayor que ésta, ver figura 5.1. En consecuencia, las curvas de energía de enlace y todas las propiedades que se deriven de ella, dependerá de la dirección en que se midan [21,22], Con lo cual se puede explicar el fenómeno de cambio de pendiente en las figuras 5.2 a 5.7, debido a que al ir deformando el material, los planos cristalográficos se van orientando, hasta llegar a una orientación preferencial de planos de empaquetamiento compactos (ver sección 3.2.2.) y por supuesto que el endurecimiento por deformación (aumento de la resistencia a la tensión) se debe a la mayor densidad de dislocaciones y la mayor dificultad de mover una dislocación dada en un plano de deslizamiento que está atravesando por muchas dislocaciones [13]. Si se observan las figuras 5.2 a 5.7, se puede observar que en el eje x se maneja el termino esfuerzo real y en el eje y el de deformación real, los cuales se explican en el apéndice A de este trabajo.

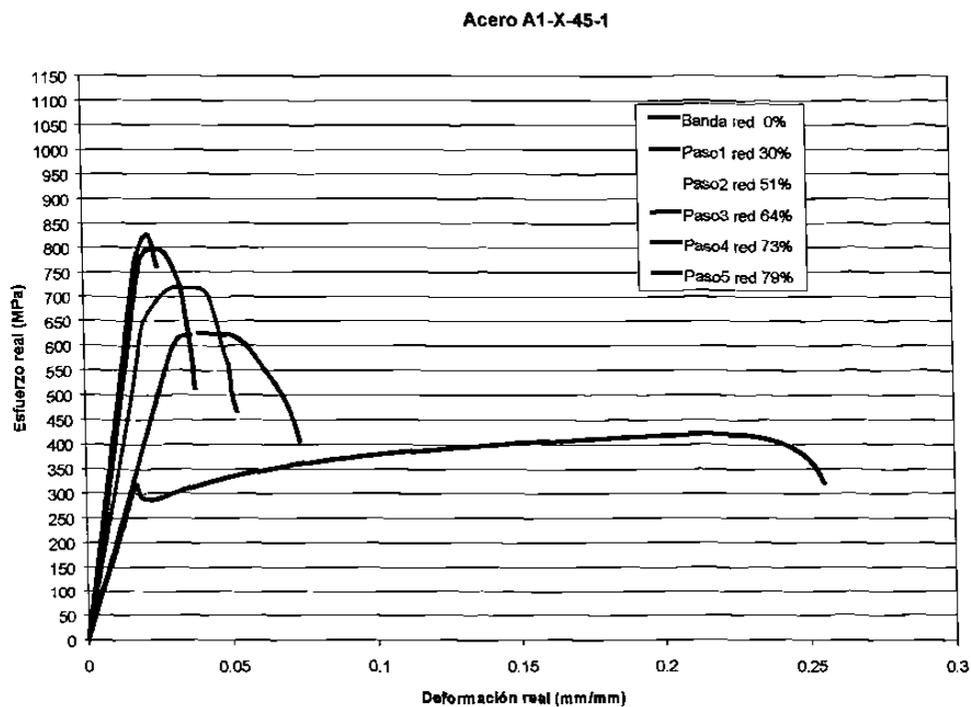


Figura 5.2 Grafica esfuerzo-deformación de la banda y cada uno de los pasos de laminación del acero A1 a 45° de la laminación.

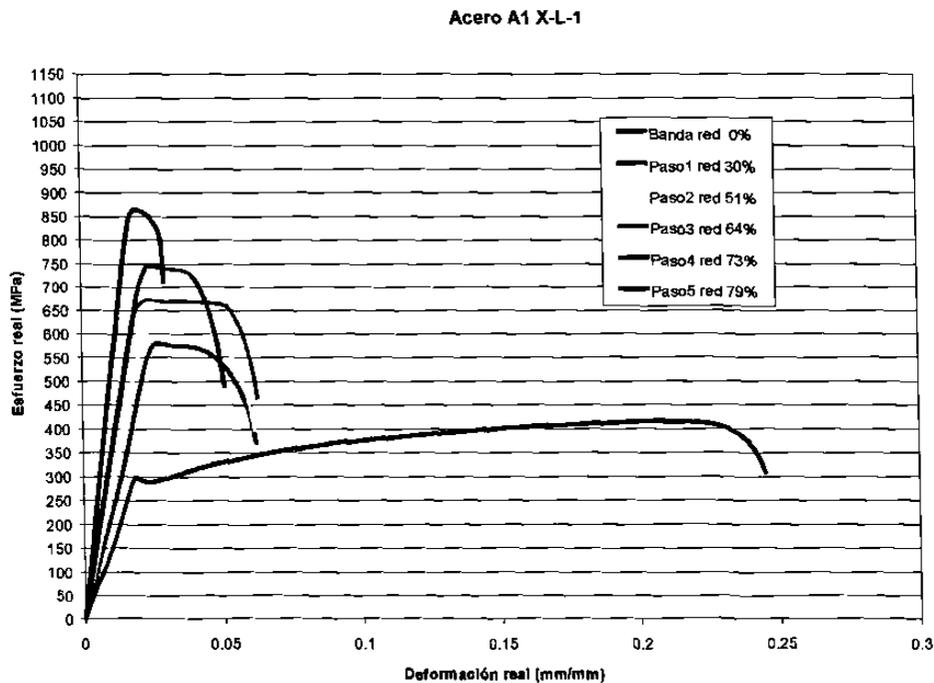


Figura 5.3 Grafica esfuerzo-deformación de la banda y cada uno de los pasos de laminación del acero A1 longitudinal a la laminación.

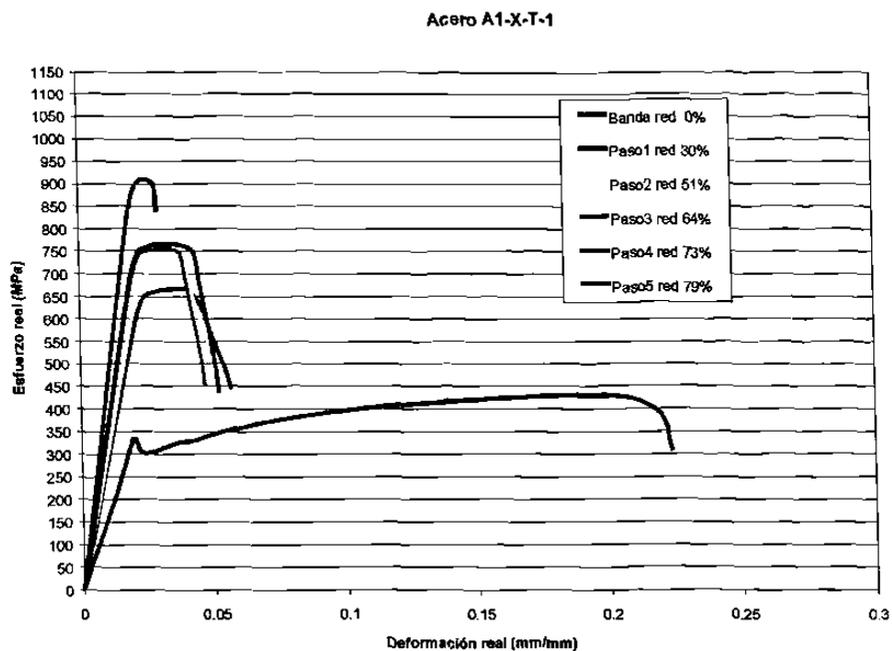


Figura 5.4 Grafica esfuerzo-deformación de la banda y cada uno de los pasos de laminación del acero A1 transversal a la laminación.

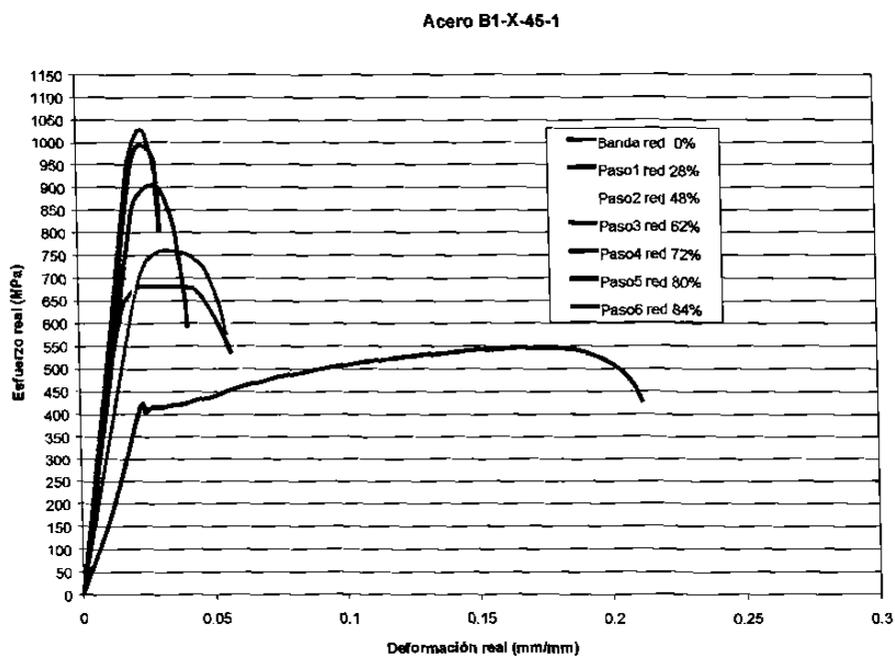


Figura 5.5 Grafica esfuerzo-deformación de la banda y cada uno de los pasos de laminación del acero B1 a 45° de la laminación.

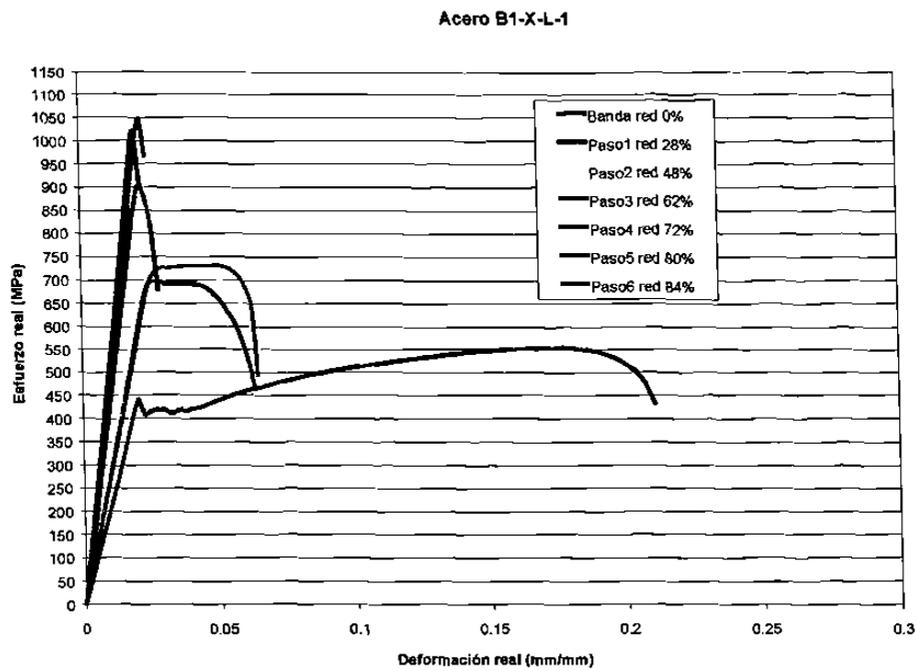


Figura 5.6 Grafica esfuerzo-deformación de la banda y cada uno de los pasos de laminación del acero B1 longitudinal a la laminación.

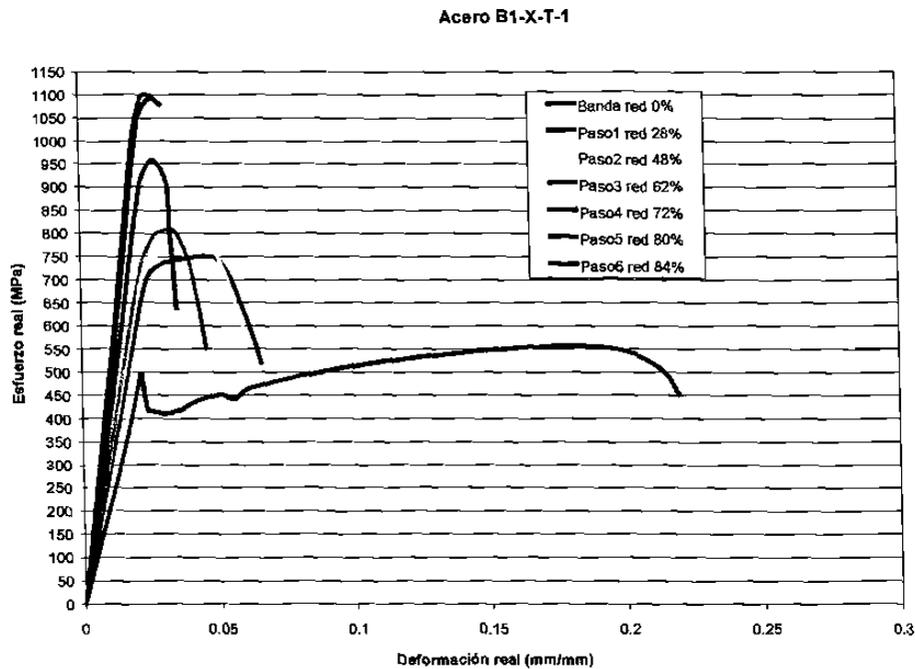


Figura 5.7 Grafica esfuerzo-deformación de la banda y cada uno de los pasos de laminación del acero B1 transversal a la laminación.

Para construir las gráficas 5.2 a 5.7 se tomaron los valores de las gráficas que se presentan en el apéndice B y se sobrepusieron, esto con la finalidad de mostrar el cambio de la pendiente en cada paso así como su endurecimiento en los mismos.

5.3 Obtención de n y k

La obtención de los valores de los coeficientes y exponentes de consolidación n y k para cada una de las curvas de fluencia encontradas con los esfuerzos de cedencia de la banda y cada paso de laminación de los materiales estudiados en este proceso de laminación. Se obtuvieron considerando los puntos que se muestran en cada gráfica de las figuras 5.8 a 5.22 a excepción del primer punto, en el cual la deformación es cero, debido a que el logaritmo de cero es indeterminado se decidió omitir.

Por lo cual se procedió a construir la gráfica log esfuerzo-log deformación, después encontrar la ecuación de la pendiente con ayuda de una línea de tendencia que marco el Excel obteniendo una ecuación como sigue:

$$Y = mx + b \quad (5.3.1)$$

Siendo m el valor de la pendiente correspondiente al valor de n y el inverso del logaritmo de b el valor de k.

En lo que respecta a los valores de n para las bandas de los materiales se obtuvieron según la norma ASTM E 646[23].

Debido a que el principio de la deformación plástica es donde se presenta el mayor endurecimiento, a causa del gran aumento de densidad de dislocaciones y al no poder considerar el punto donde la deformación es cero, hay una variación en el valor de n y k para estas gráficas, es decir es menor de lo que debería de ser, porque se pierde un tramo de la curva de fluencia donde el pronunciamiento de la curva es grande por lo que el valor que le corresponde de n es más cercano a 1, ver figura 3.4.3 b), lo cual se puede ver en las curvas donde solo al principio hay un pronunciamiento grande como se muestra en las figuras 5.8, 5.9, 5.11 5.20 5.21 y en menor manera en la figura 5.22.

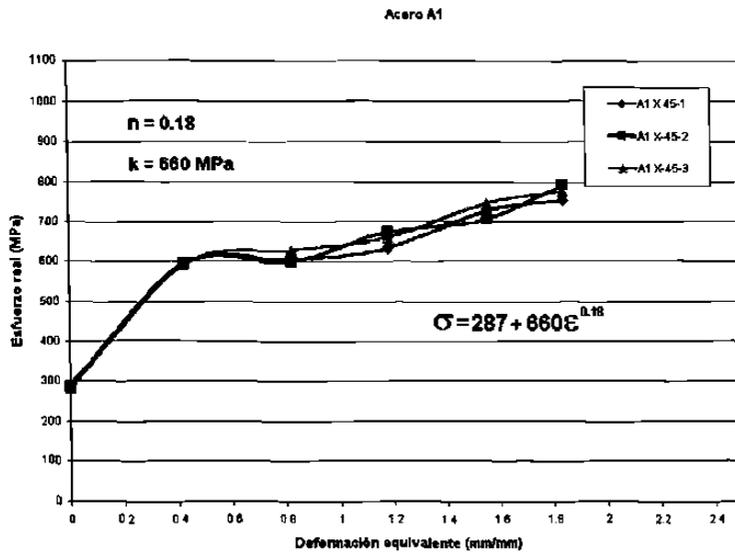


FIGURA 5.8 Curva de fluencia de las muestras A1 a 45° de la laminación.

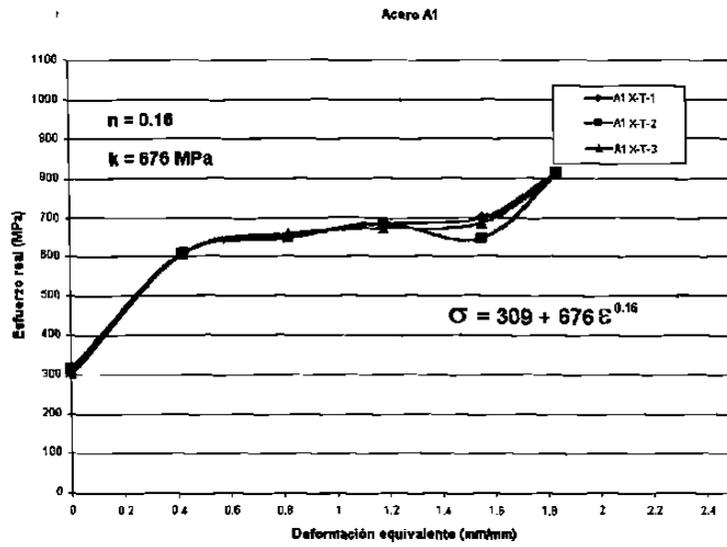


FIGURA 5.9 Curva de fluencia de las muestras A1 transversal a la laminación.

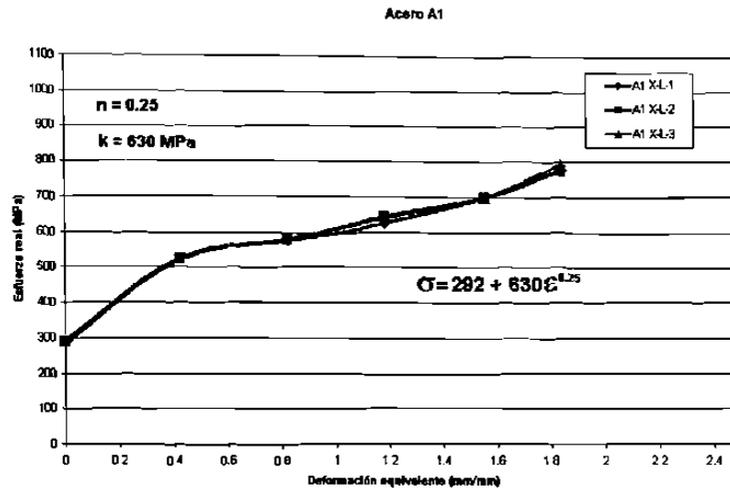


FIGURA 5.10 Curva de fluencia de las muestras A1 longitudinal a la laminación.

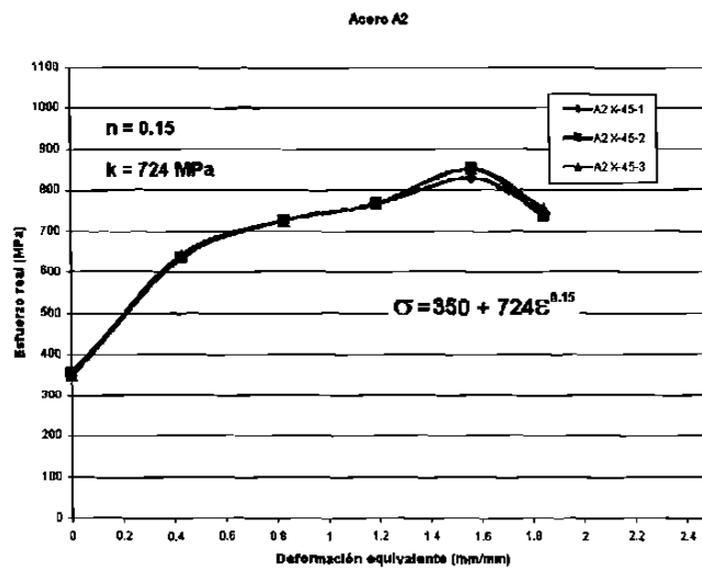


FIGURA 5.11 Curva de fluencia de las muestras A2 a 45° de la laminación.

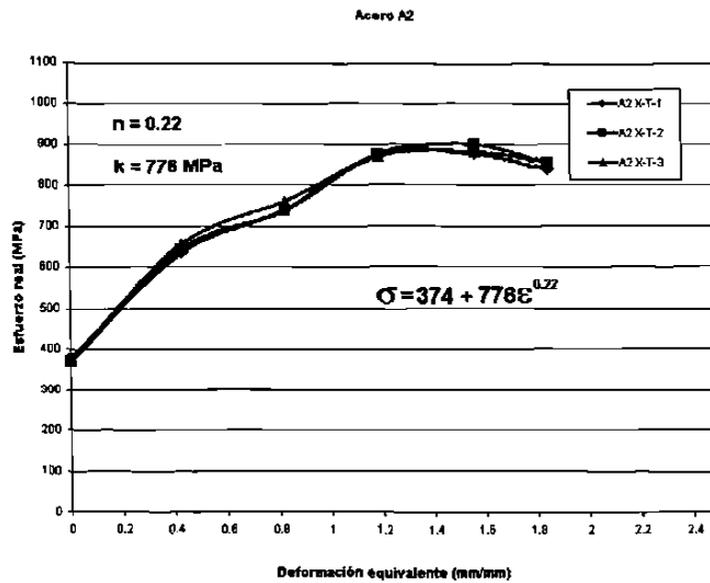


FIGURA 5.12 Curva de fluencia de las muestras A2 transversal a la laminación.

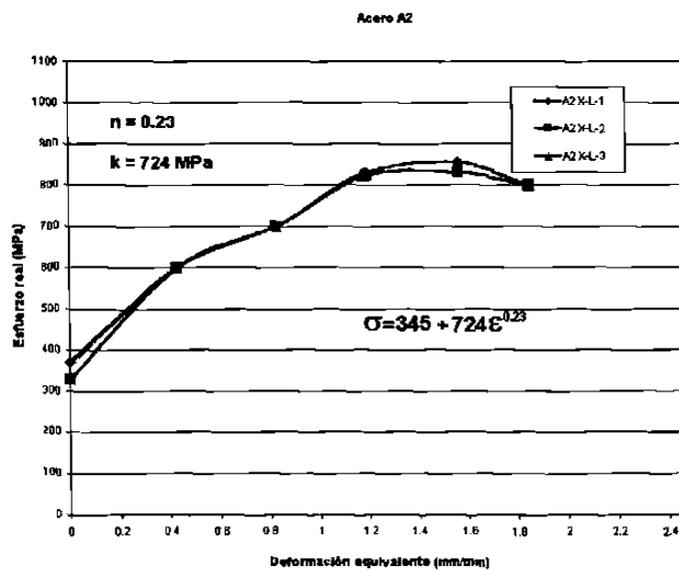


FIGURA 5.13 Curva de fluencia de las muestras A2 longitudinal a la laminación.

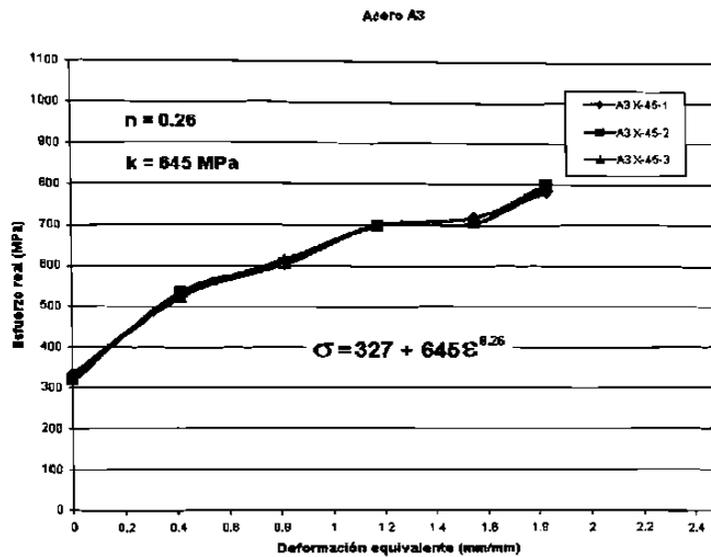


FIGURA 5.14 Curva de fluencia de las muestras A3 a 45° de la laminación.

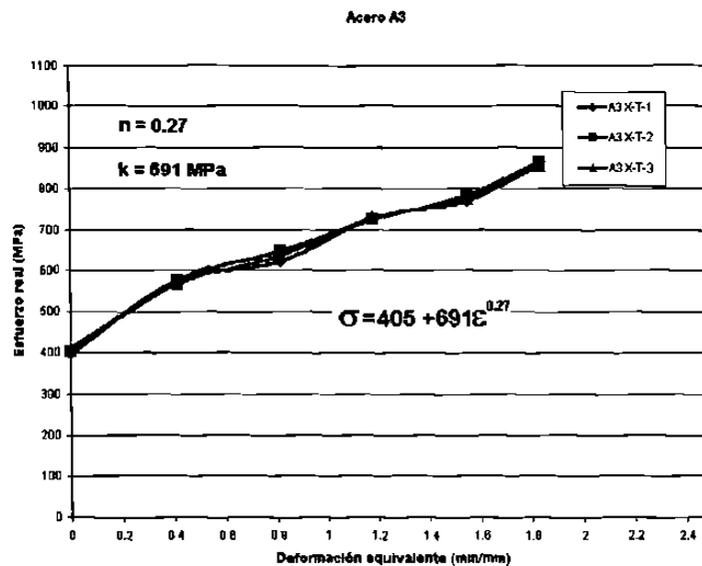


FIGURA 5.15 Curva de fluencia de las muestras A3 transversal a la laminación.

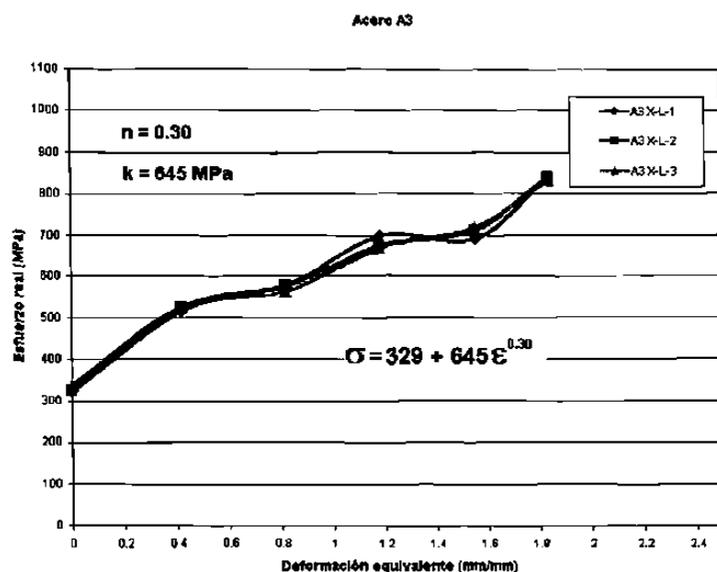


FIGURA 5.16 Curva de fluencia de las muestras A3 longitudinal a la laminación.

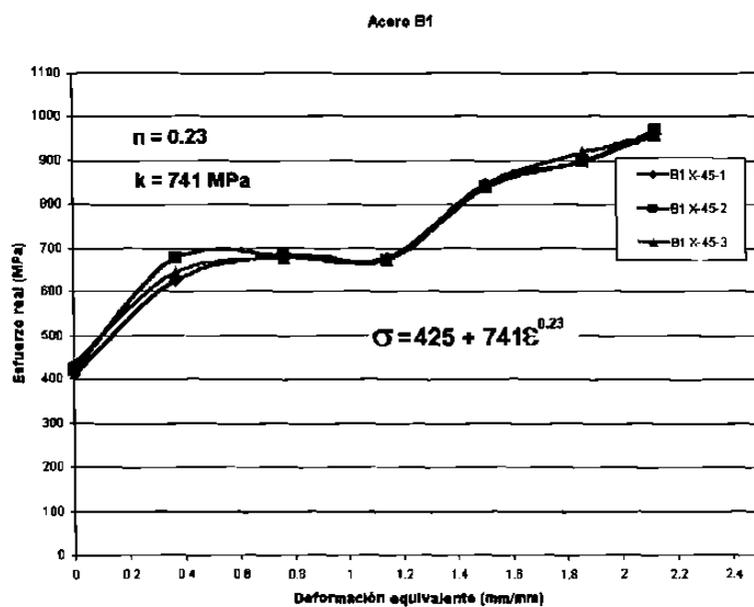


FIGURA 5.17 Curva de fluencia de las muestras B1 a 45° de la laminación.

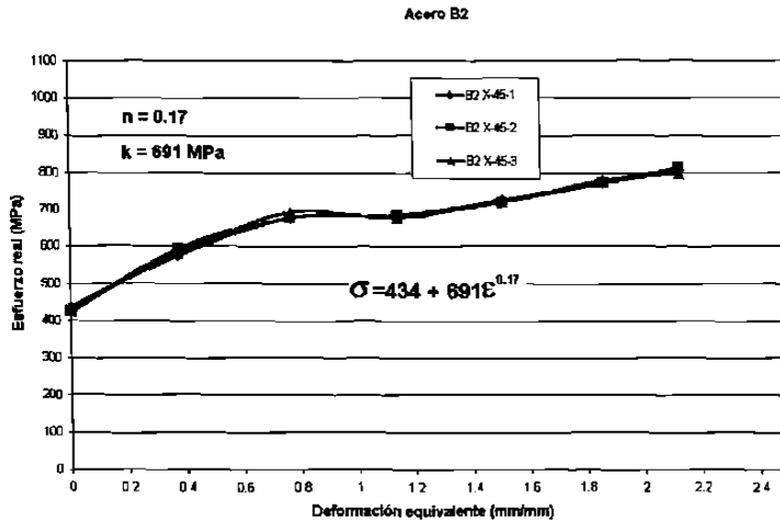


FIGURA 5.20 Curva de fluencia de las muestras B2 a 45° de la laminación.

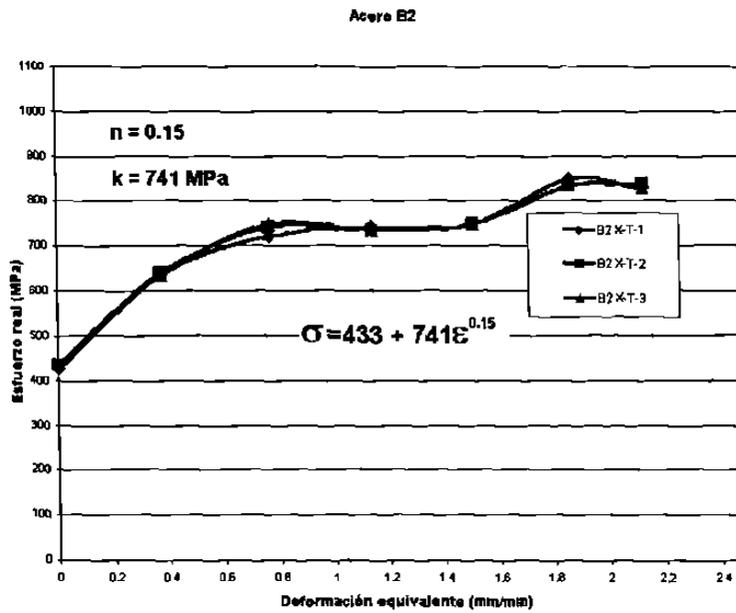


FIGURA 5.21 Curva de fluencia de las muestras B2 transversal a la laminación.

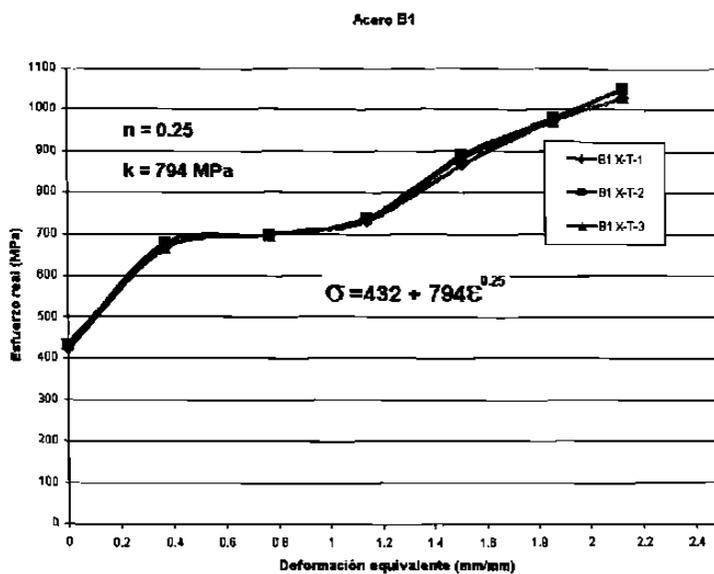


FIGURA 5.18 Curva de fluencia de las muestras B1 transversal a la laminación.

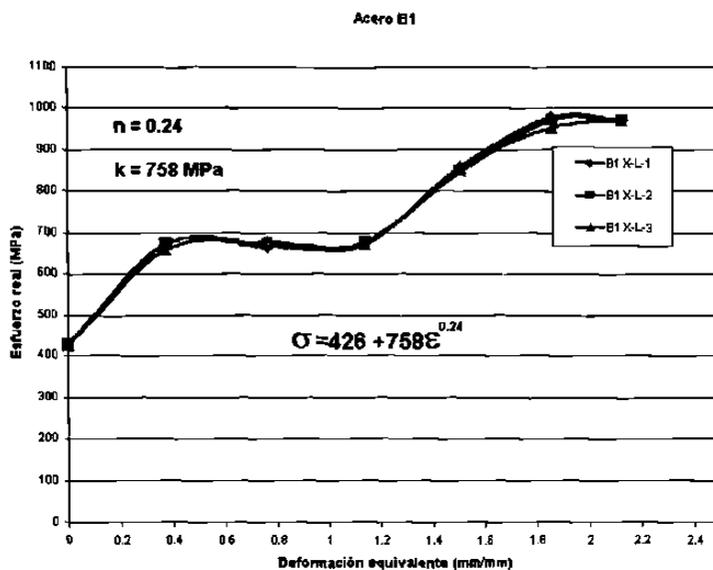


FIGURA 5.19 Curva de fluencia de las muestras B1 longitudinal a la laminación.

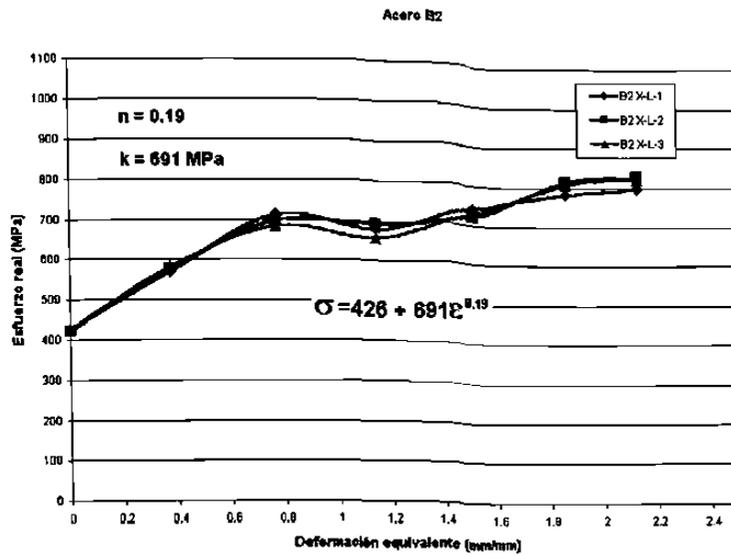


FIGURA 5.22 Curva de fluencia de las muestras B2 longitudinal a la laminación.

En los apéndices C y D se presentan los datos de los puntos de fluencia de las bandas y pasos de laminación respectivamente. Así como en el apéndice F los datos importantes del molino, como lo son las cedulas de rolado, velocidades promedio de cada paso, las tensiones de ambos enrolladores poniente y oriente y la fuerza aplicada por el torniquete en cada paso de laminación.

5.4 Relación dureza Brinell-resistencia a la tensión

En el método Brinell se encuentra la dureza midiendo el diámetro de la huella por la relación del área proyectada de la huella y la carga aplicada.

En general no se utilizan los ensayos de dureza Brinell para durezas superiores a 500, por la deformación que sufre el balón metálico.

La resistencia de un acero puede obtenerse de manera aproximada, multiplicando el número Brinell por un factor que varía según el material (Tabla 5.1). Estos factores son solo validos para durezas de hasta 400 Brinell.

Tabla 5.1 Factores para el calculo de la resistencia a la tensión partiendo de la dureza Brinell [24].

Acero al carbono	0.36
Acero aleado	0.34
Cobre y latón	0.40
Bronce	0.23

La gráfica correspondiente a estas formulas se presenta en la figura 5.23.

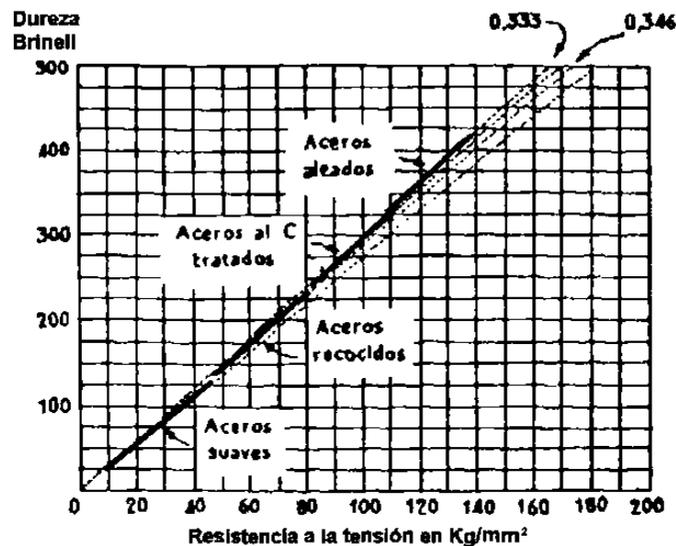


FIGURA 5.23 Relación entre la dureza Brinell y la resistencia mecánica [24].

5.5 Relación dureza Brinell dureza Vickers

La dureza Vickers se encuentra por la relación de la carga aplicada y la superficie de la huella, como en el método Brinell y por lo tanto corresponde con éste hasta alrededor de una 300 unidades de dureza (figura 5.24). Para durezas más elevadas, el balín Brinell se deforma, y la discrepancia entre ambos valores es cada vez mayor.

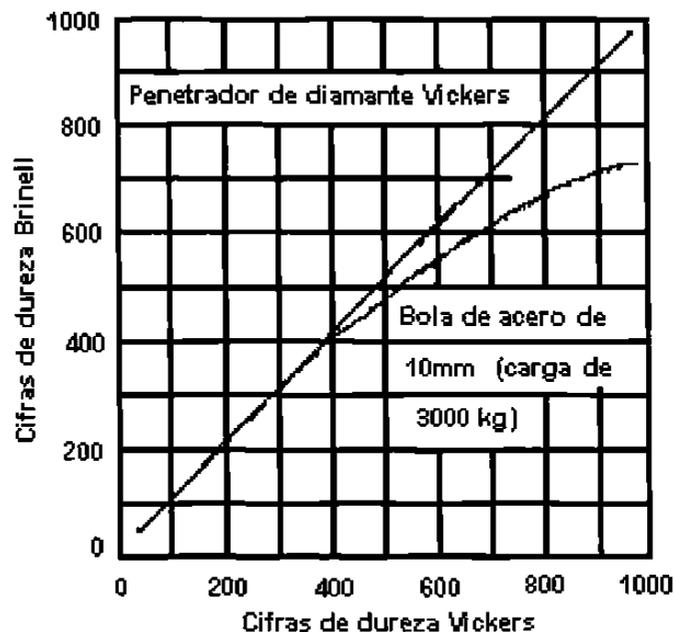


FIGURA 5.24 Equivalencia entre cifras de dureza Brinell y Vickers [24].

Debido a esta relación entre la dureza Vickers y el esfuerzo se decidió crear las gráficas de dureza Vickers-Deformación equivalente con los datos de las tablas 5.2 y 5.3 y así corroborar que existe una relación entre la dureza del material y el esfuerzo al que este cede, el cual corresponde a un valor de alrededor de $1/3$ del esfuerzo de cedencia, ver figuras 5.8 a 5.22 y figuras 5.25 y 5.26, como consecuencia lógica el valor de k en las gráficas de dureza Vickers (figuras 5.25 y 5.26) es una tercera parte del que corresponde a las gráficas de esfuerzo-deformación equivalente.

Tabla 5.2 Dureza Vickers de un acero tipo A en las secciones longitudinal y transversal.

Durezas para un acero tipo A											
Dureza Vickers (HV)											
Banda	longitudinal					transversal					
	paso 1	paso2	paso3	paso4	paso5	paso 1	paso2	paso3	paso4	paso5	
118.27	187.71	184.79	205.82	202.46	239.52	134.30	193.32	190.27	215.19	222.80	249.57
115.57	180.33	185.20	212.77	203.41	245.73	129.58	199.19	194.65	201.05	199.19	254.16
129.09	179.15	181.13	207.77	201.05	243.22	131.29	183.97	202.46	208.76	205.33	250.21
126.72	176.81	179.94	202.46	196.45	256.17	131.29	189.84	192.01	208.76	220.63	239.52
140.93	179.15	192.01	213.80	211.25	247.00	123.50	184.79	214.83	214.83	215.35	239.52
130.55	181.53	185.20	209.25	213.80	234.14	125.09	190.70	212.27	208.76	210.25	258.20
115.16	181.13	189.41	207.77	205.82	231.22	120.41	186.45	201.99	208.76	204.37	237.71
113.95	177.58	187.71	210.25	204.37	244.47	115.77	188.98	187.71	216.39	226.11	245.73
118.05	183.15	195.55	203.41	190.27	247.00	119.76	191.14	194.21	217.96	226.11	239.52
124.41	167.89	187.71	197.36	203.89	231.22	116.59	183.97	194.21	214.83	214.83	238.31
Promedio	123.27	179.44	186.87	207.07	203.28	241.97	124.76	189.24	198.46	211.53	245.24
Desv. estándar	8.67	5.10	4.72	4.99	6.70	7.98	6.61	4.77	9.20	5.17	9.52

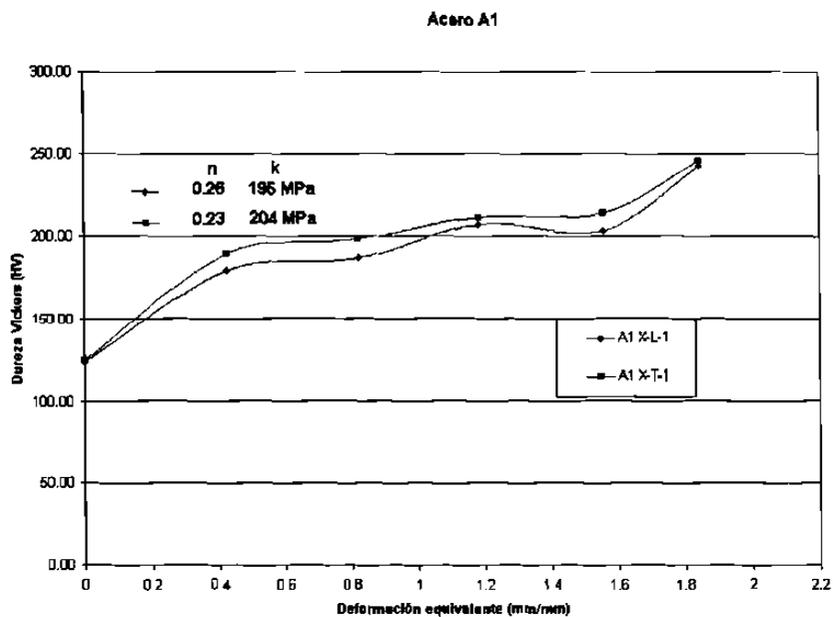


Figura 5.25 Grafica Dureza Vickers-deformación en la zona plástica del acero A1 en dirección longitudinal y transversal.

En la figura 5.25 se presenta una discrepancia entre la curva de fluencia longitudinal y la curva transversal, lo cual probablemente se deba a un problema de textura [25].

Tabla 5.3 Dureza Vickers de un acero tipo B en las secciones longitudinal y transversal.

Dureza para un acero tipo B													
Dureza Vickers (HV)													
longitudinal							transversal						
Banda	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6	Banda	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6
140.93	213.29	214.31	222.25	250.87	269.45	270.18	143.18	220.09	204.85	215.87	252.75	263.74	270.65
136.59	202.46	210.25	219.55	255.50	261.64	257.52	150.45	198.27	215.87	217.95	259.57	262.34	260.26
150.45	207.28	215.87	222.25	260.26	254.16	261.64	147.75	208.25	211.25	222.25	250.87	269.45	263.14
147.75	215.35	224.45	225.00	254.89	263.74	260.95	151.02	213.32	208.26	219.56	255.50	269.45	268.73
143.18	198.27	214.31	216.39	267.29	262.34	262.34	135.85	216.39	216.78	220.12	250.87	267.24	265.24
139.02	213.29	217.95	217.96	244.47	282.24	269.45	137.45	210.15	202.46	208.26	259.57	253.50	269.47
144.28	206.82	202.46	208.26	257.52	267.29	279.15	135.85	208.07	226.12	209.47	259.57	269.45	279.15
142.03	216.39	211.75	213.29	259.57	270.91	260.26	139.02	214.23	214.31	212.75	247.18	269.45	271.20
135.85	220.09	204.85	203.41	250.21	258.88	264.44	136.54	201.00	214.97	214.97	250.87	270.47	264.46
136.90	209.25	208.26	219.55	259.57	253.50	268.73	144.28	206.04	210.65	220.45	252.75	254.16	267.59
Promedio	141.60	210.15	212.45	216.79	256.01	264.41	142.14	209.58	212.55	216.17	263.95	264.92	267.99
Desv estándar	5.00	6.77	6.44	6.73	6.39	8.57	6.43	6.03	6.76	6.72	4.79	4.40	6.44

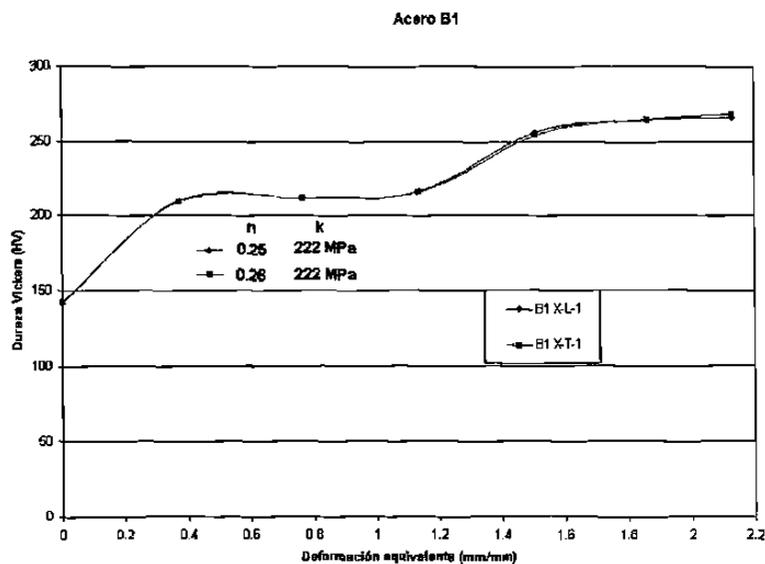


Figura 5.26 Grafica Dureza Vickers-deformación en la zona plástica del acero B1 en dirección longitudinal y transversal.

Si se comparan las figuras 5.25 y 5.26, se aprecia una diferencia en dureza, la se le atribuye a la diferencia en el tamaño de grano de los aceros estudiados ver secciones 5.6-5.8.

5.6 Evolución microestructural

Como se puede observar en las figuras 5.27 y 5.28 en las cuales se muestran la evolución de los granos durante el proceso de laminación, debido al trabajado se direcciona la deformación de los granos (ver sección 3.2.1), en la figura 5.27a) se tiene una matriz ferrítica con perlita laminar y una forma de grano equiaxial.

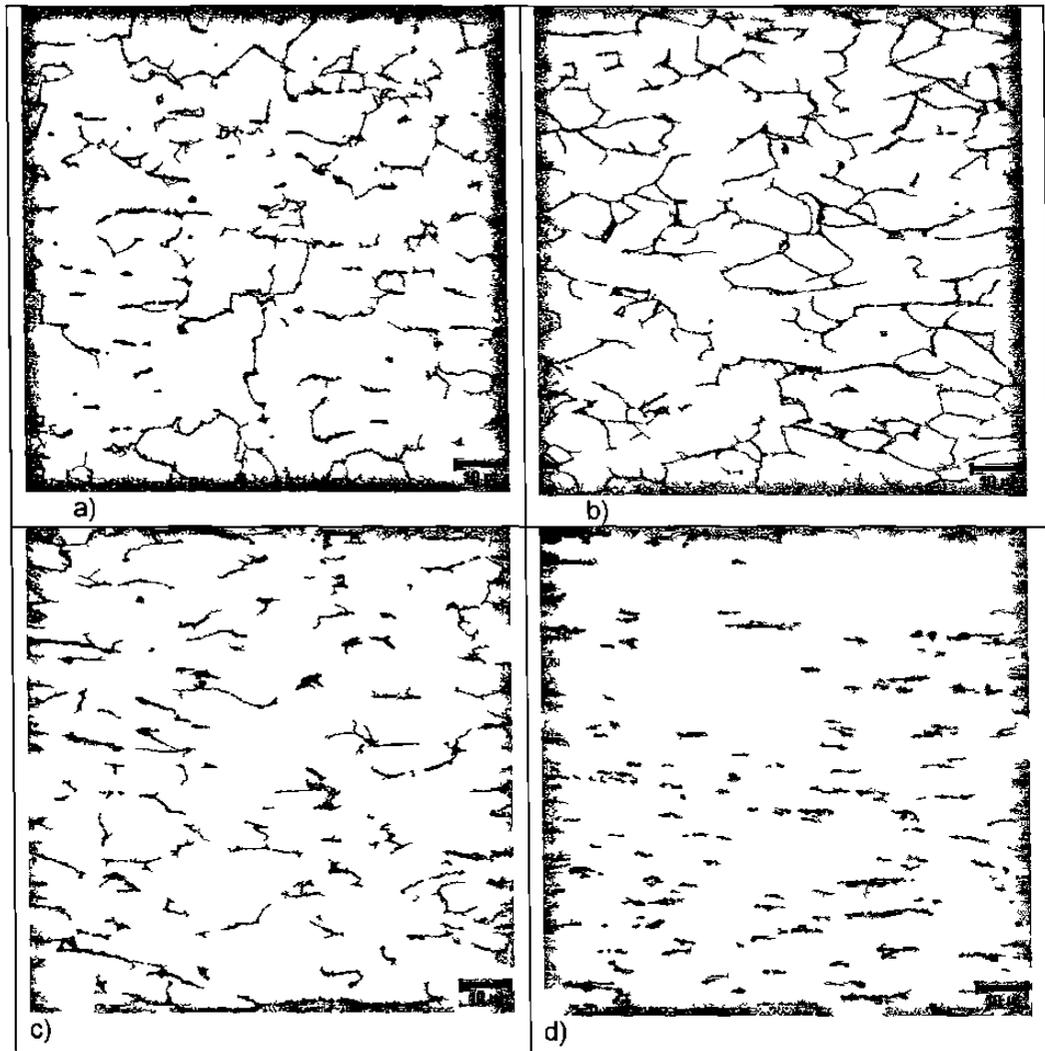


FIGURA 5.27 Evolución microestructural durante la laminación en frío de un acero proveniente de lingote, a) Banda del acero A1, b) Pase 2, 51%, c) Pase 3, 64%, d) Pase 5, 79%.

Igualmente a la figura anterior la figura 5.28 cuenta con una matriz ferrítica con perlita laminar en las fronteras de grano, pero a diferencia de la anterior, esta muestra un tipo de grano de mayor tamaño según la ASTM.

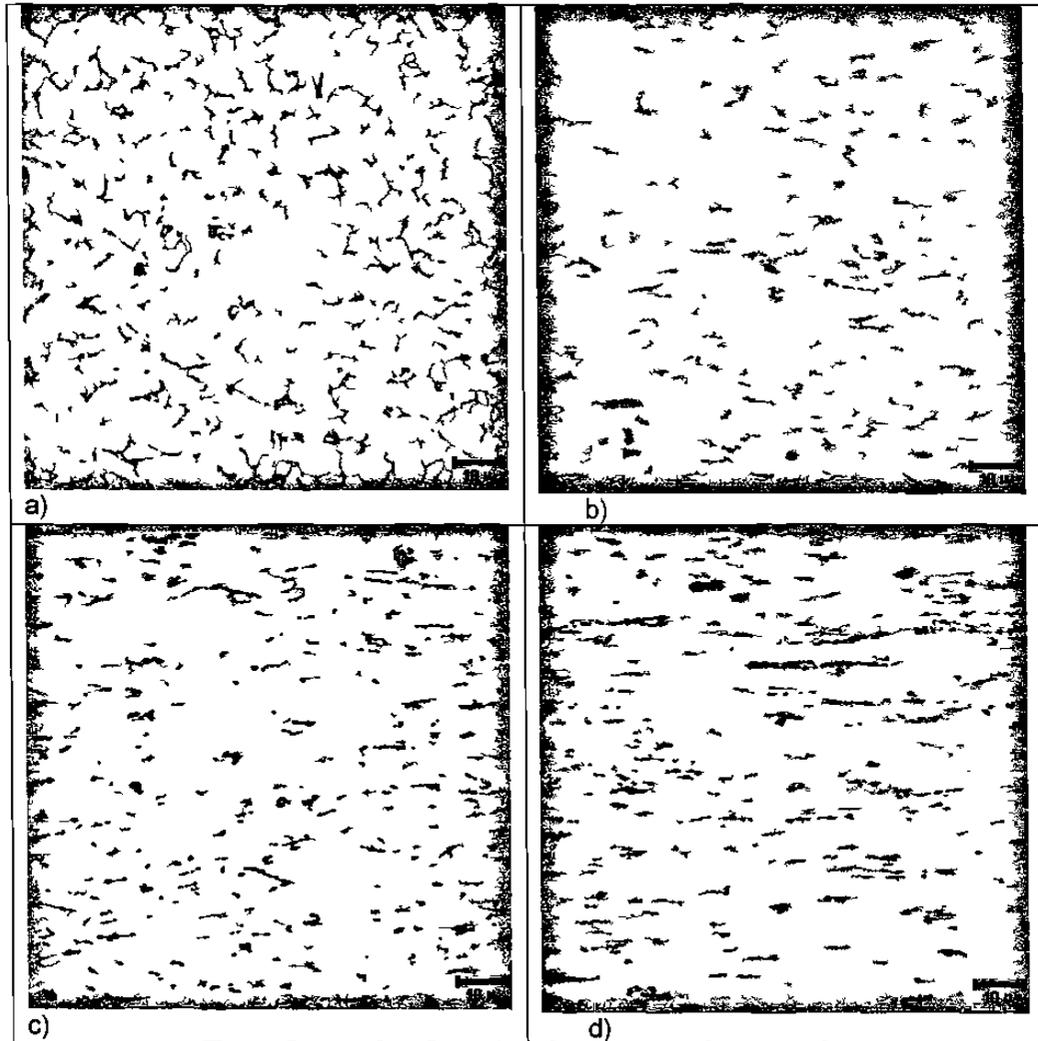


FIGURA 5.28 Evolución microestructural de un acero proveniente de colada continua durante la laminación en frío, a) Banda del acero B1, b) Pase 3, 62%, c) Pase 4, 72%, d) Pase 6, 84%.

Estas diferencias se deben a que los materiales provienen de diferentes procesos, el denominado con la letra A proviene de lingote y el denominado con la letra B del proceso de colada continua. Y en cada proceso las condiciones de enfriamiento fueron de diferentes en tiempo, lo cual provoca que los granos con los que se inicia el proceso de laminación en frío sean diferentes, siendo más pequeños los de colada continua.

5.7 Relación esfuerzo-tamaño de grano

El primer análisis científico que relaciona el esfuerzo con el tamaño de grano fue realizado en una empresa llamada ARMCO por Hall y Petch [24,26] de la cual surge la relación Hall-Petch entre el punto de cedencia y el diámetro del grano, d .

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{(-1/2)} \quad (5.6.1)$$

Donde:

σ_0 y k_y son constantes

Esta relación se aplica para una gran variedad de hierros y aceros así como para numerosos metales no ferrosos, donde la relación lineal entre σ_y y $d^{(-1/2)}$ es claramente presentada a tres diferentes temperaturas en la figura 5.29.

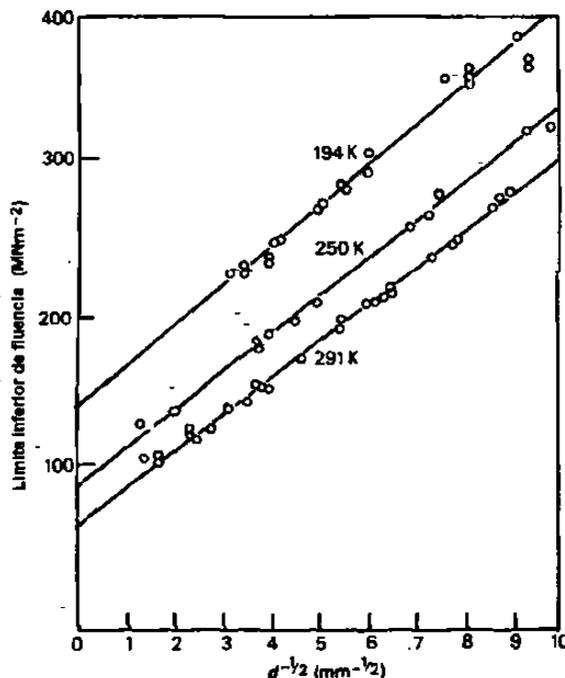


FIGURA 5.29 Dependencia del punto de cedencia inferior con respecto a el tamaño de grano de un acero dulce [26].

Y en la figura 5.30 se puede observar la misma relación presentada en la FIGURA 5.29 pero a temperatura ambiente ya estandarizada por la ASTM.

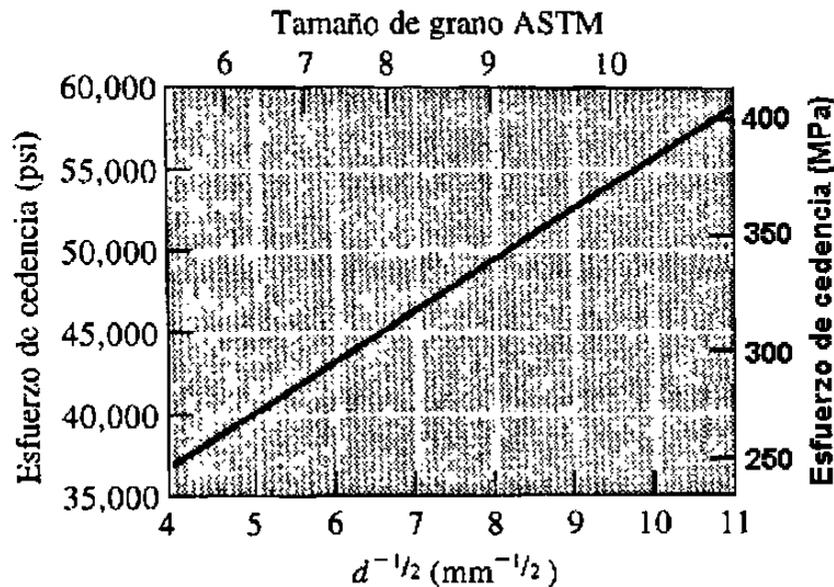


FIGURA 5.30 Efecto del tamaño de grano en el esfuerzo de cedencia del acero a temperatura ambiente modificada de [14].

La constante σ_0 es llamada constante de fricción, que es la intercepción en el eje del esfuerzo la cual representa el esfuerzo requerido para mover las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento.

El término κ_y representa la pendiente de la gráfica esfuerzo-diámetro de grano, se ha demostrado que éste no es sensible a la temperatura, composición química, ni al porcentaje de deformación.

El efecto del tamaño de grano sobre el punto de cedencia se puede explicar, suponiendo que el origen de las dislocaciones dentro de un cristal, causa que las dislocaciones se muevan hacia las fronteras de grano causando un apilamiento en ella lo cual causa un esfuerzo sobre el grano adyacente, el cual, cuando alcanza un valor crítico aparece un nuevo origen en tal grano. Esto se puede observar macroscópicamente en las bandas de Luders, ver figura 5.31 [26,27].

El tamaño de grano determina la distancia que las dislocaciones tienen que moverse para apilarse en la frontera de grano. Por lo cual en un grano grande, los apilamientos son grandes lo cual causa una concentración de esfuerzos grande sobre los granos circundantes.

El esfuerzo cortante, τ_i , en la parte superior de la pila de dislocaciones es igual a $n\tau$ donde n es el número de dislocaciones implicadas y τ es el esfuerzo cortante en el plano de deslizamiento. Esto significa que entre más grande sea el grano se facilita el proceso de fluencia.

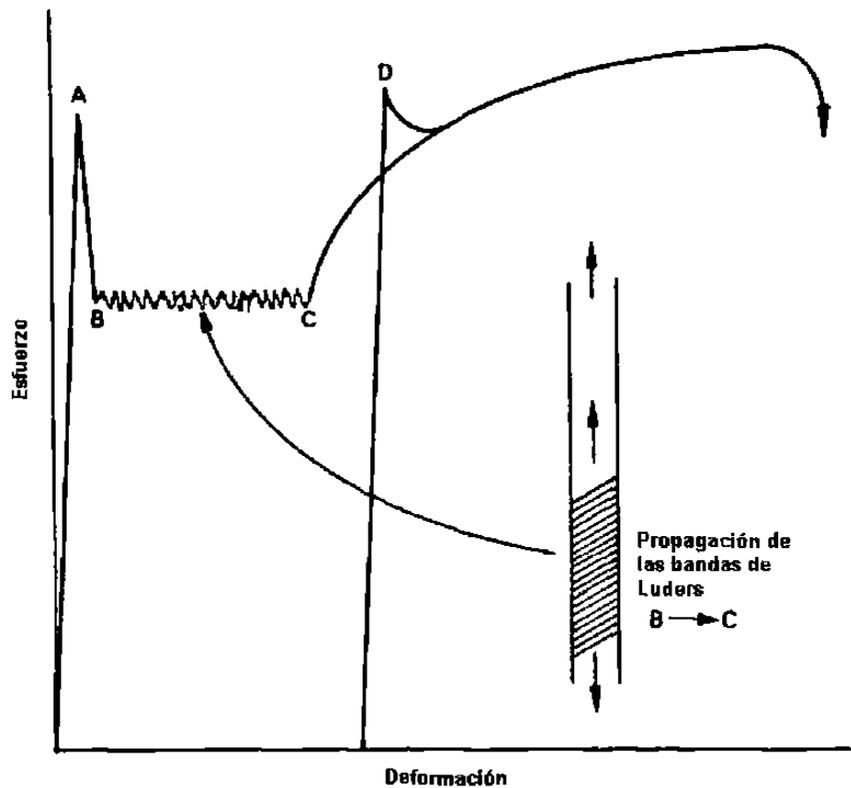


FIGURA 5.30 Ensayo de tensión que muestra la propagación de las bandas de Luders modificada de [26].

5.8 Tamaño de grano

Como se ha visto durante este capítulo, el tamaño de grano tiene una estrecha relación con las propiedades del material como lo son la dureza y el esfuerzo, por lo tanto éste es muy importante para el análisis realizado.

Se muestra en la tabla 5.4 los valores de N [20]. Para los aceros A y B:
donde:

N es el total de las intercepciones por las tres circunferencias [20].

Y en la tabla 5.5 se presentan los resultados obtenidos por el método de Heyn Intercept descrito en el capítulo 4.

Tabla 5.4 Datos de N de los aceros A y B tomados al centro de la lamina

Medición	Datos de N de los aceros				
	A1	A2	A3	B1	B2
1	159	158	153	72	72
2	157	154	152	73	72
3	153	155	157	71	71
Promedio	156	156	154	72	72
Desv estándar	3.06	2.08	2.65	1.00	0.58

Tabla 5.5 Tamaño de grano de los aceros A y B medidos al centro de la lamina

Medición	Tipos de acero				
	A1	A2	A3	B1	B2
1	8.40	8.40	8.40	10.68	10.57
2	8.44	8.40	8.40	10.65	10.55
3	8.36	8.36	8.44	10.57	10.65
Promedio	8.40	8.38	8.41	10.63	10.59
Desv estándar	0.04	0.02	0.02	0.06	0.05
Prom por acero			8.40		10.61
Desv estándar por acero			0.03		0.05

Como se observa en la figura 5.30 el tamaño de grano encontrado corresponde al valor del punto de fluencia arrojado por los ensayos de tensión, por lo que esto corrobora todo el análisis efectuado en este trabajo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.

A continuación se presentan las conclusiones de este estudio:

- Se estableció una metodología para el estudio de las propiedades mecánicas de los aceros laminados en frío.
- Se encontraron las curvas de fluencia para cada uno de los aceros así como sus ecuaciones constitutivas.
- Se observó que la relación que guarda la dureza con respecto al esfuerzo de fluencia es $1/3 \sigma = HV$. Lo cual también sirvió para corroborar la validez de los ensayos de tensión realizados.
- Se observó la relación de las propiedades mecánicas con el tamaño de grano según la relación de Hall-Petch, lo cual lleva a la conclusión de que el tamaño de grano encontrado corresponde al valor del esfuerzo de fluencia de los ensayos de tensión realizados.

Recomendaciones para trabajos futuros:

- Estudiar la influencia de la textura en los resultados obtenidos.
- Encontrar una forma confiable de incluir el punto donde la deformación es cero en las gráficas obtenidas.
- Tomar los datos obtenidos en este trabajo para realizar la modelación de fuerzas del molino de laminación estudiado así como tomar más rollos para su análisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Iurman Lucio, "Trabajado Mecánico de los Metales", I.L.A.F.A., Argentina, 1986.

[2] Roberts L. William "Cold Rolling of Steel", Dekker, E.U.A., 1978.

[3] Colás R. y Cabrera J., "Laminación en caliente", II Seminario de tecnología Metalúrgica, Eds. por R. Colás y J.M. Cabrera, España, 1998.

[4] Chorley y Pickersgill Ltd., "Roll Pass Desing", British Steel Corporation, Inglaterra, 1979.

[5] Dieter George E., "Mechanical Metallurgy", Mc Graw-Hill, México, 1988.

[6] González Jorge Luis, "Metalurgia Mecánica", Noriega-Limusa México, 1999.

[7] Servin Castañeda R., "Caracterización y Análisis de rodillos de laminación en caliente y frío", Tesis de Maestría, F.I.M.E., U.A.N.L., México 1999.

[8] Mielnik M. Eduard, "Metalworking science and engineerng", E.U.A., 1991.

[9] Ginzburg B. Vladimir, "Steel-Rolling Tecnology theory and practice", Dekker, E.U.A., 1978.

[10] Roberts L. William, "Flat Processing of steel", Marcel Dekker, Inc.E.U.A., 1988

[11] Kiepora T. Robert, Lampman F. Heather, Thomas Penelope, Wheaton D. Nikki., "Handbook volume 4 de la ASM", E.U.A., 1991.

[12] Groover P. Mikell, "Fundamentos de Manufactura Moderna", Prentice Hall, México, 1997.

[13] Kittel Charles, "Introducción a la física del estado sólido", Reverté, España, 1995.

[14] Askeland R Donald, "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", International Thomson Editores México, 1998.

[15] Van Vlack H. Lawrence, "Materiales para ingeniería", C.E.C.S.A., México, 1991.

[16] Avner Sydney H., "Introducción a la Metalurgia Física Avanzada", Mc Graw-Hill, México, 1994.

[17] Begeman L. Miron, "Procesos de Fabricación", C.E.C.S.A., México, 1969.

[18] www.uc3m.es/uc3m/inst/AAB/Reologia.html.

[19] Annual book of ASTM Standard, (Vol. 01.02, 01.03, 02.02, 03.01, 14.02), 1999.

[20] Practical Applications of Quantitative Metallography. McCall/Steele, editors, ASTM STP 839. Julio 1984.

[21] Schaffer, Saxena, Antolovich, Sanders, Warner, "Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería", C.E.C.S.A., México, 2000.

[22] Askeland R Donald, "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Grupo editorial Iberoamérica, México, 1987.

[23] Annual book of ASTM Standard, (Vol. 03.01., 14.02), 1998.

[24] Lasheras José María y F. Carrasquilla Javier, "Ciencia de Materiales", Donostiarra S.A., España, 1991.

[25] Zambrano Robledo Patricia del Carmen, "Utilización de la técnica de microscopia de imágenes de orientación para relacionar la microtextura de aceros laminados en caliente con la anisotropía", Tesis de Doctorado, F.I.M.E., U.A.N.L., México 2000.

[26] Honeycombe y Bhadeshia, "Steels Microstructure and Properties", Edward Arnold, Inglaterra, 1981.

[27] Pérez Unzueta Alberto Javier, "Wear Resistance of Pearlitic rail steels", Tesis de Doctorado, Department of Engineering, University of Leicester, Inglaterra, 1992.

APÉNDICE A

Esfuerzo ingenieril- esfuerzo real

El esfuerzo (σ) y la deformación (ϵ) ingenieriles se describen en las siguientes ecuaciones;

$$\sigma = F/A_0 \quad (A-1)$$

$$\epsilon = (l-l_0)/l_0 \quad (A-2)$$

Donde A_0 es el área original de la sección transversal de la probeta antes de iniciarse el ensayo, l_0 es la distancia original entre marcas calibrada y l es la distancia entre las mismas, después de haberse aplicado la carga.

La curva ingenieril esfuerzo-deformación nos da una indicación errónea de las características del material después del punto de cedencia, debido a que esta se encuentra basada estrictamente en las dimensiones originales de la probeta, las cuales cambian continuamente durante el ensayo de tensión o tracción. Por lo tanto los valores obtenidos son ficticios.

Las cantidades correspondientes donde si se toman en cuenta los cambios en dimensiones de la muestra se llaman esfuerzo real y deformación real.

El esfuerzo real (s) es definido como la carga F dividida entre el área instantánea A_i

$$s = F/A_i \quad (A-3)$$

Y la deformación real es definida como el cambio diferencial de longitud, dl , dividido entre la longitud instantánea l y se calcula de la siguiente manera:

$$e = \int dl/l = \ln(l/l_0) \quad (A-4)$$

Antes de iniciarse el encuellamiento son validas las siguientes relaciones entre los esfuerzos y deformaciones reales e ingenieriles.

$$e = \ln(1 + \epsilon) \quad (A-5)$$

$$s = \sigma/(1 + \epsilon) \quad (A-6)$$

En la figura A-1 se muestra una comparación entre las gráficas ingenieriles y reales.

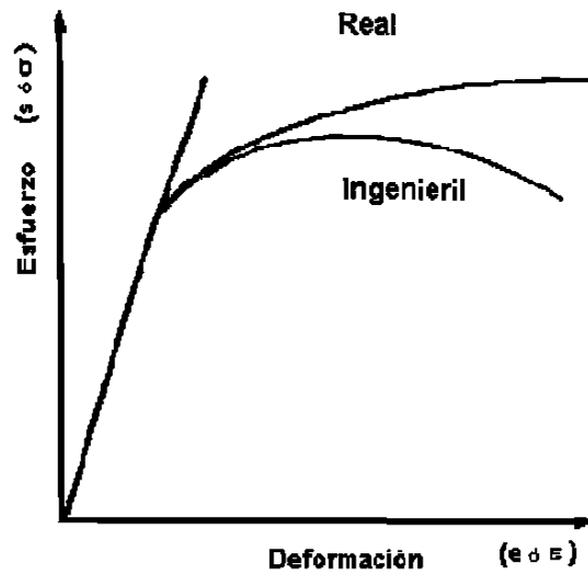
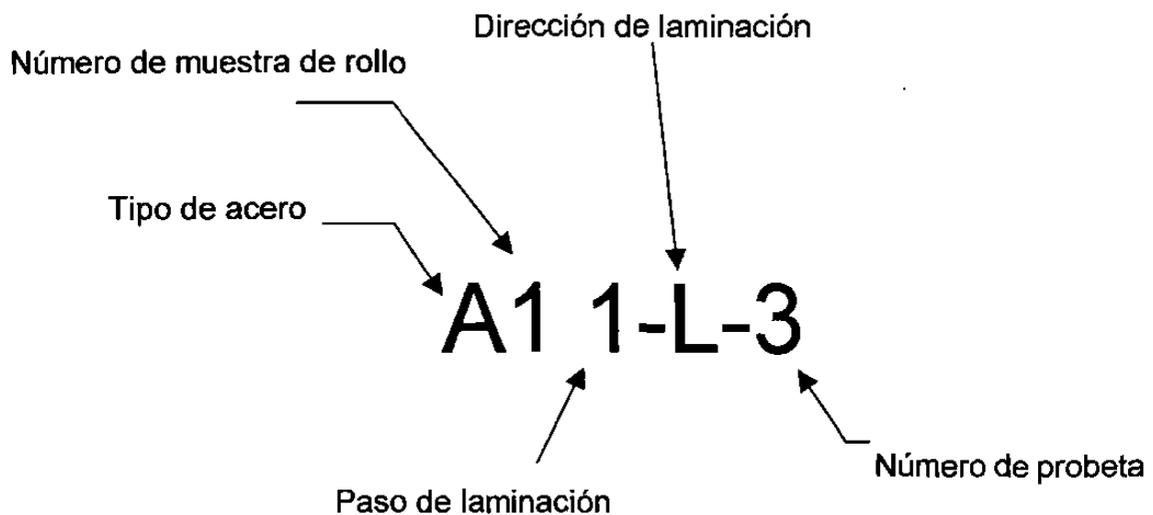


FIGURA A 1 Gráficas ingenieril y real de esfuerzo deformación obtenidos con la misma prueba de tensión [21].

Apéndice B

Curvas esfuerzo-deformación de las bandas y cada pase en los aceros A y B



Acero tipo:

A = Lingote

B = Colada continua

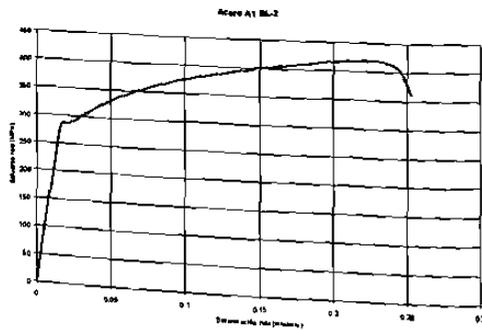
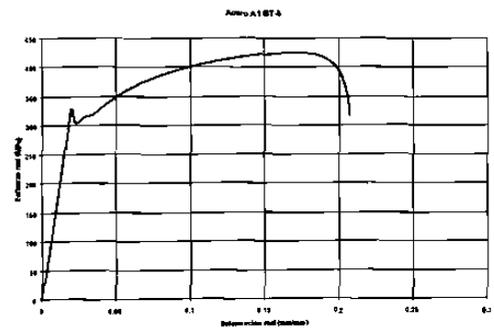
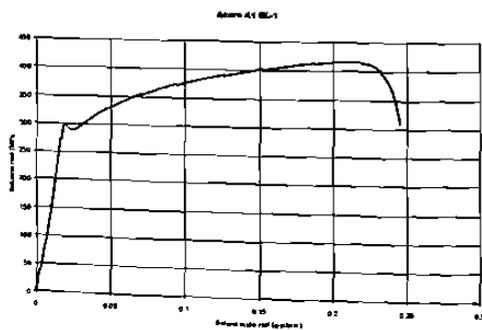
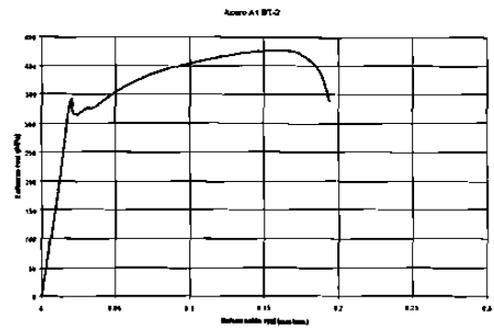
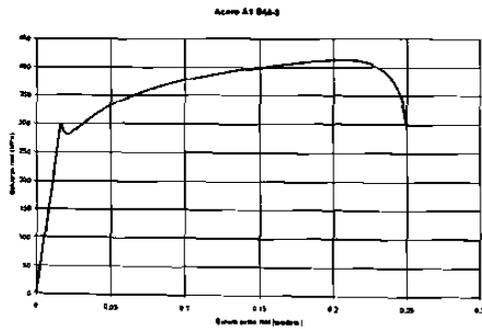
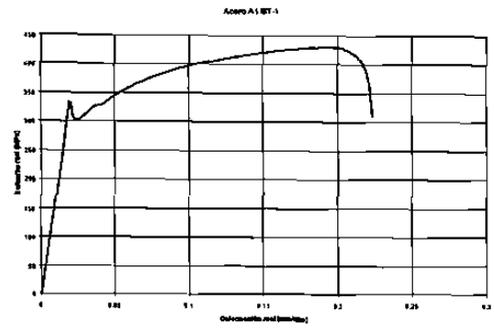
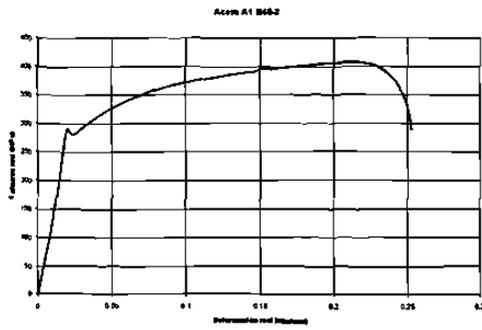
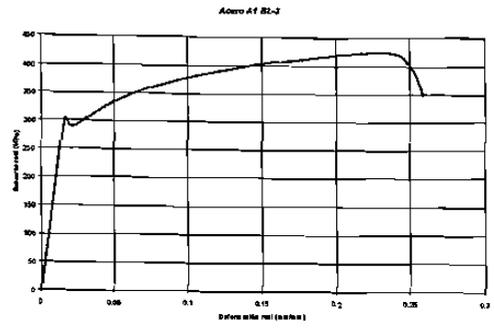
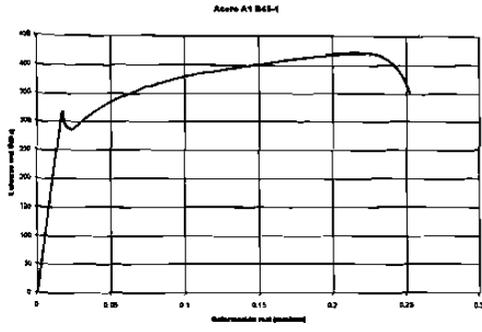
Nota: la B en el paso de laminación significa banda.

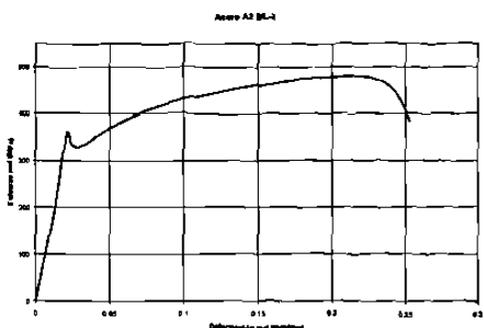
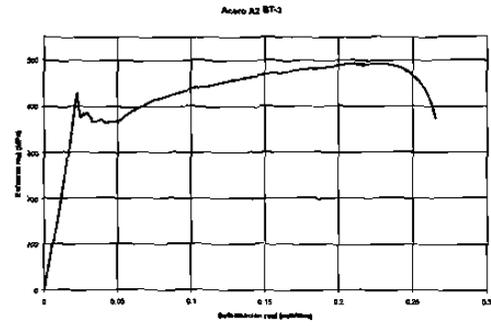
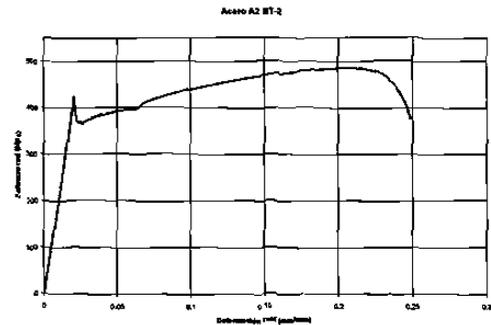
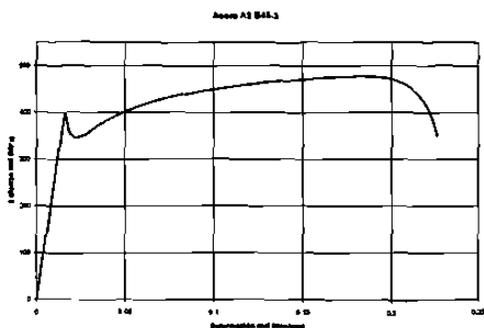
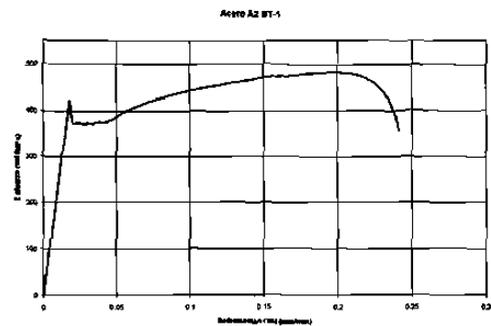
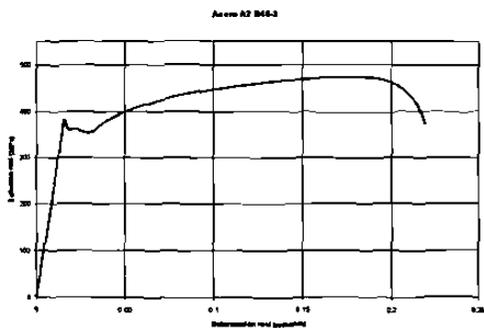
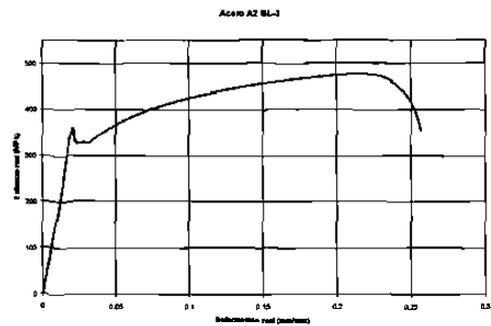
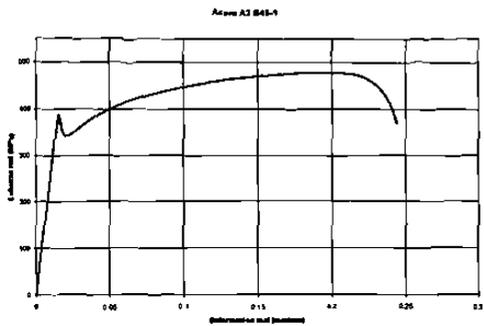
En la dirección de laminación las letras tienen el siguiente significado:

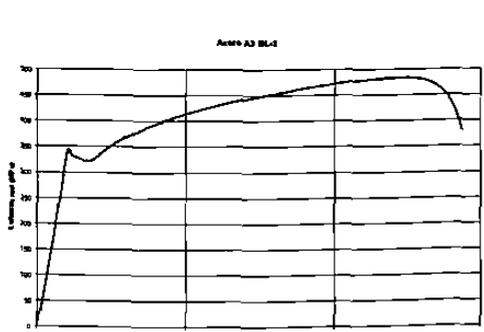
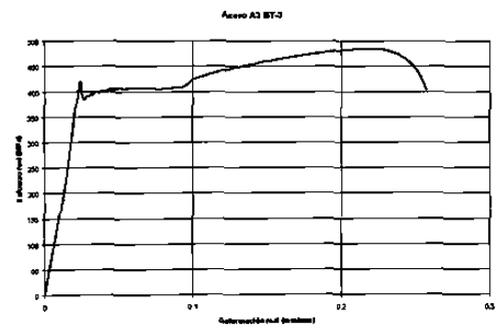
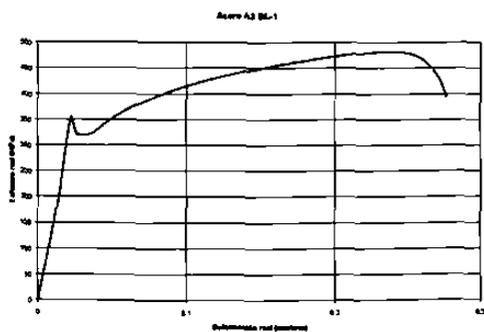
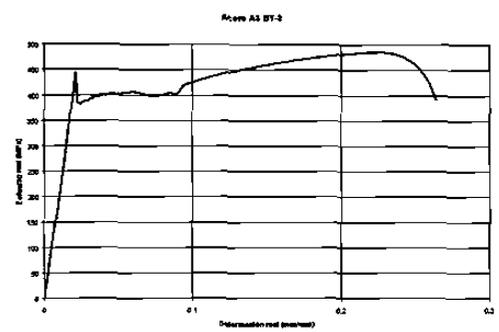
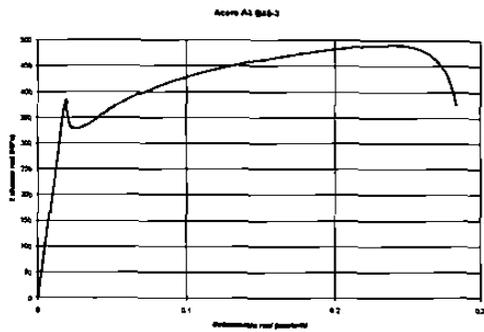
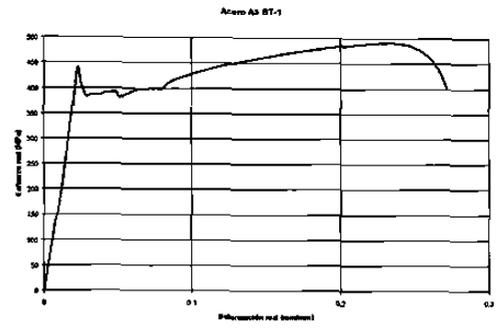
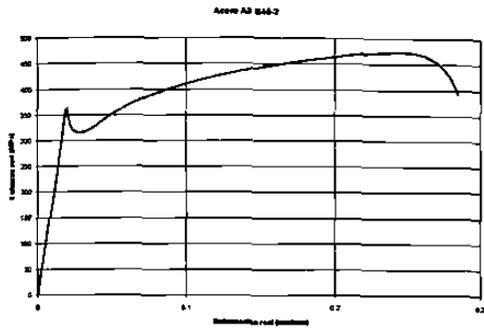
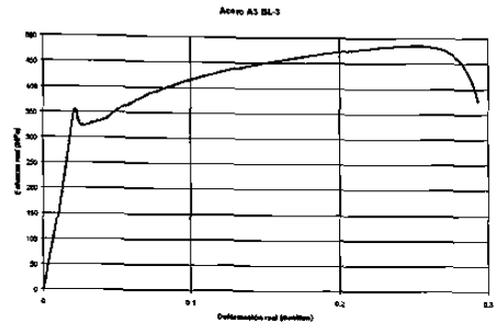
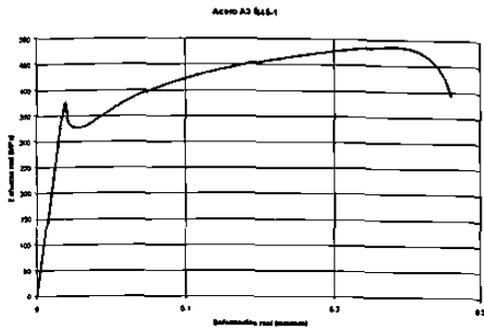
L = longitudinal

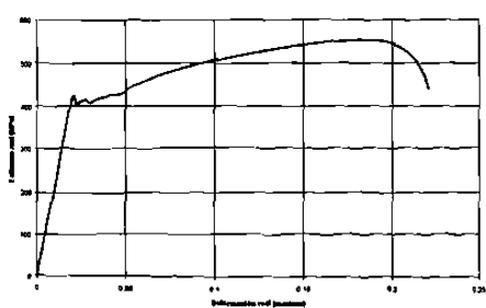
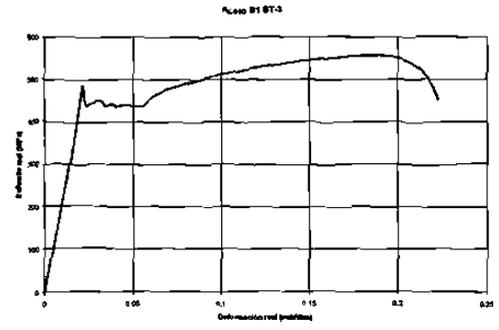
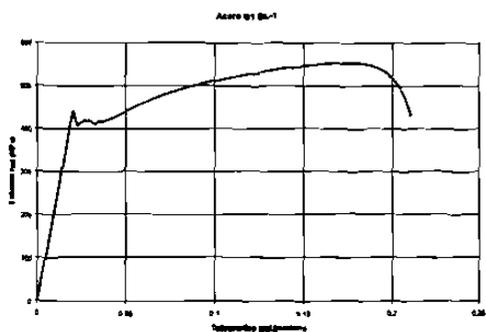
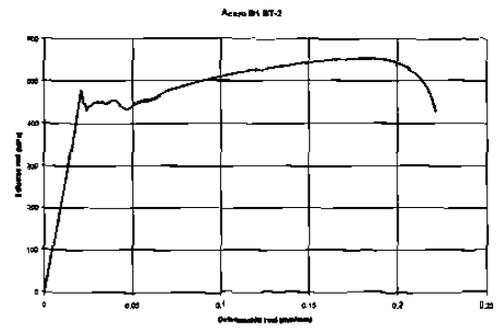
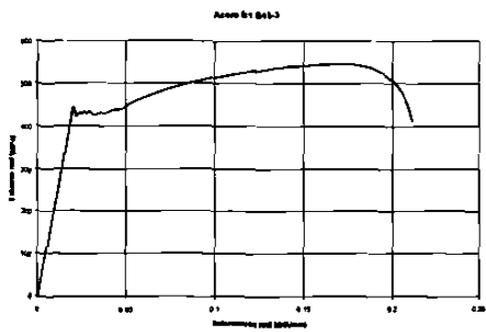
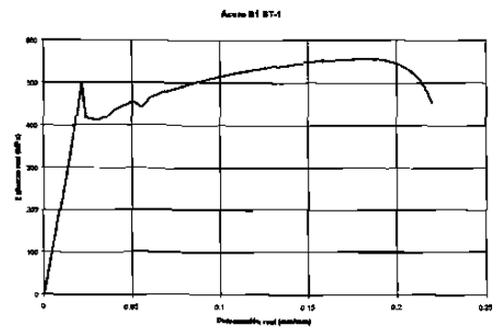
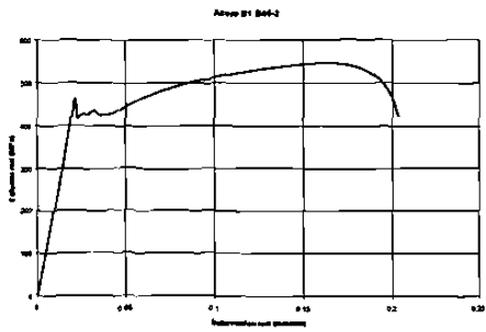
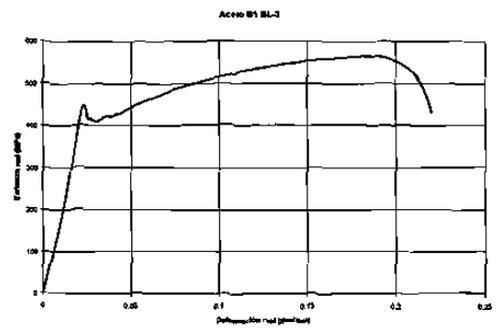
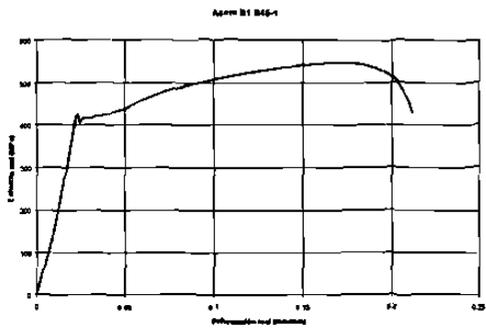
T = transversal

45° = cuarenta y cinco grados

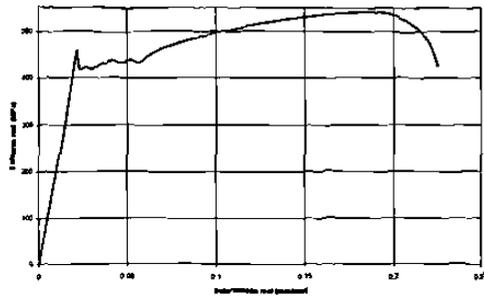




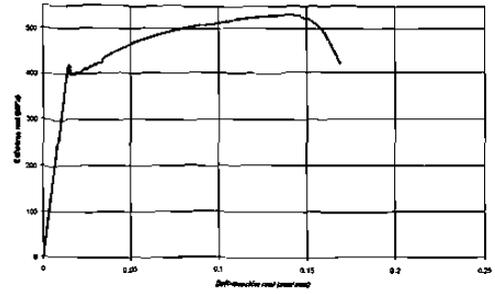




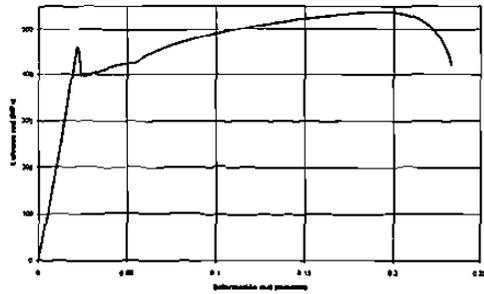
Acero B2 B44-1



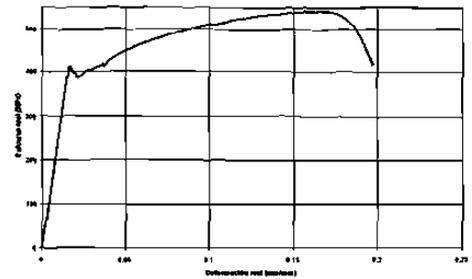
Acero B2 BL-3



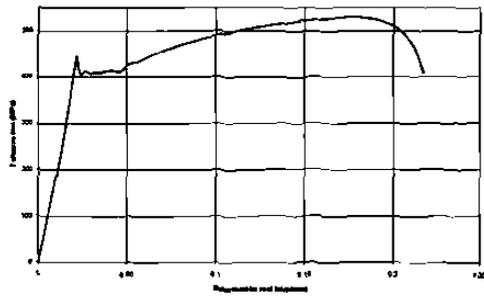
Acero B2 B44-2



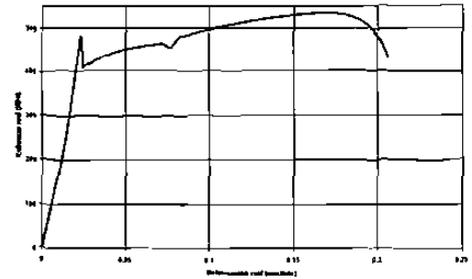
Acero B2 BT-1



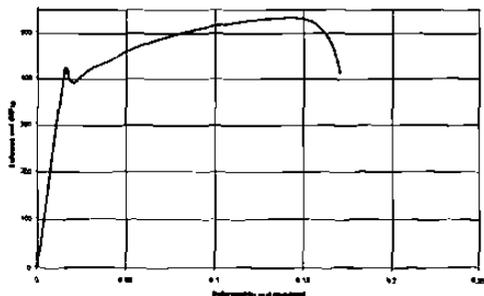
Acero B2 B44-3



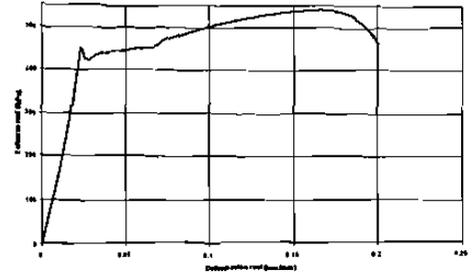
Acero B2 BT-2



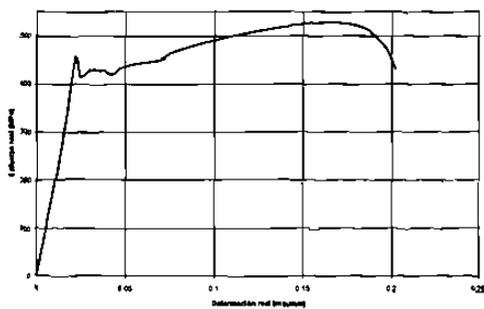
Acero B2 BL-1

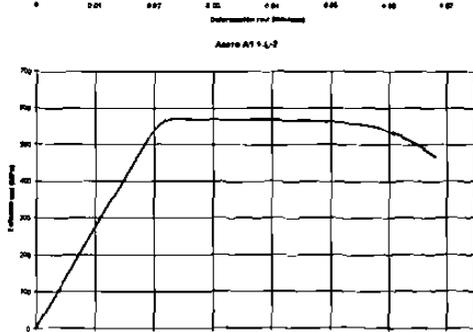
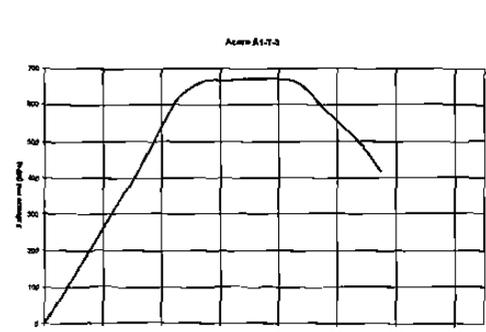
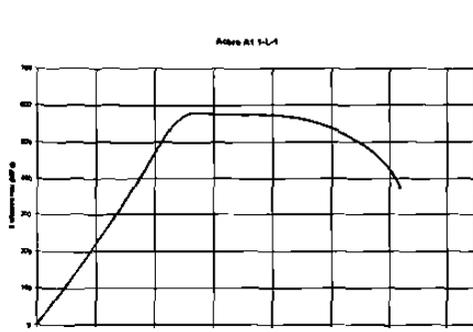
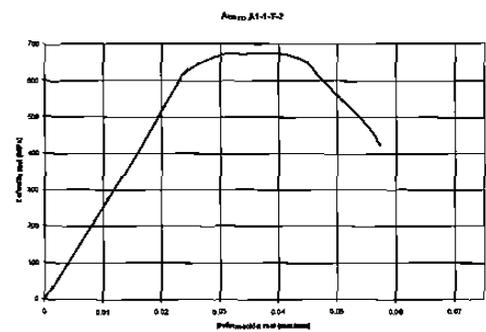
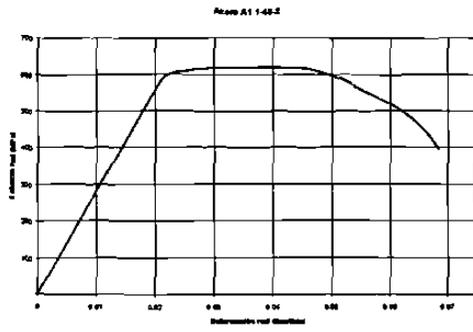
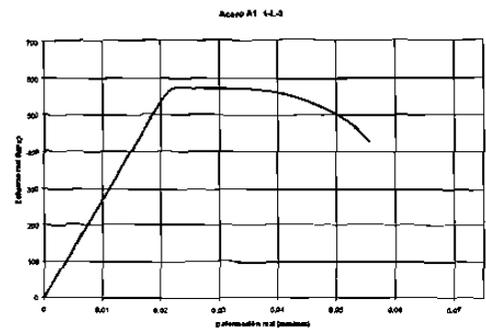
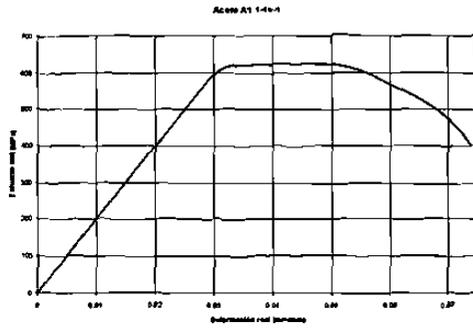


Acero B2 BT-3

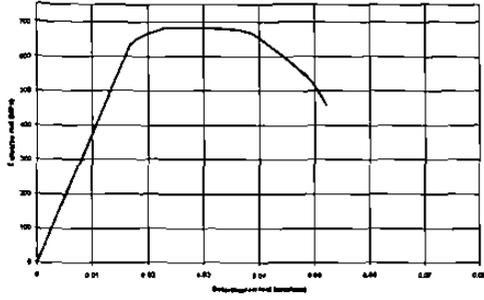


Acero B2 BL-2

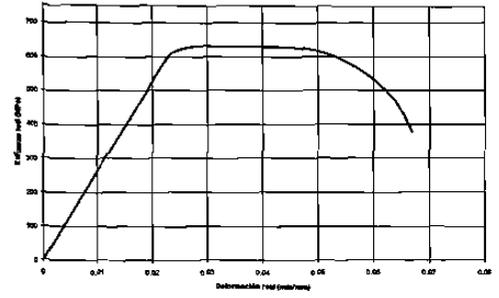




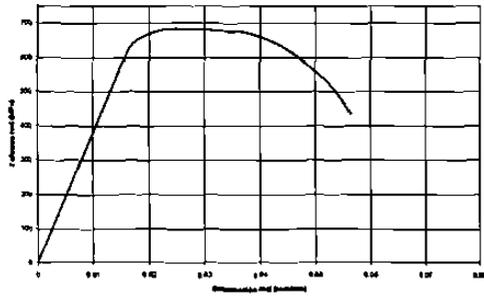
Acero A2 1-45-1



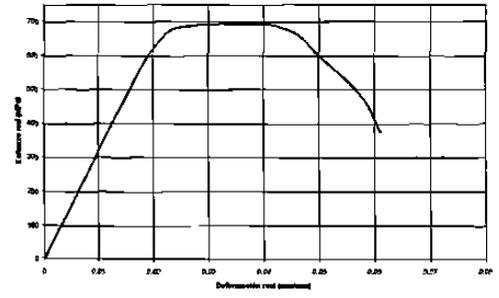
Acero A2 1-L-3



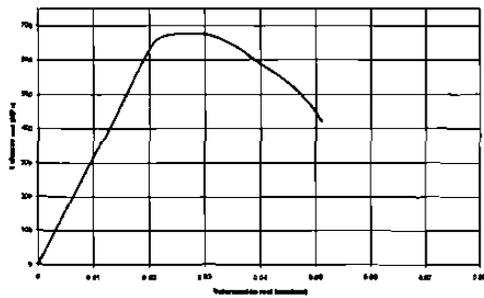
Acero A2 1-45-2



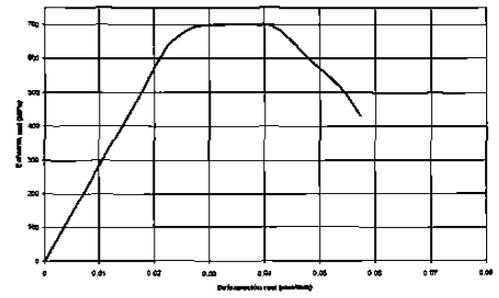
Acero A2 1-T-1



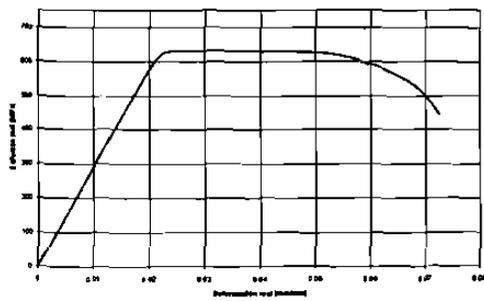
Acero A2 1-45-3



Acero A2 1-T-2



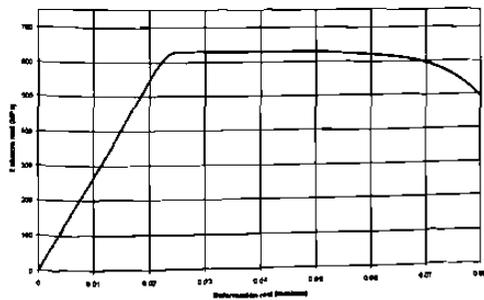
Acero A2 1-L-1



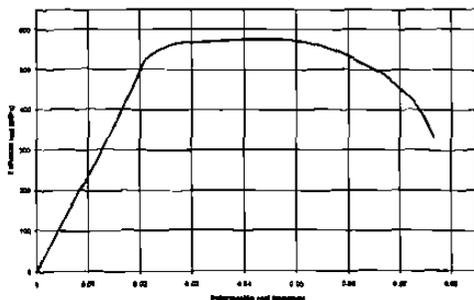
Acero A2 1-T-3



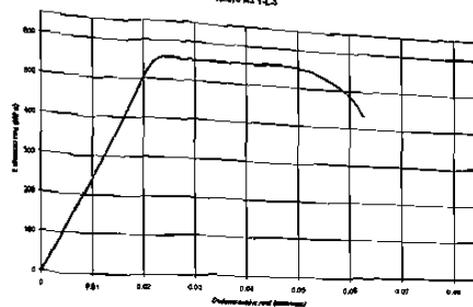
Acero A2 1-L-2



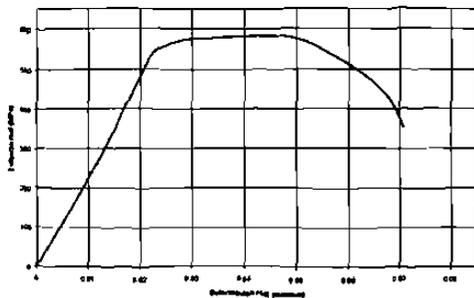
Acero A3 1-4A-1



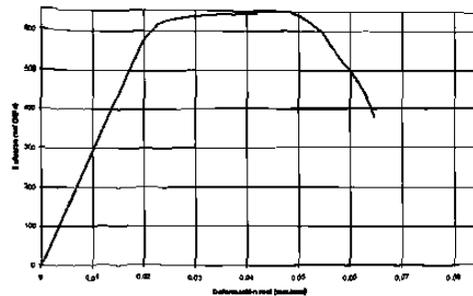
Acero A3 1-4-3



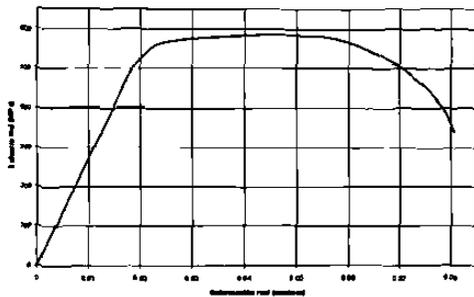
Acero A3 1-4A-2



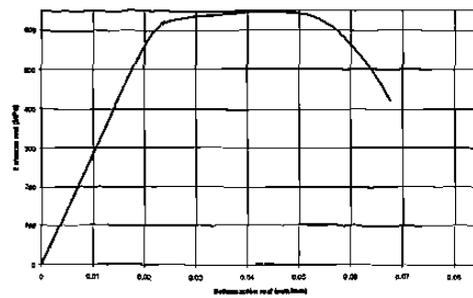
Acero A3 1-4-4



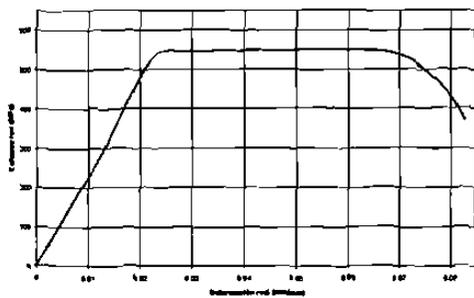
Acero A3 1-4A-3



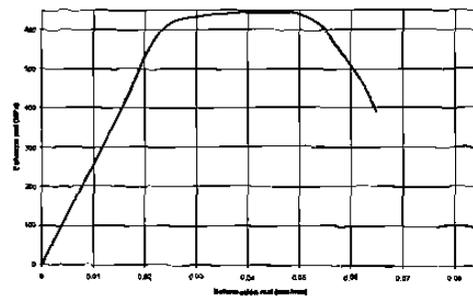
Acero A3 1-4-2



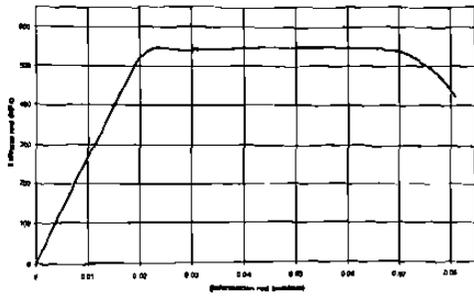
Acero A3 1-4-1

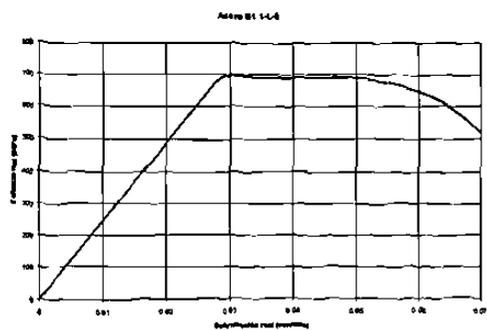
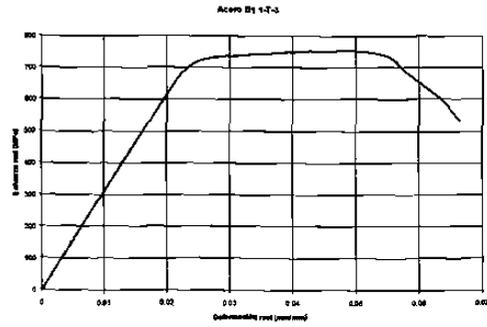
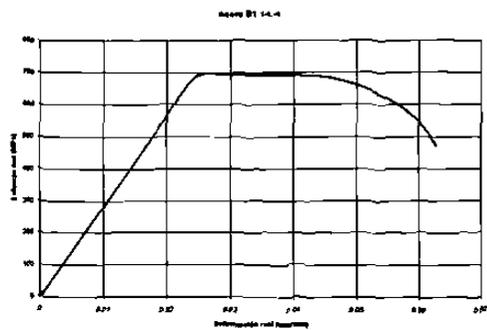
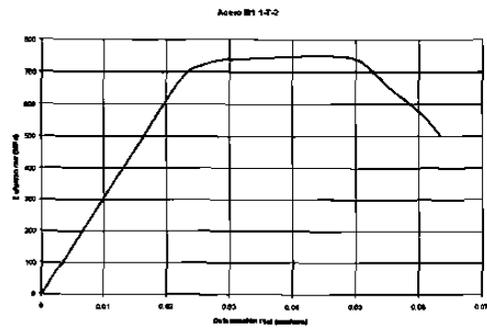
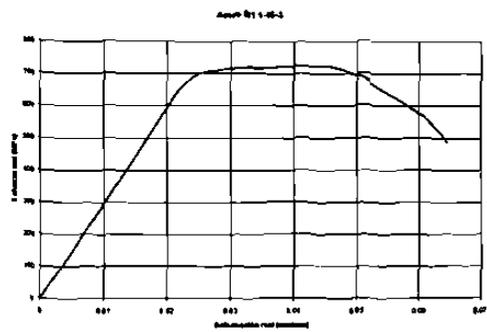
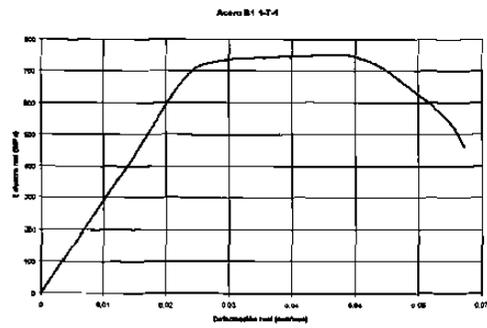
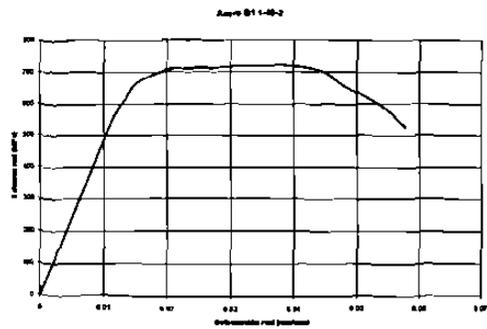
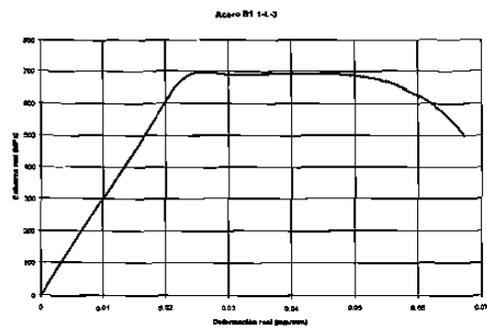
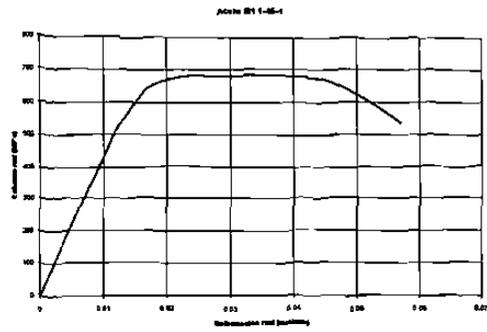


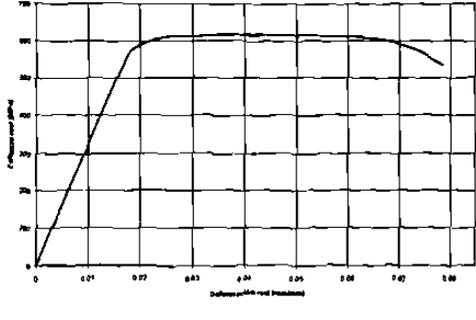
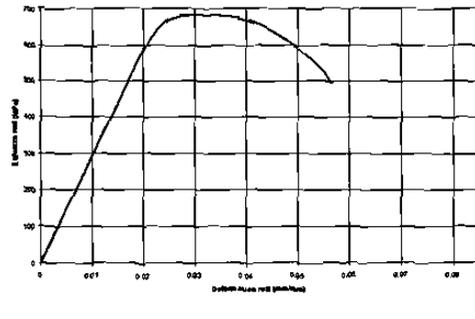
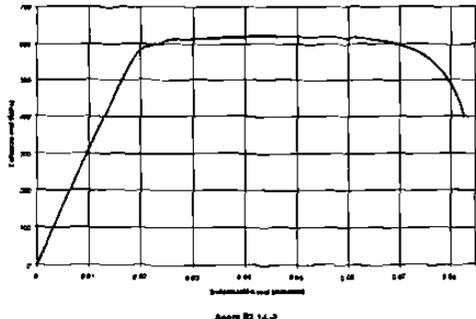
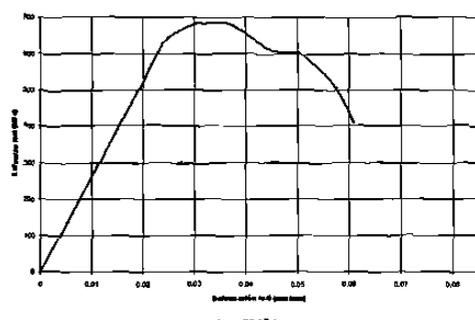
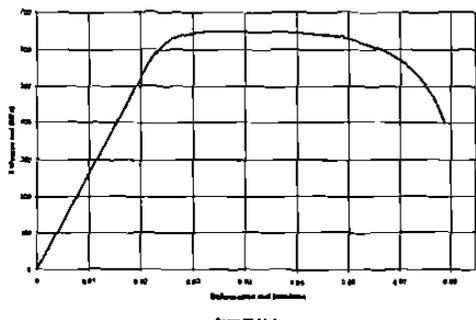
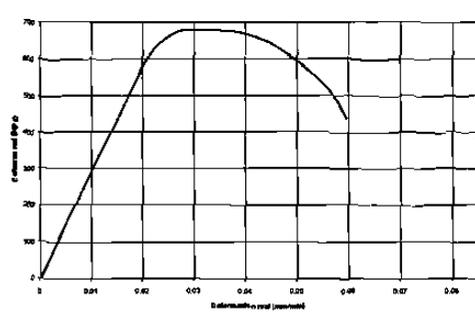
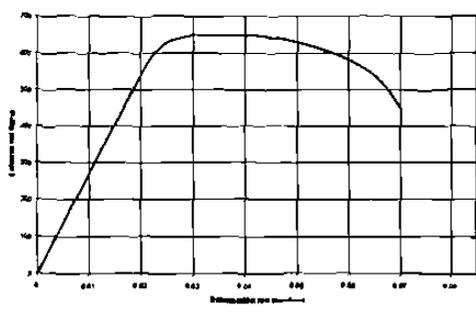
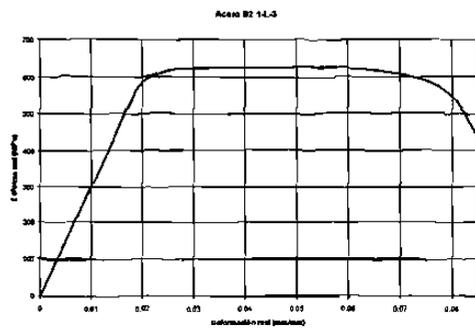
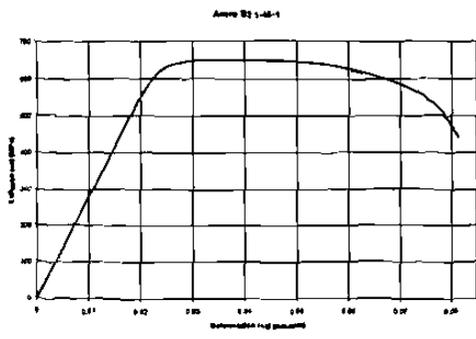
Acero A3 1-4-3

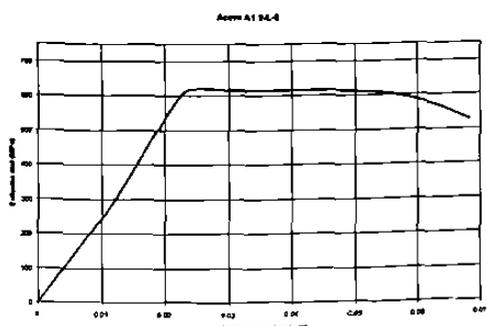
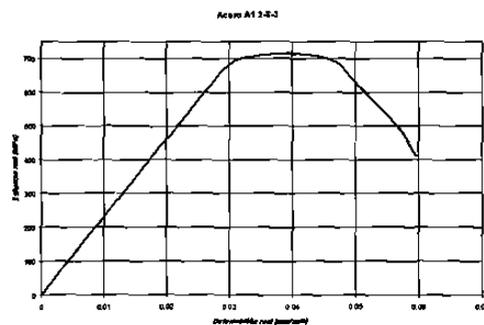
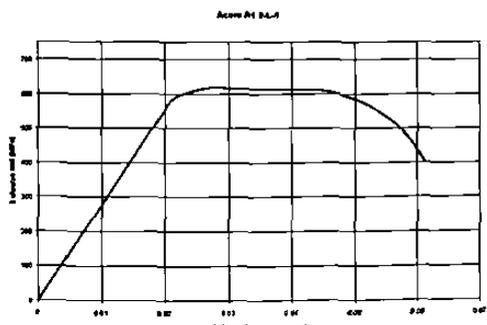
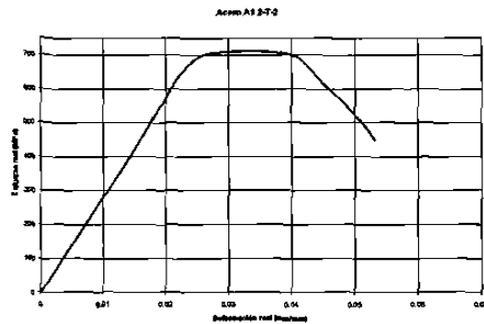
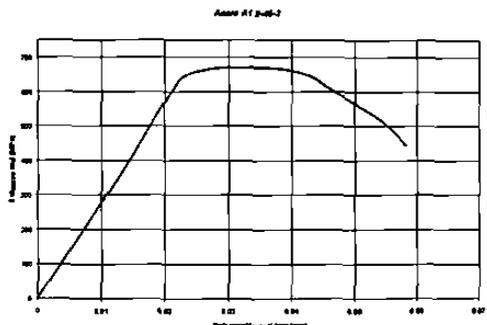
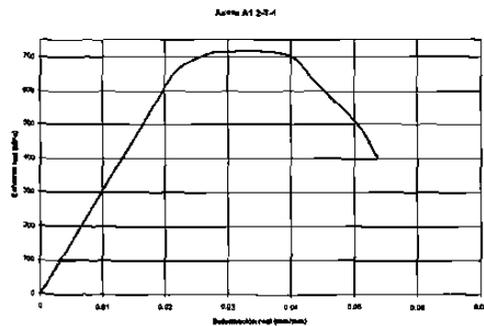
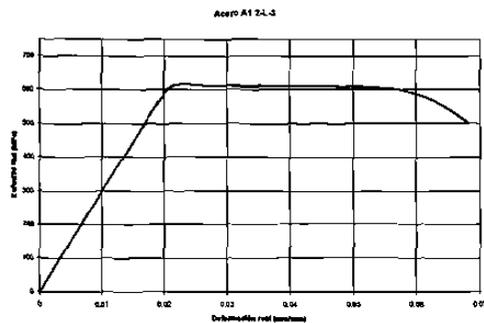
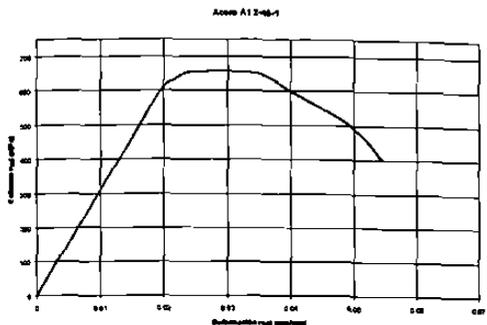


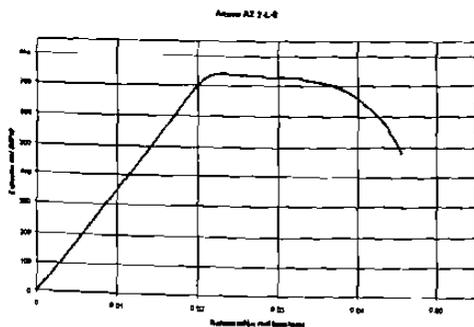
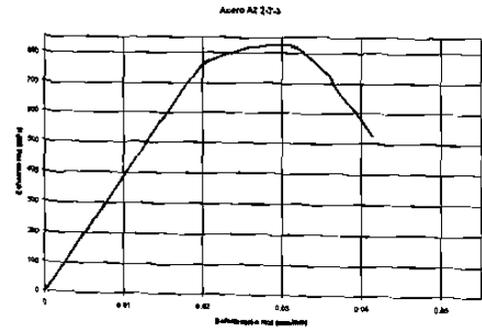
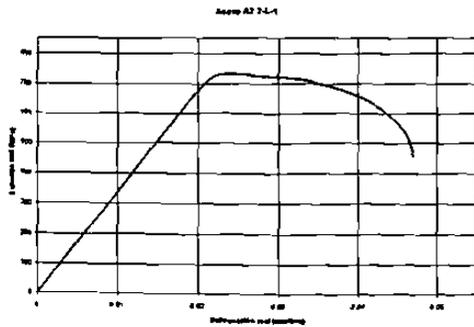
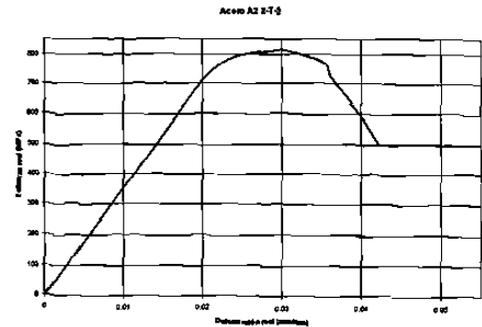
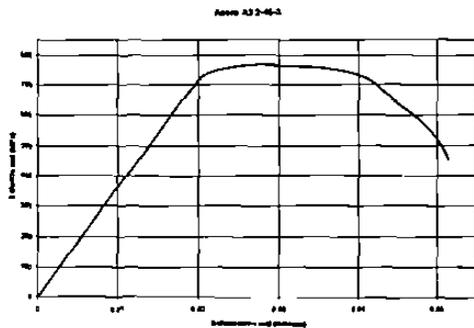
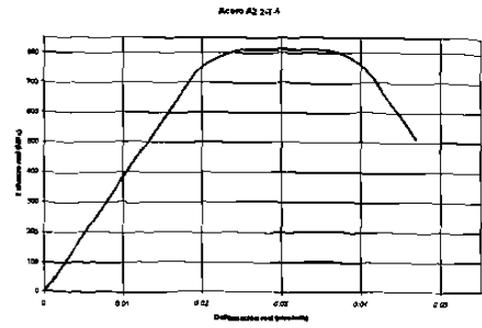
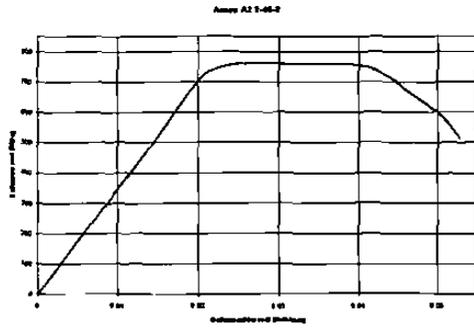
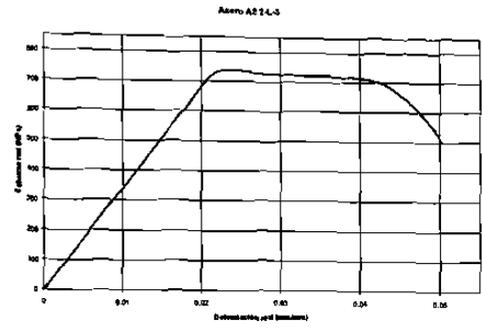
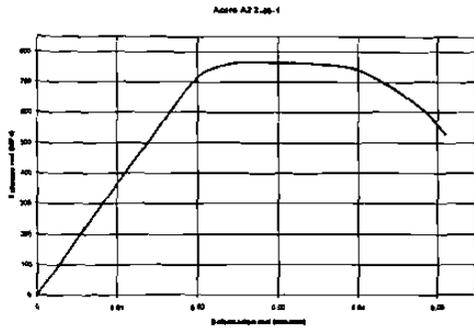
Acero A3 1-4-2

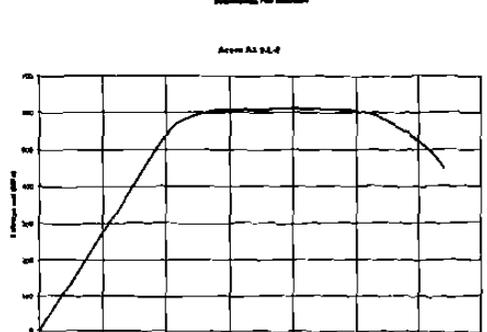
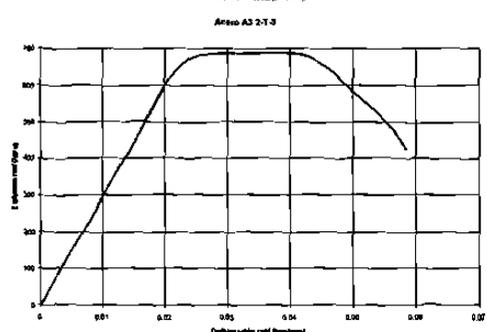
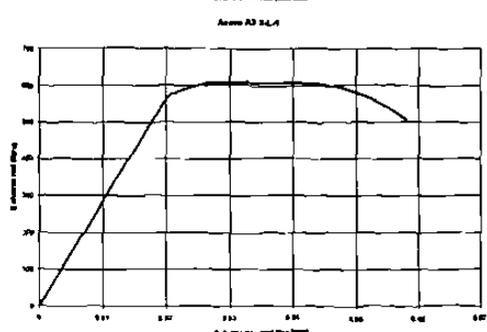
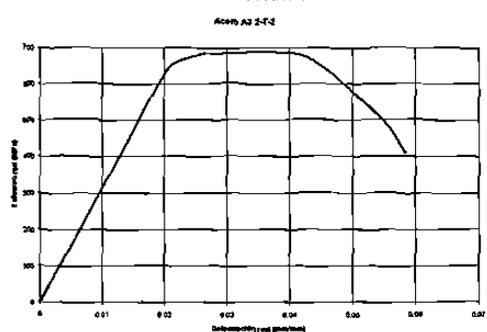
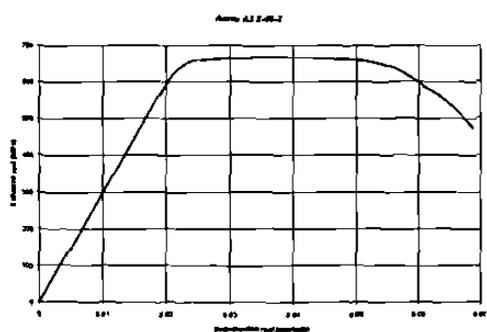
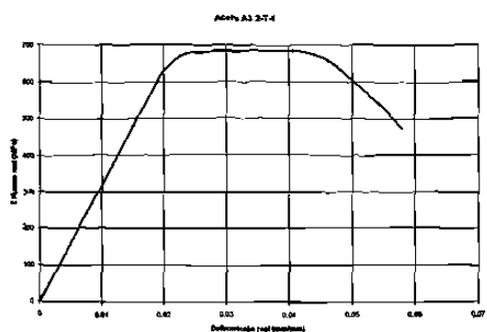
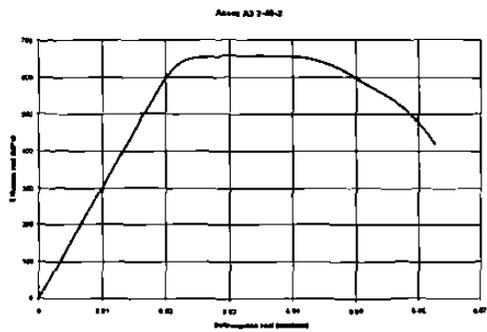
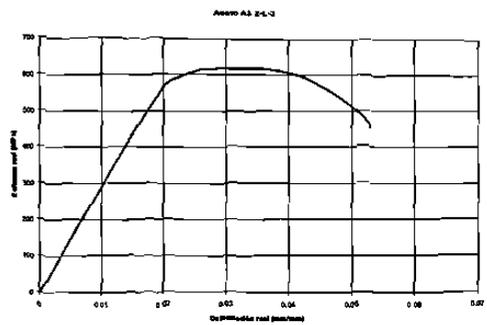
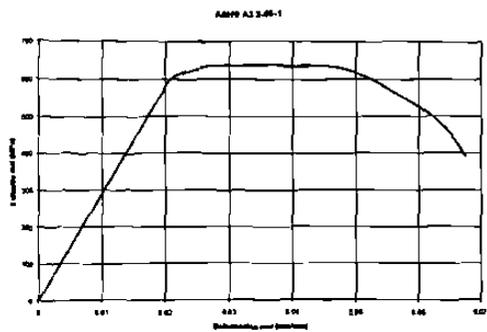


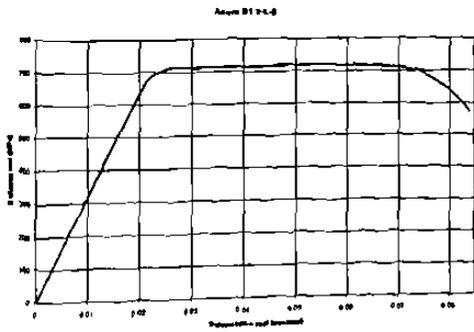
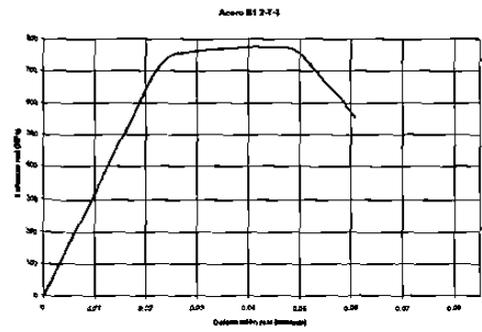
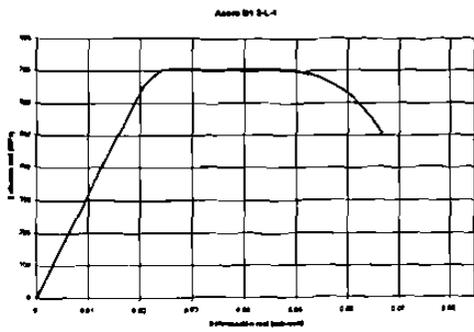
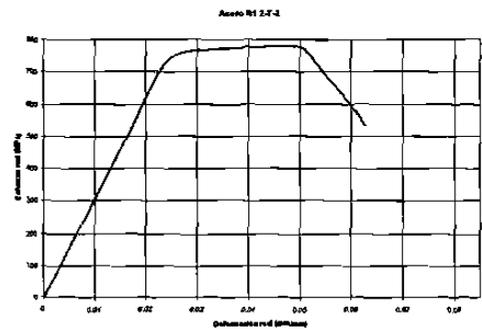
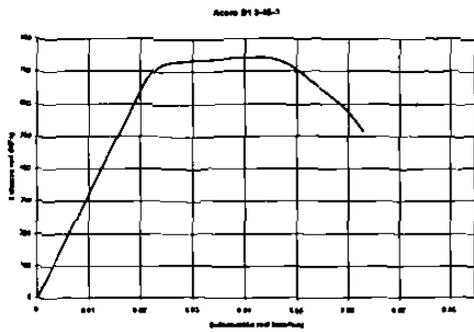
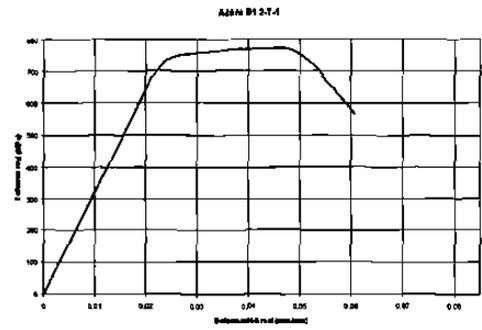
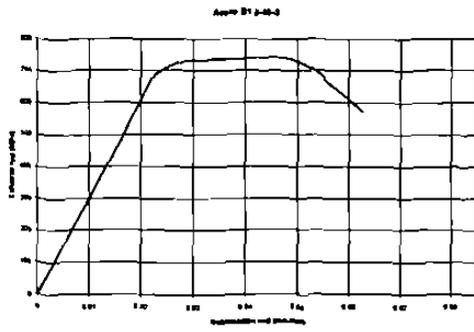
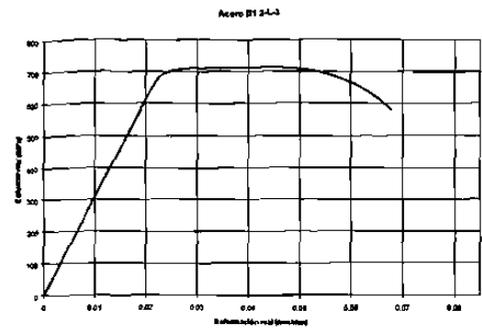
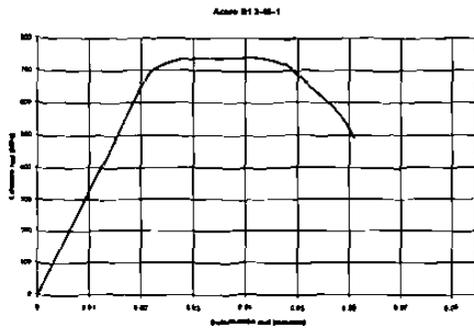


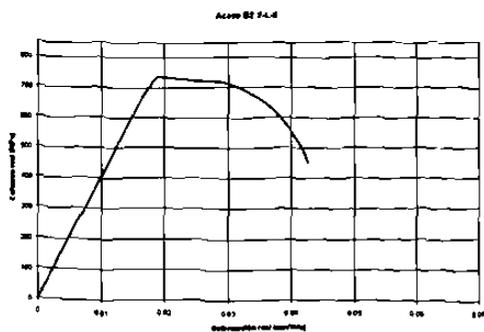
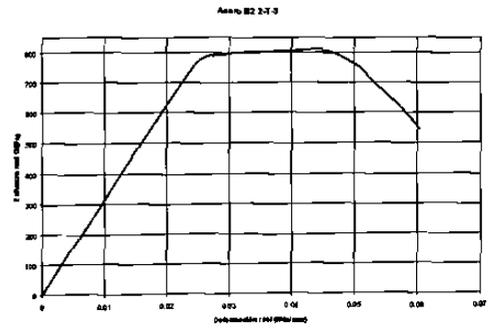
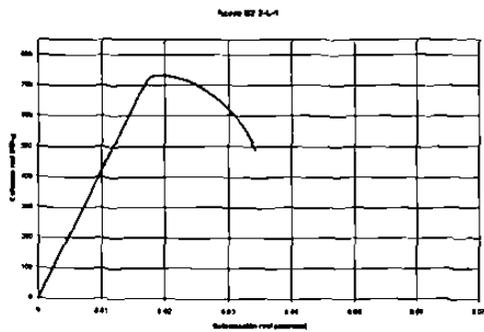
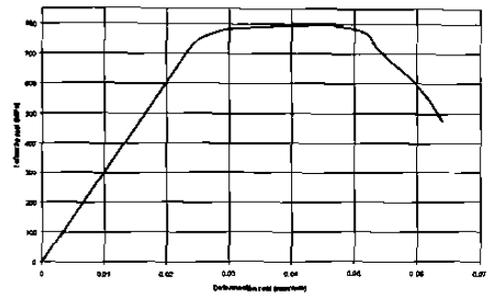
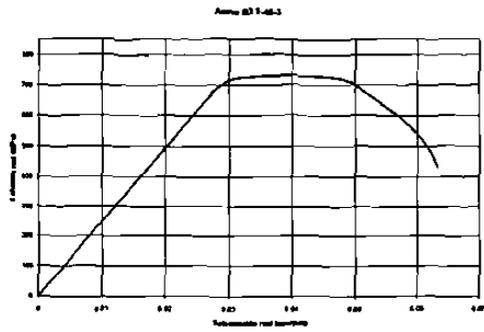
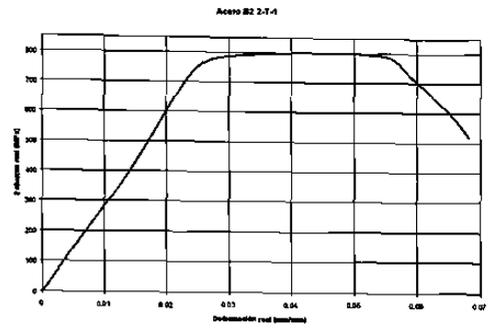
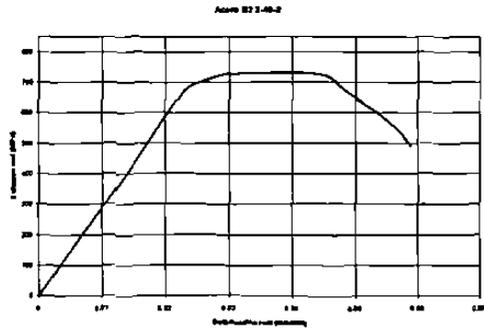
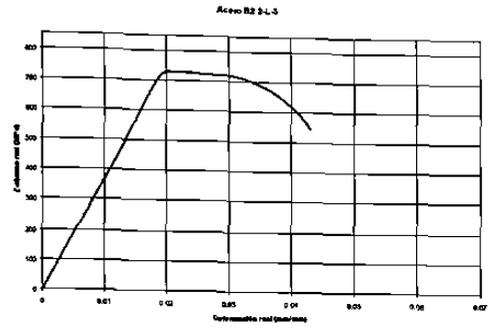
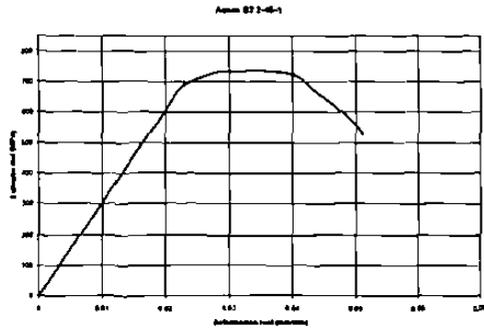


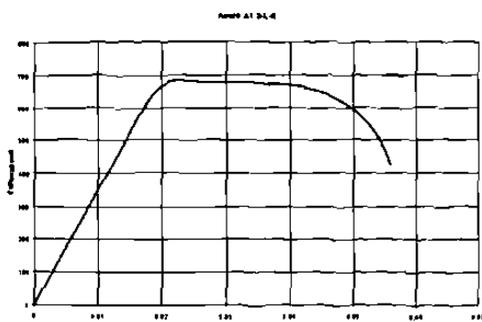
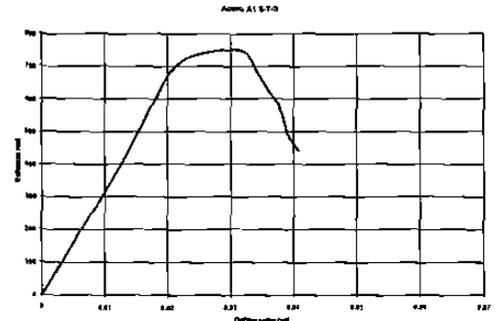
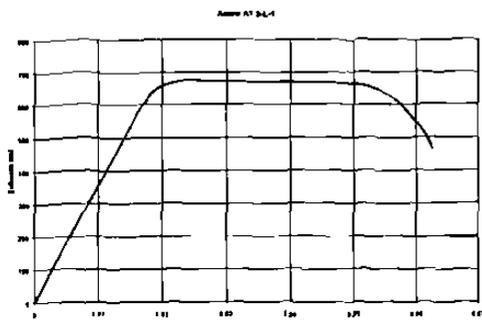
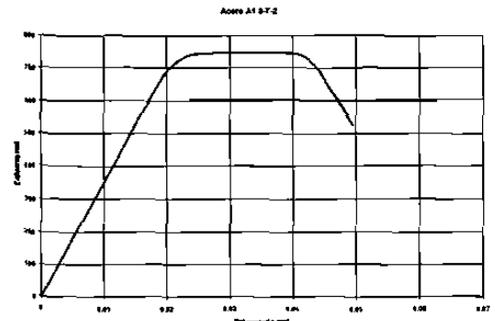
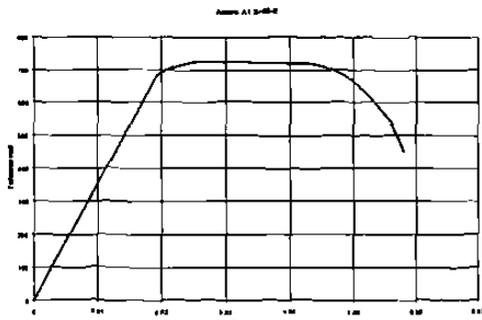
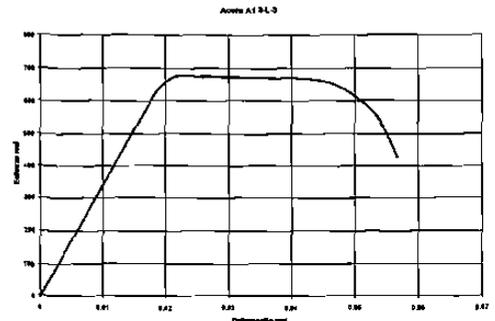
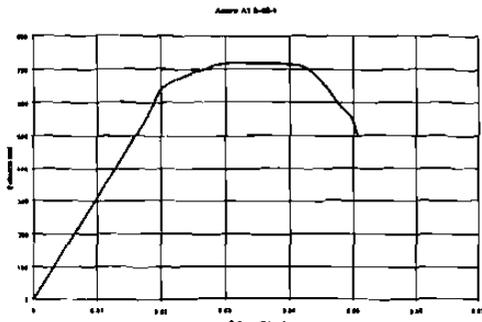


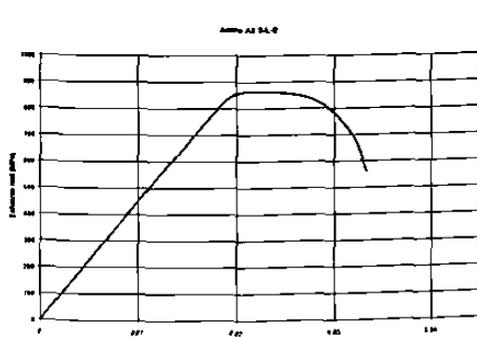
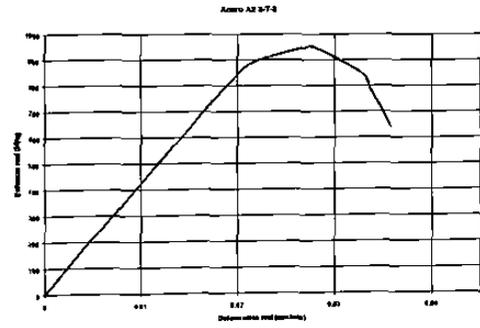
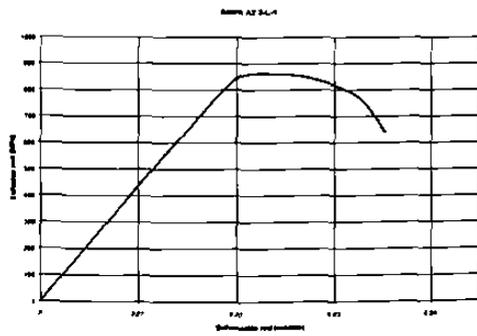
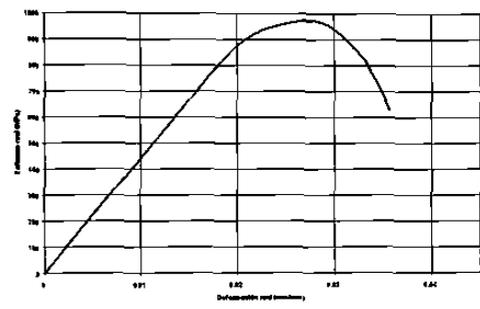
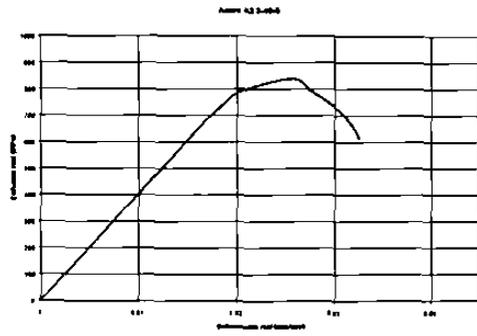
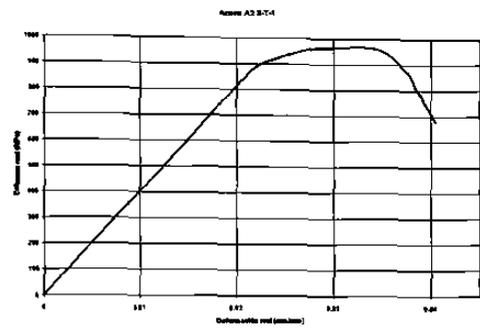
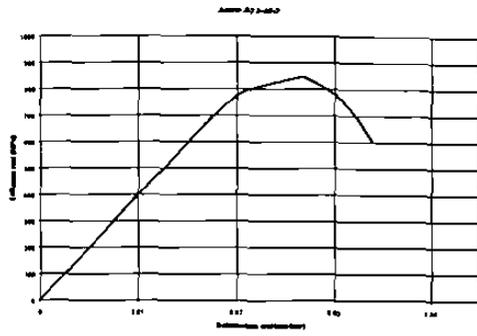
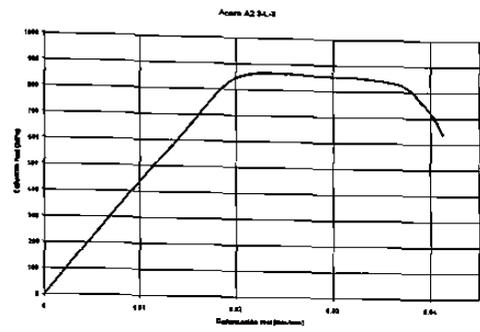
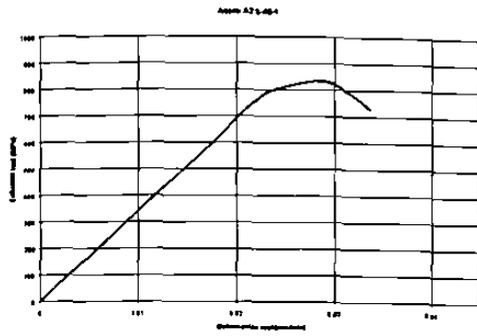


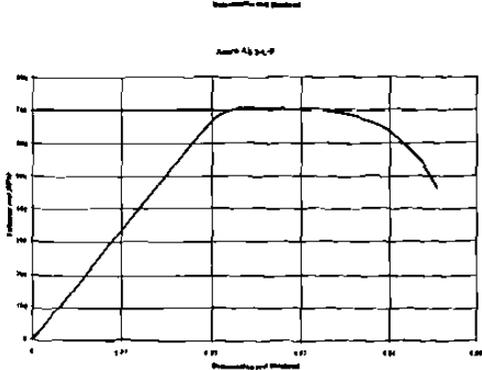
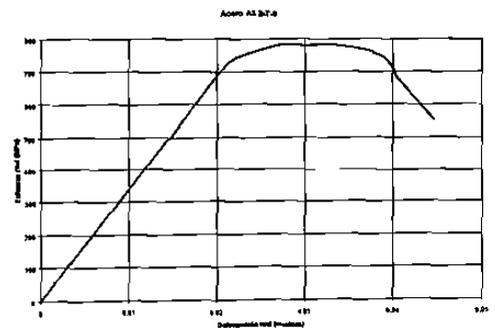
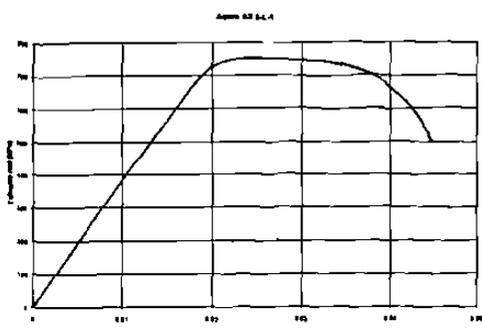
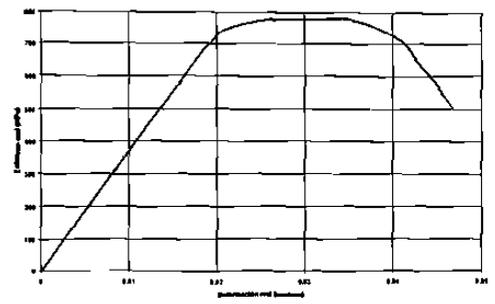
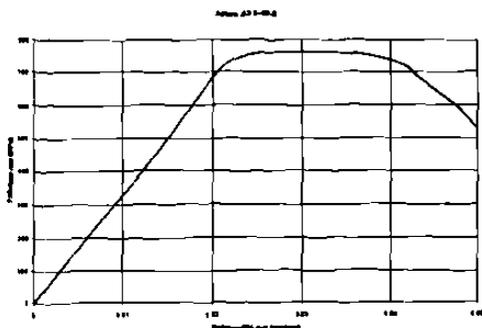
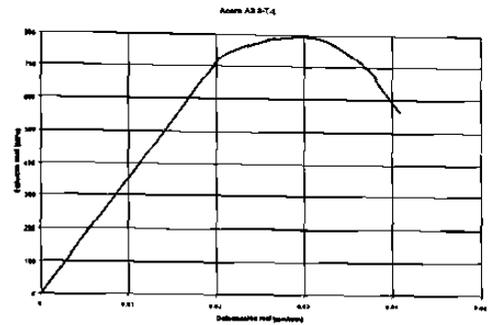
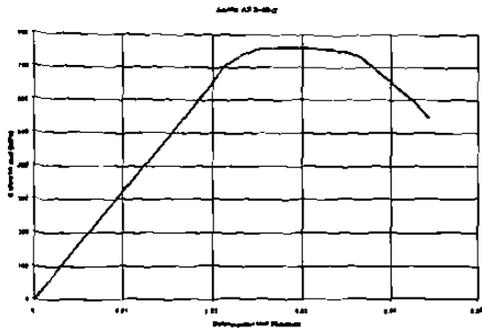
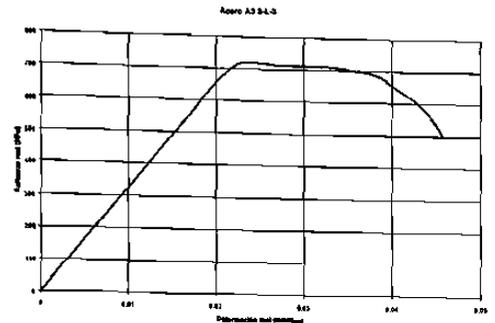
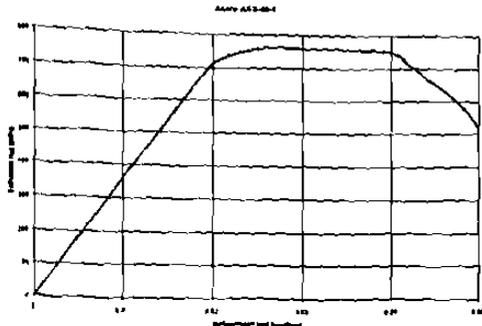


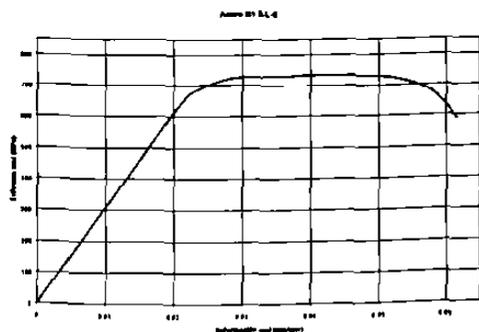
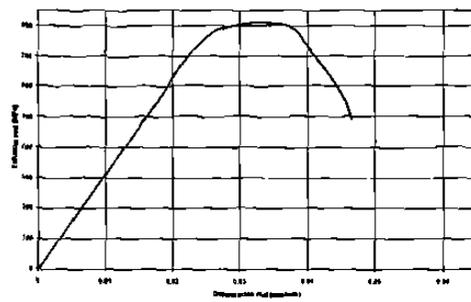
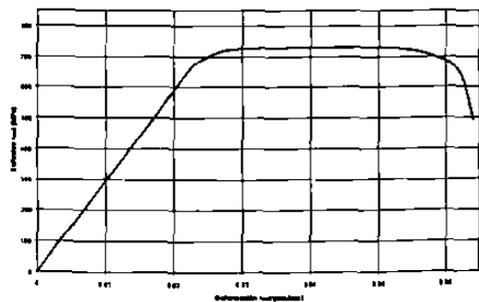
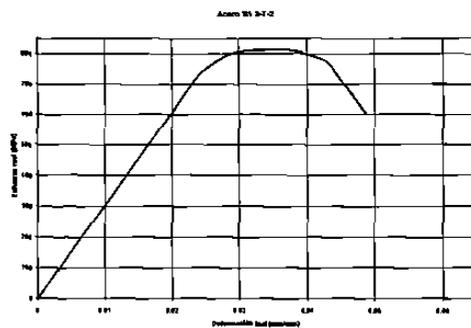
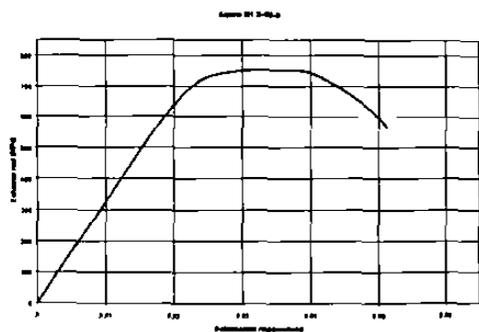
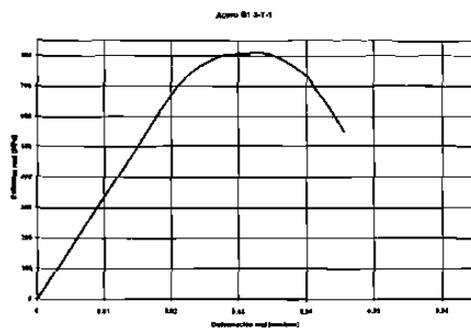
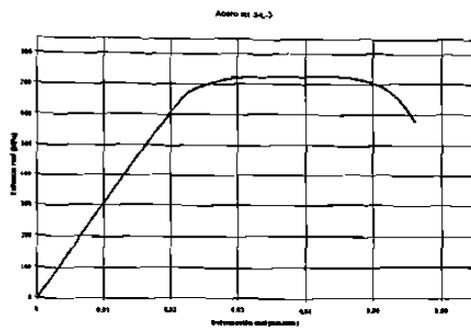
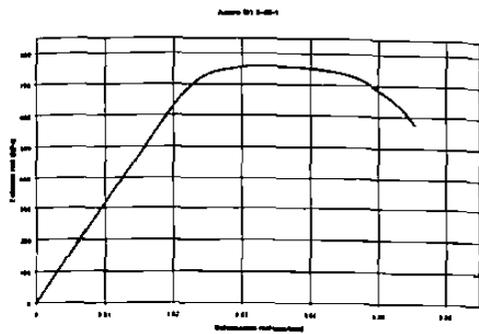


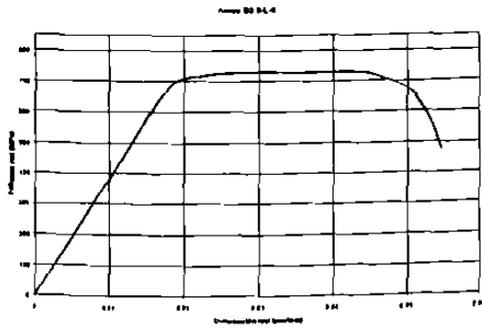
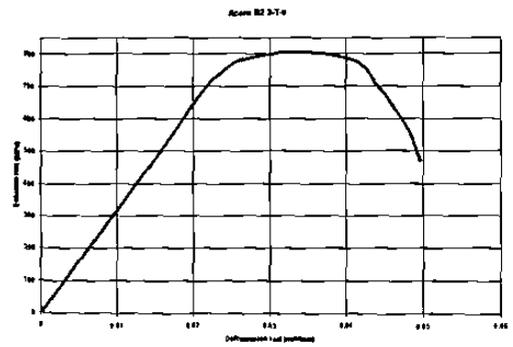
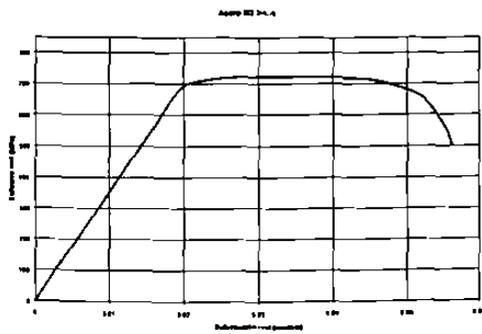
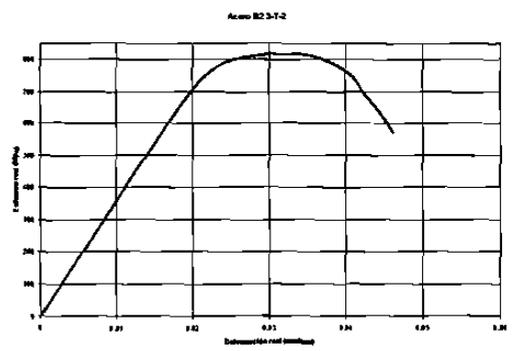
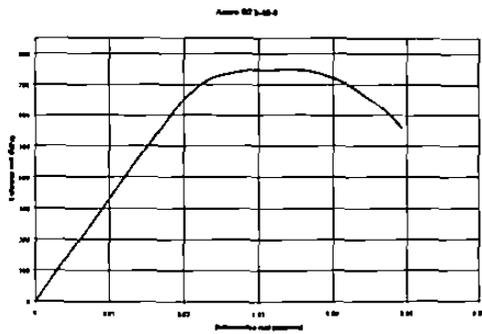
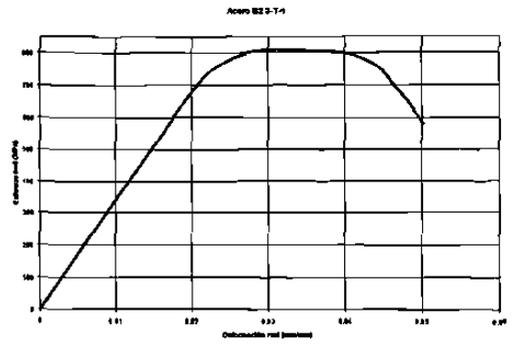
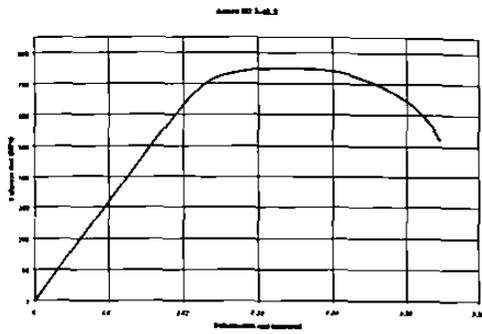
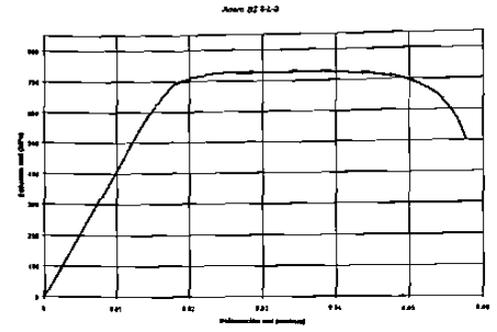
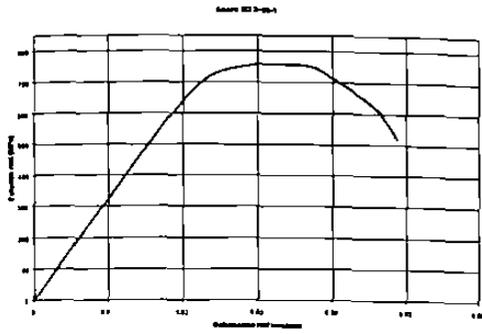


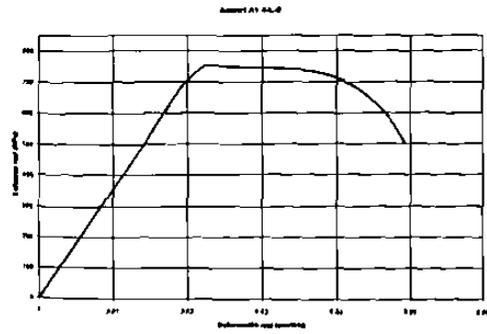
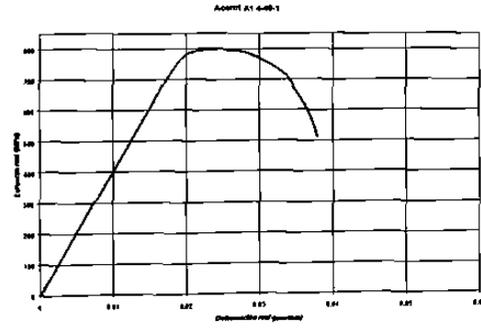
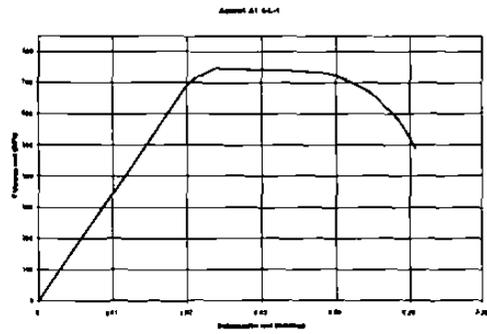
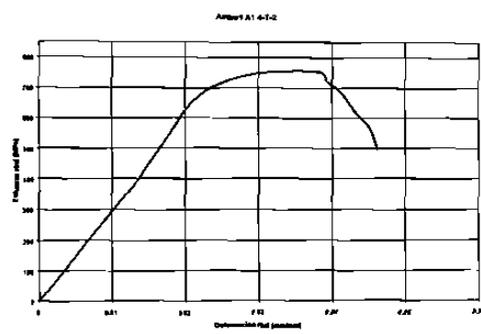
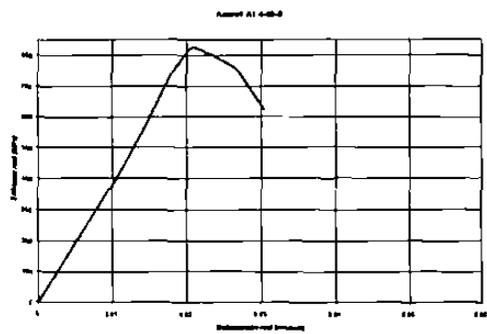
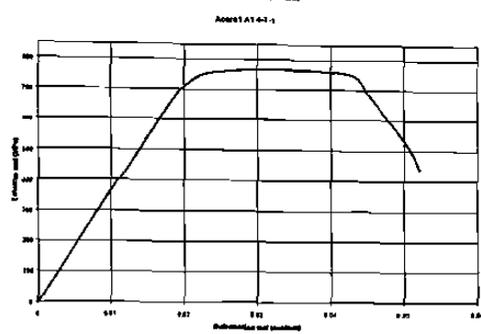
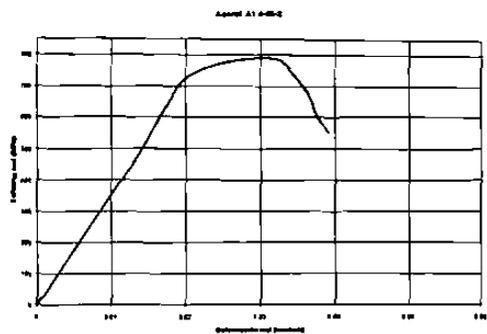
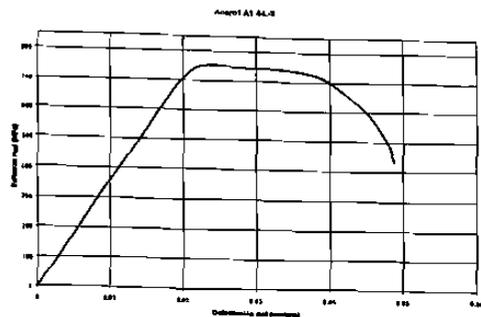
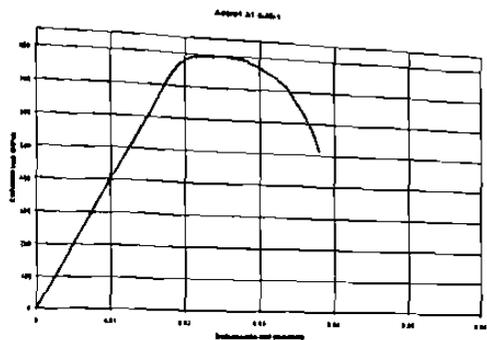


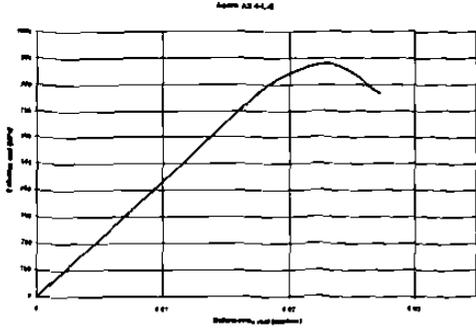
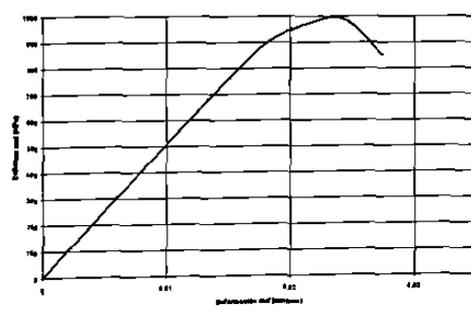
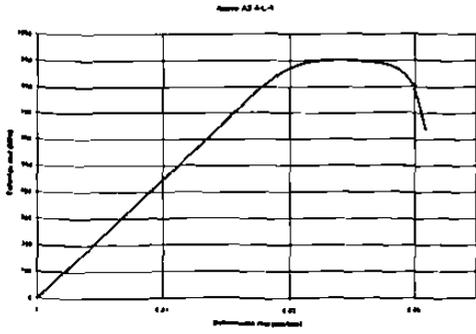
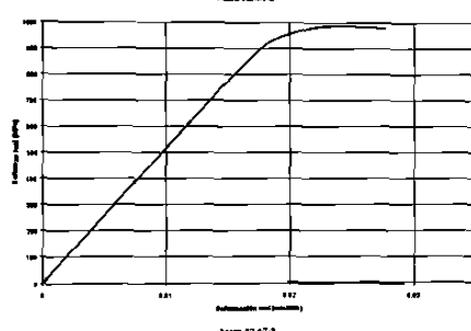
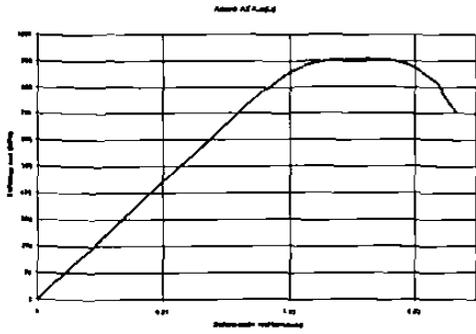
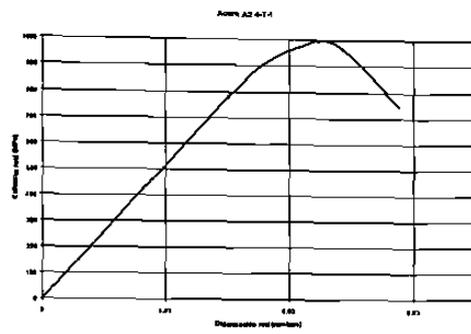
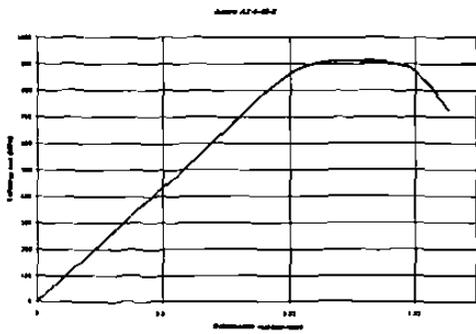
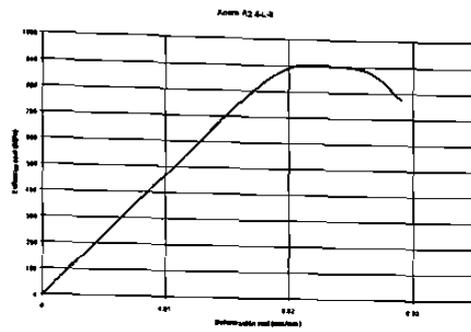
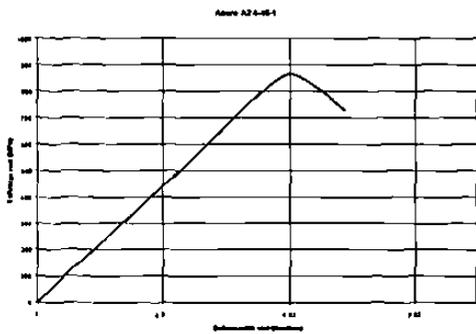


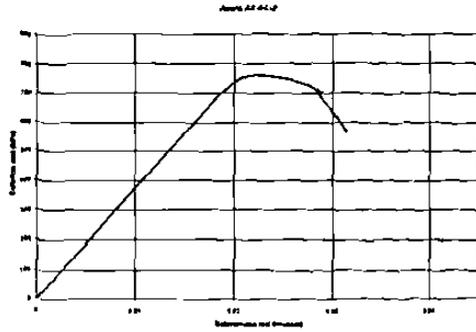
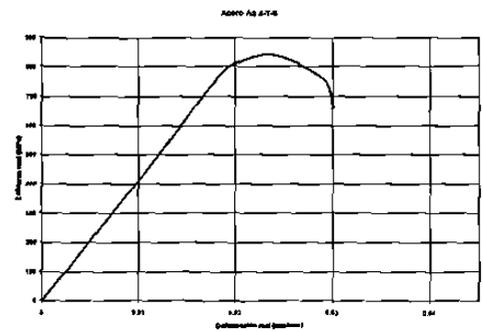
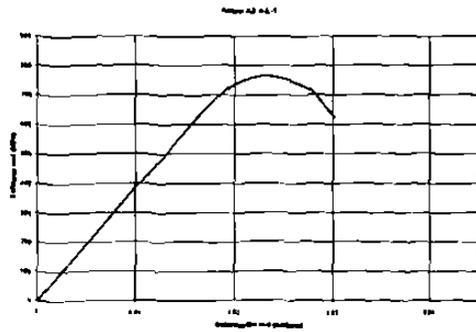
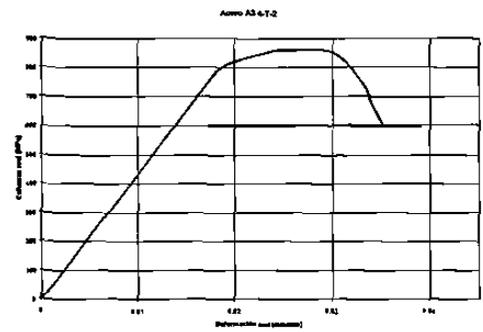
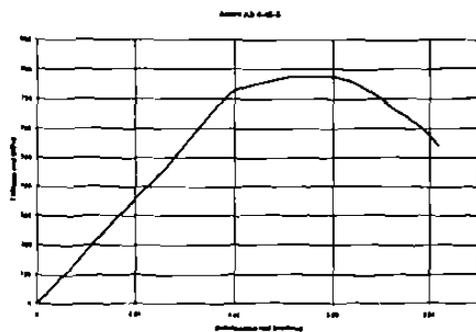
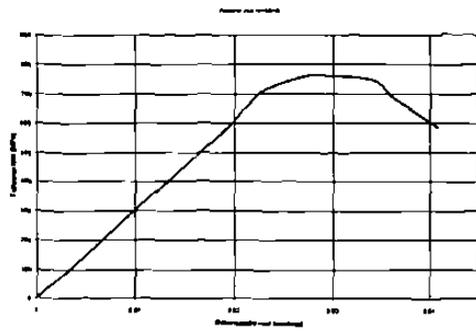
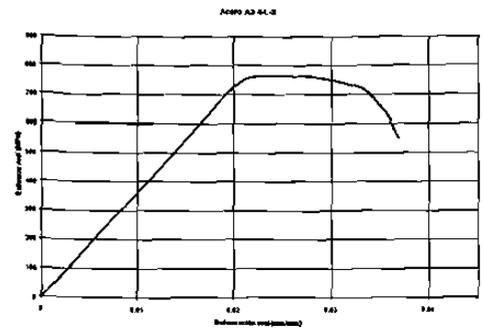
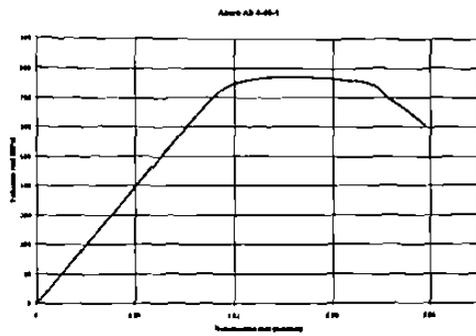


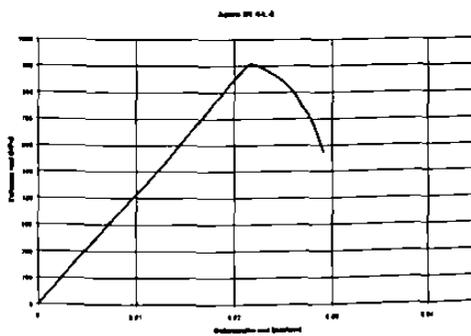
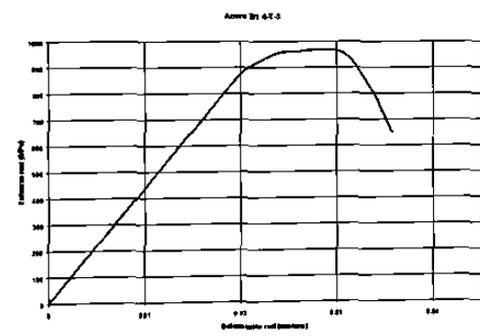
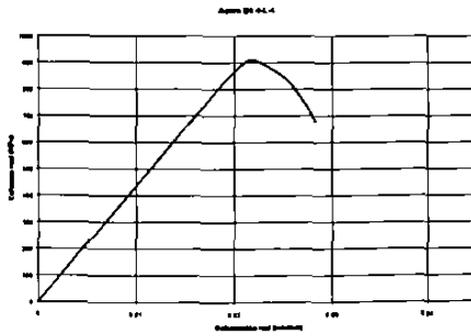
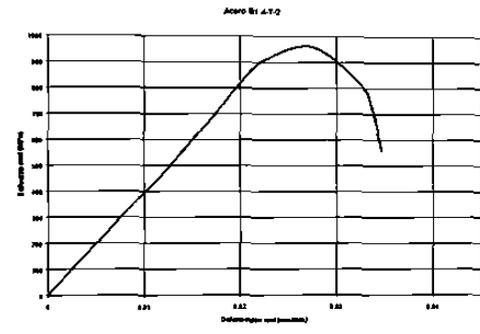
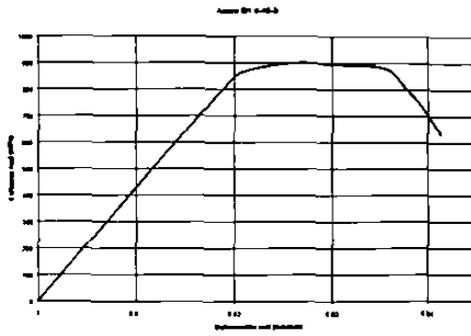
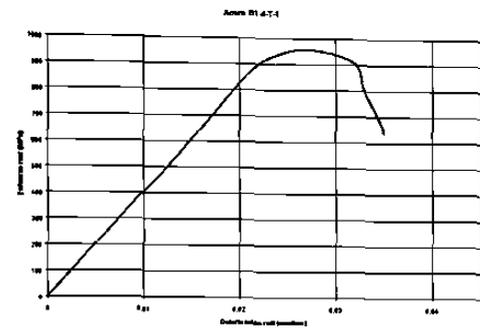
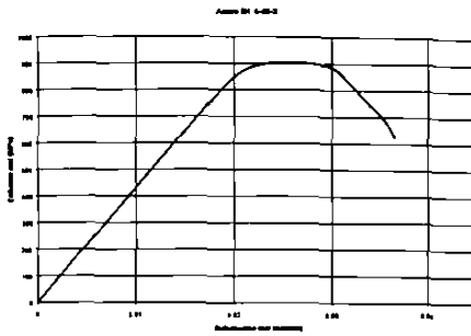
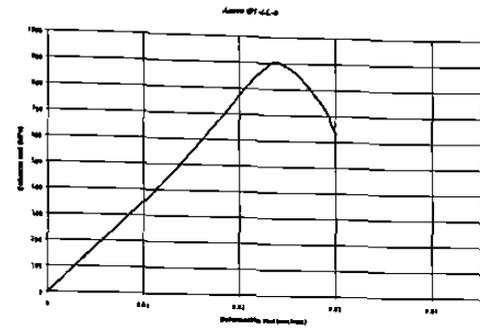
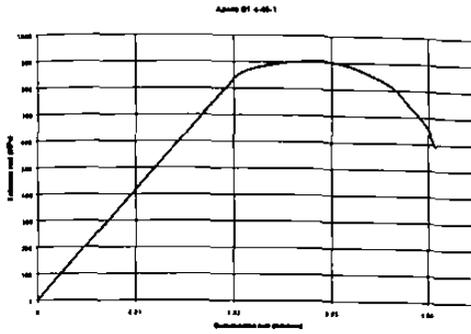


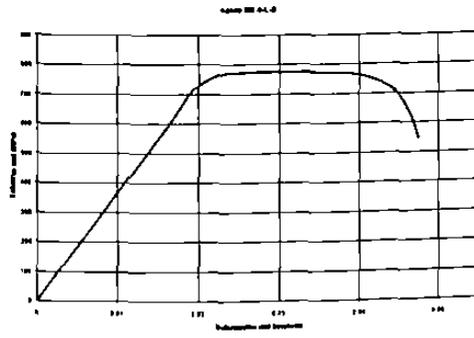
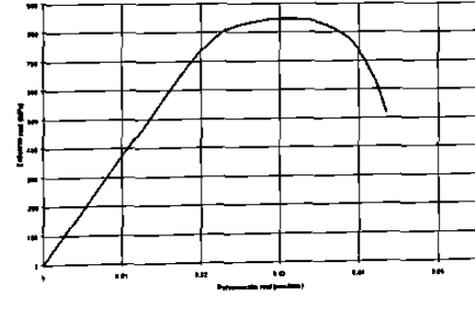
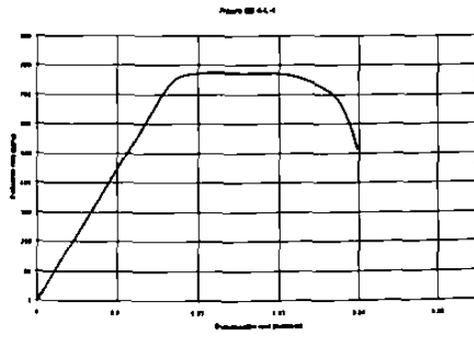
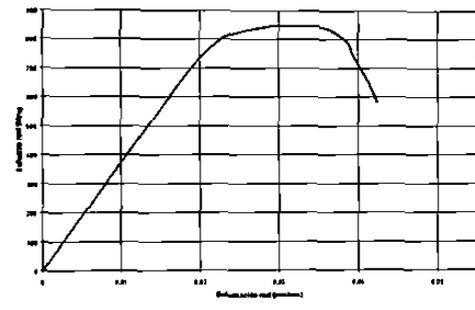
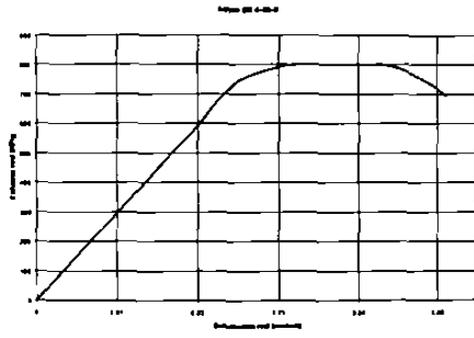
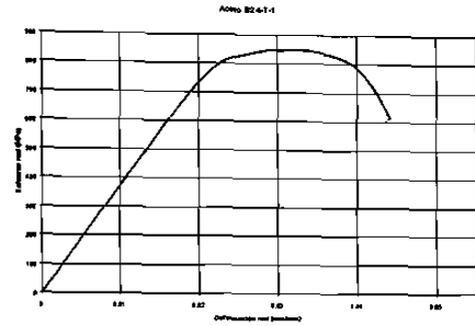
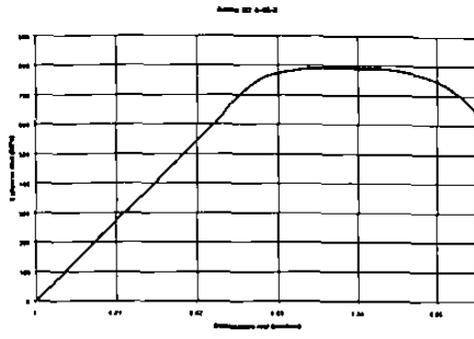
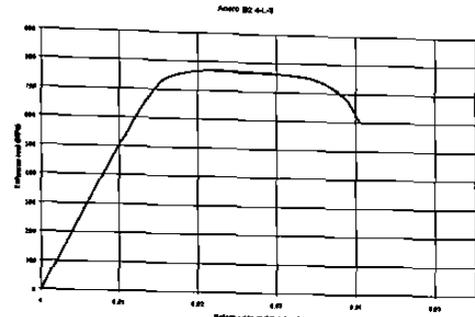
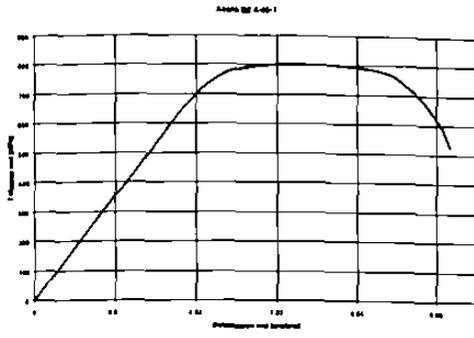


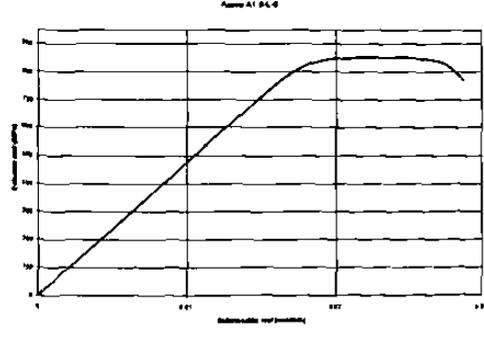
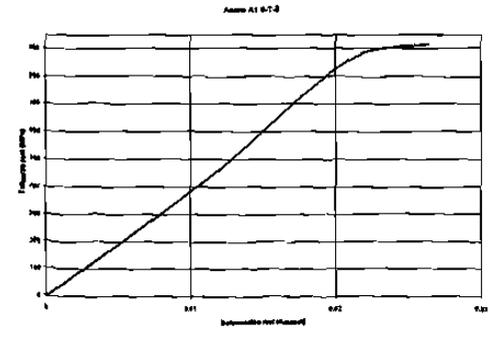
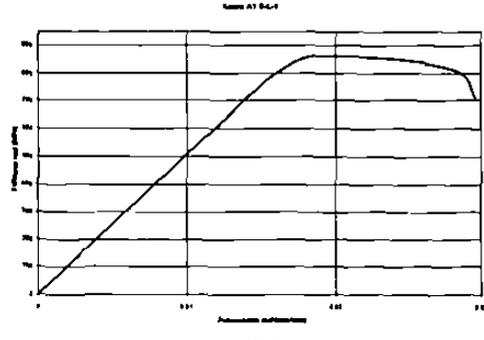
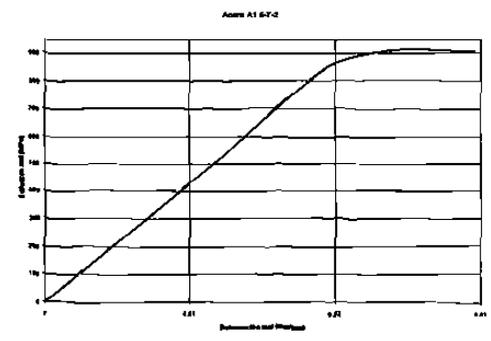
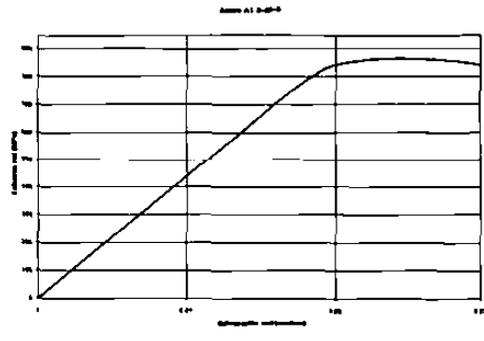
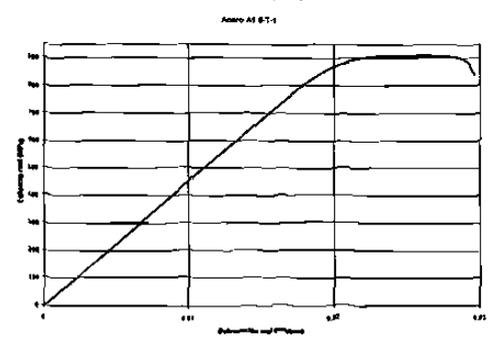
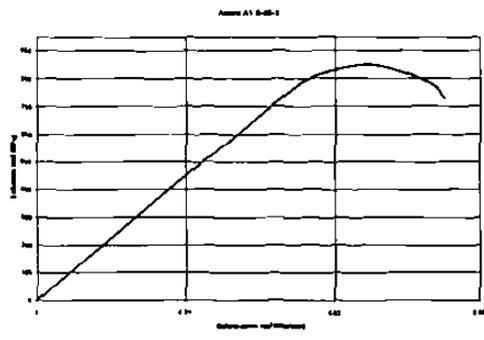
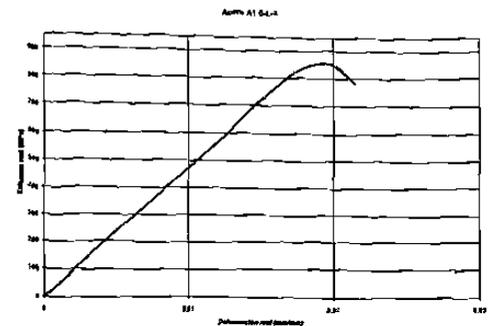
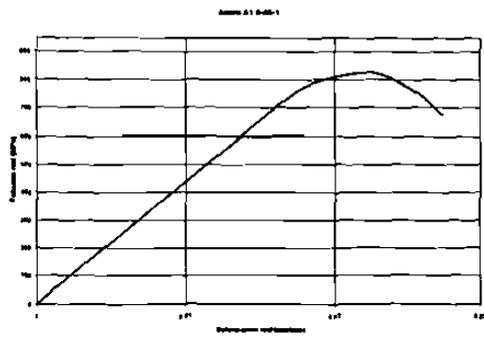


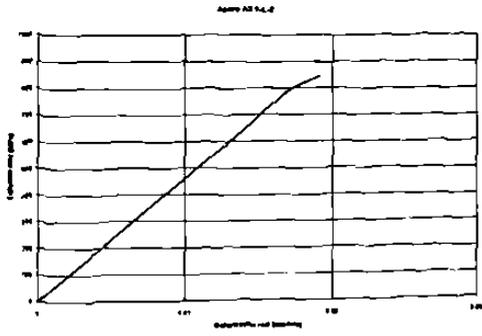
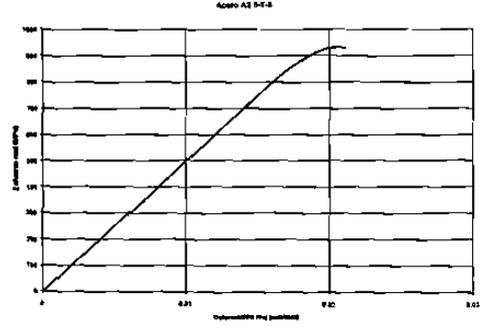
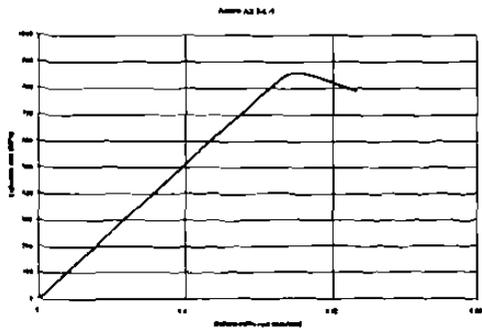
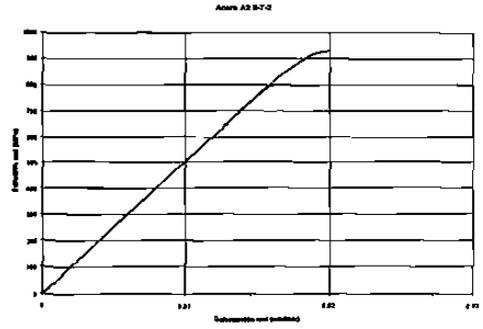
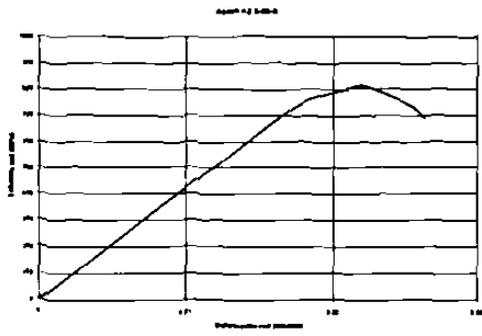
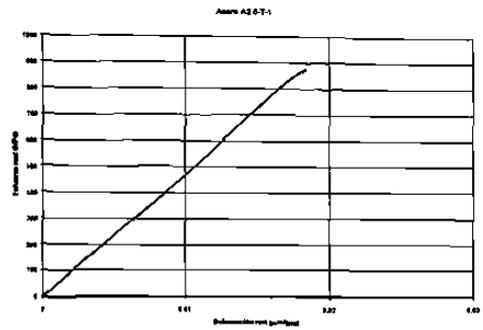
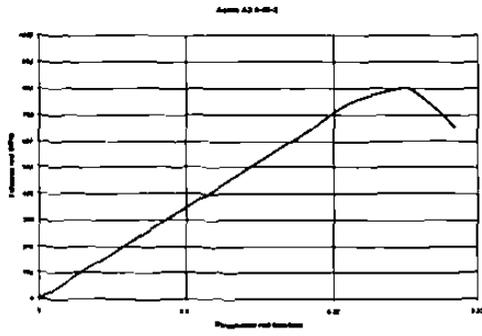
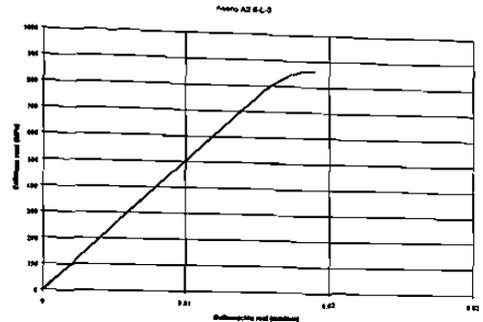
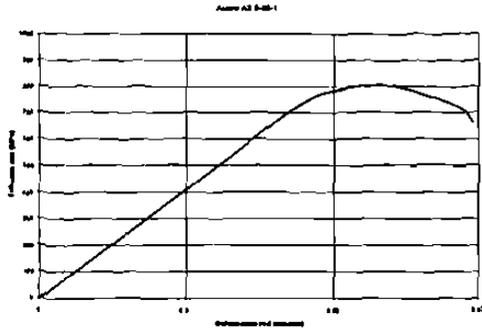


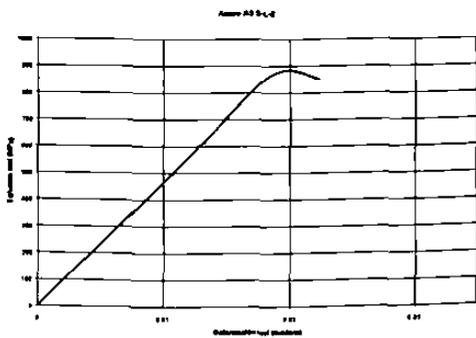
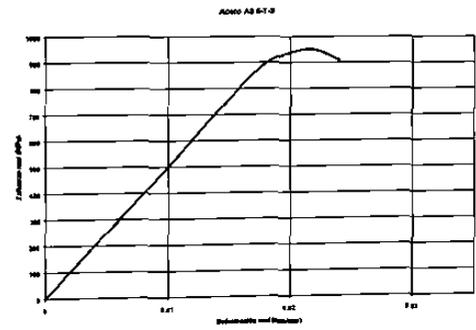
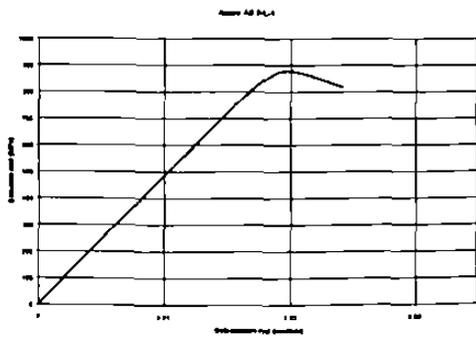
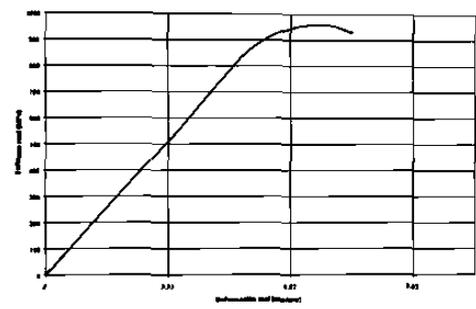
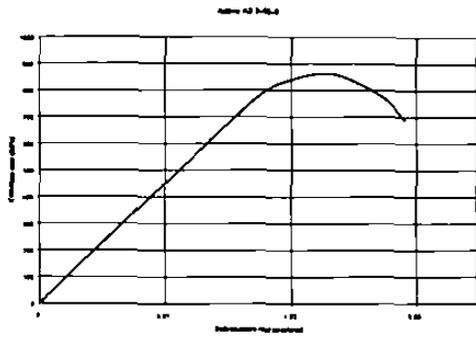
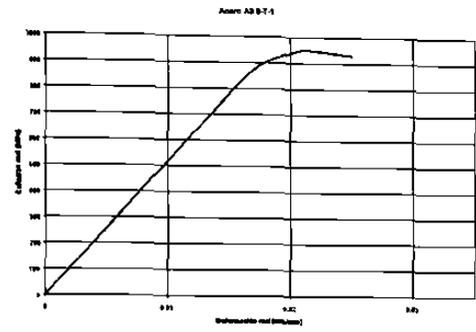
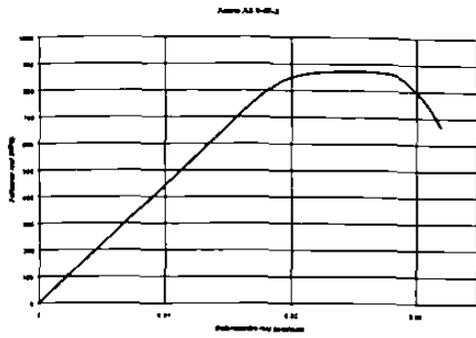
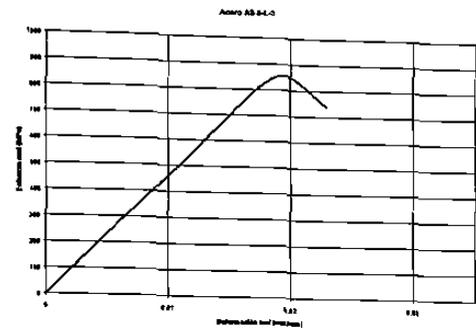
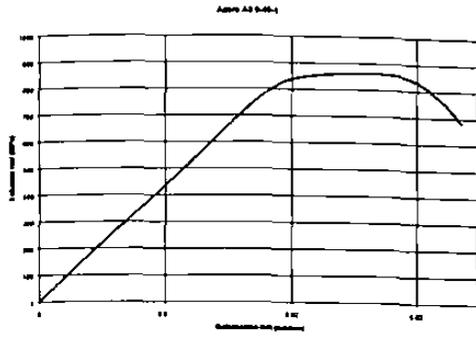


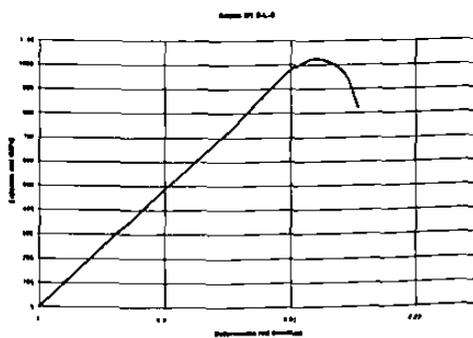
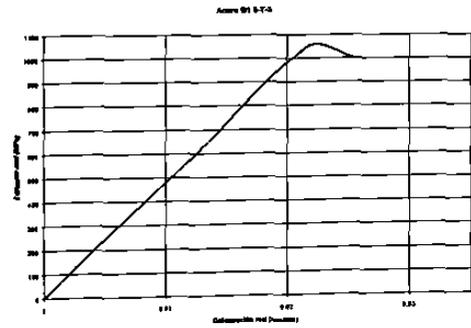
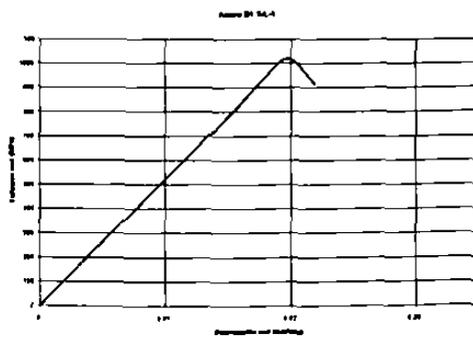
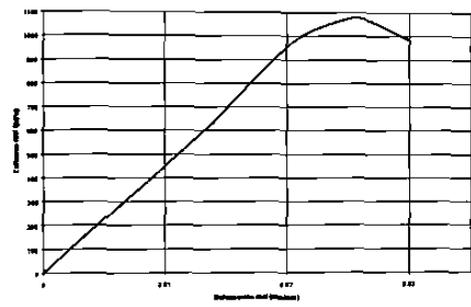
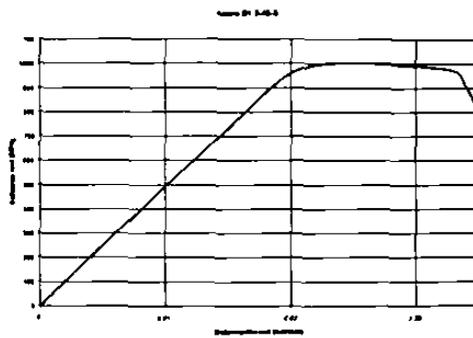
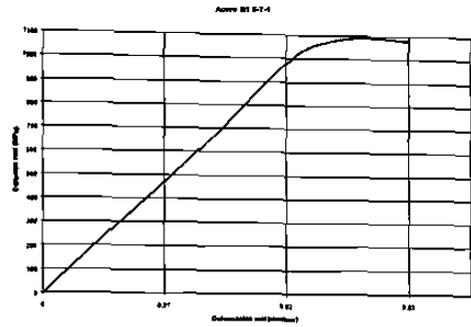
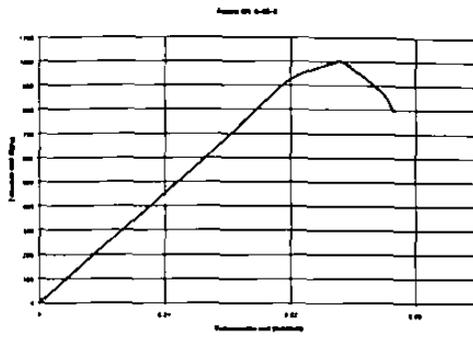
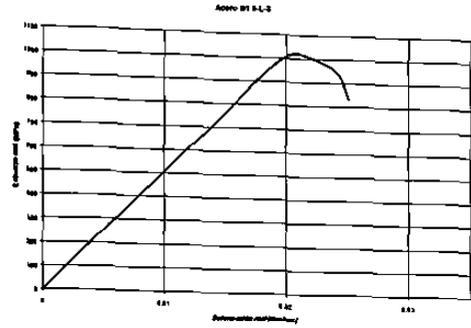
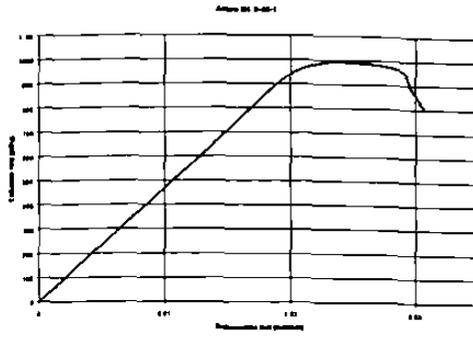


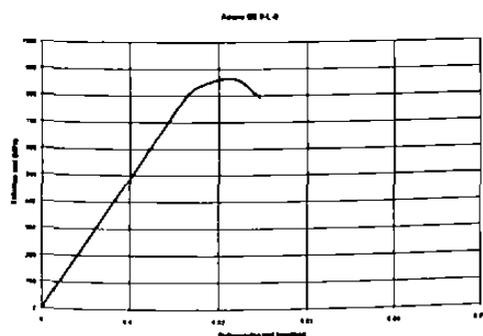
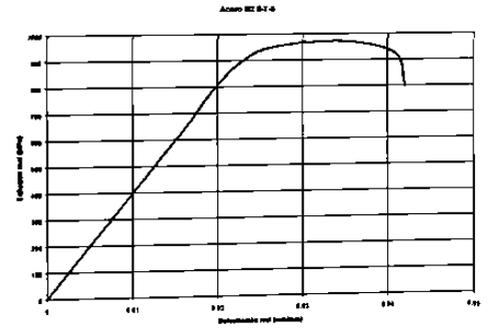
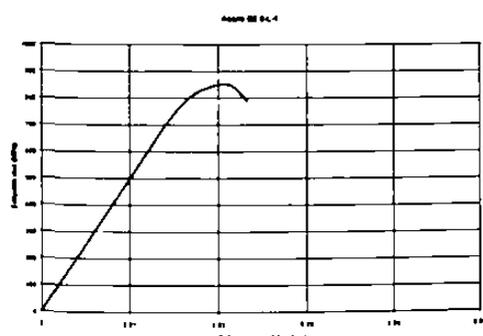
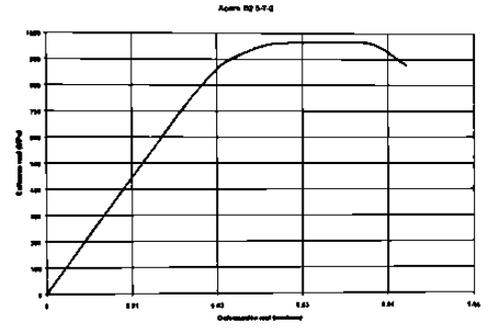
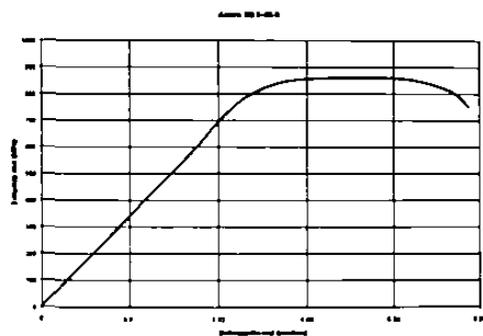
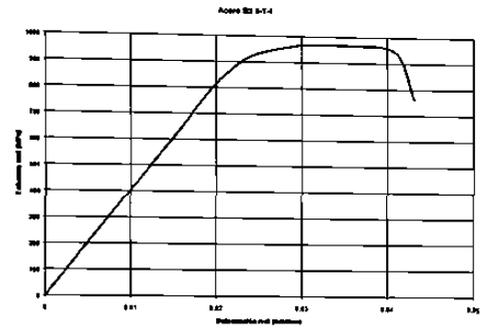
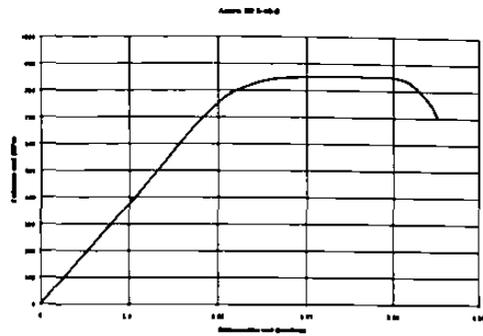
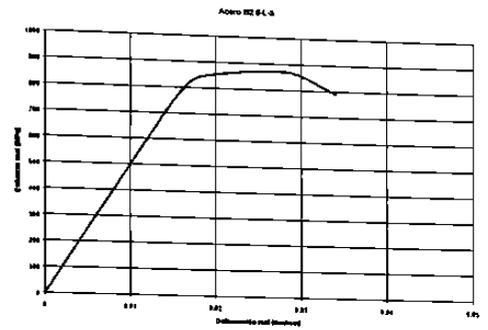
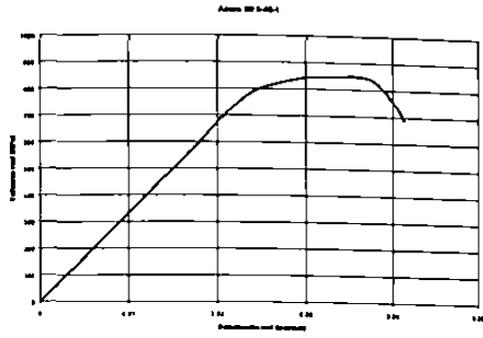


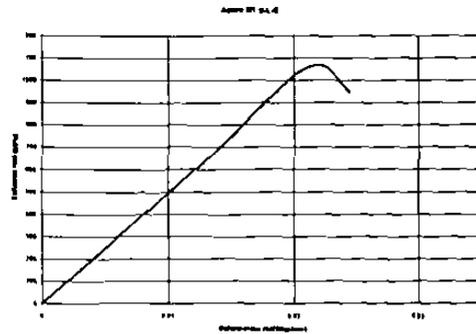
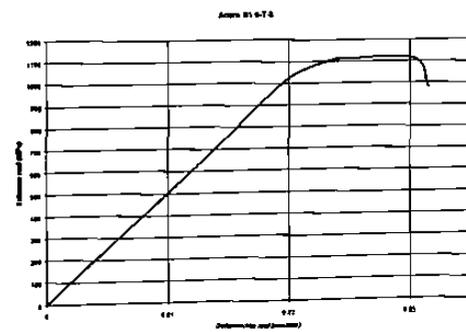
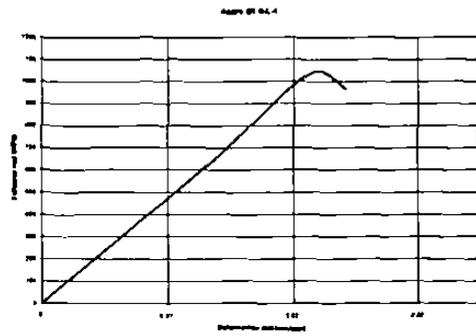
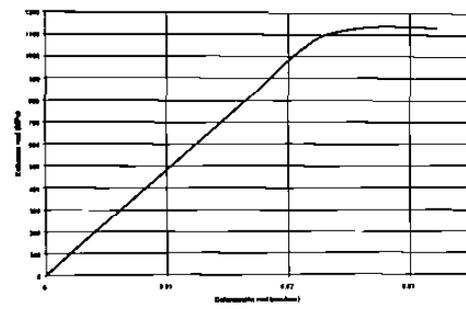
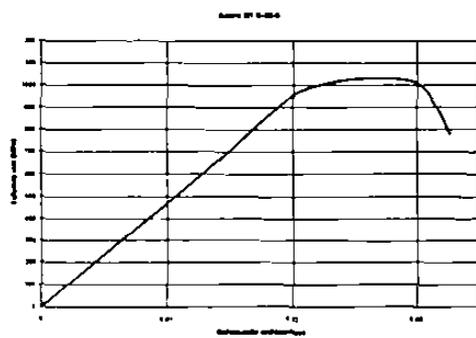
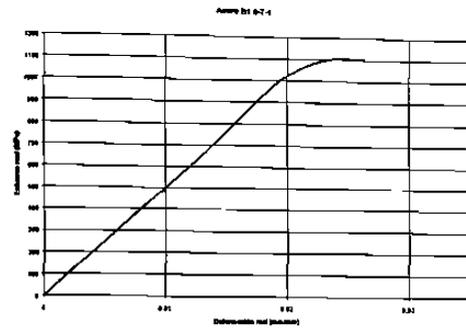
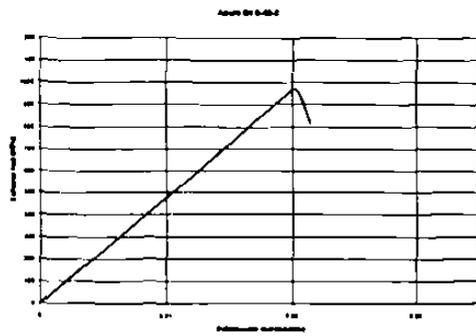
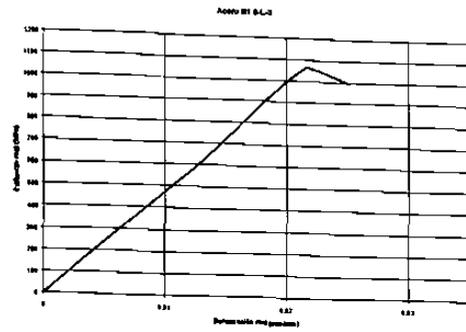
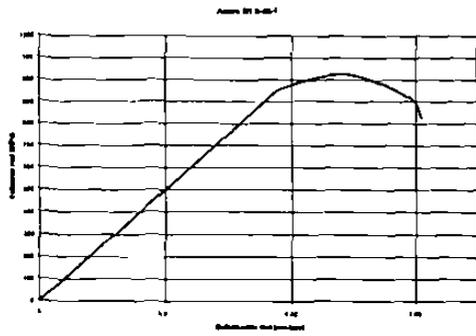


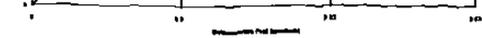
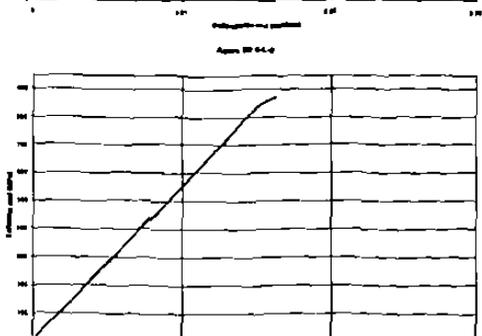
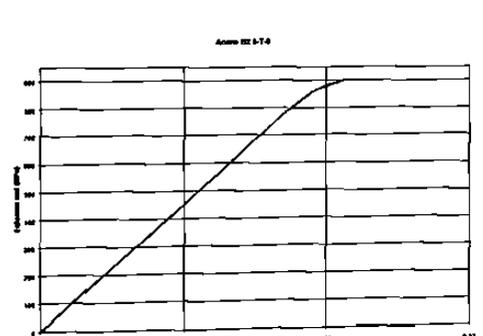
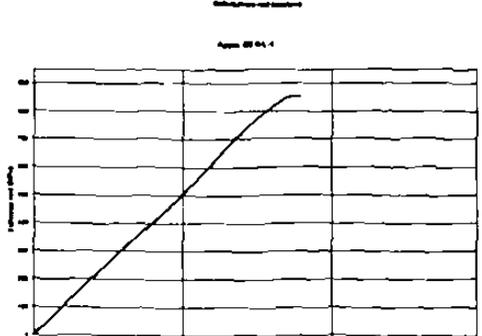
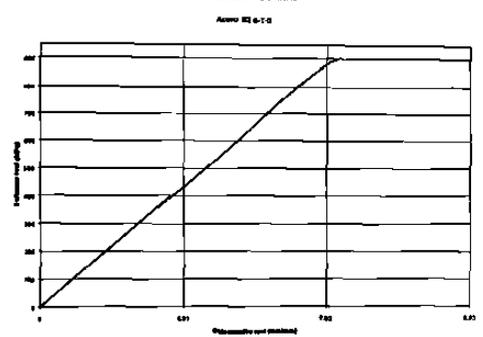
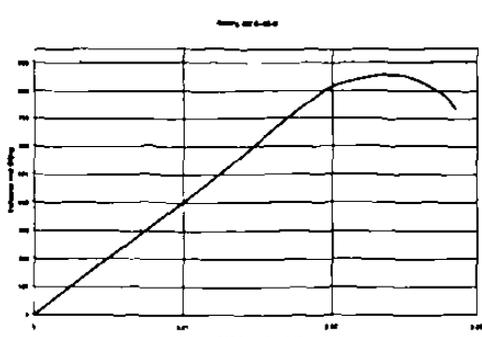
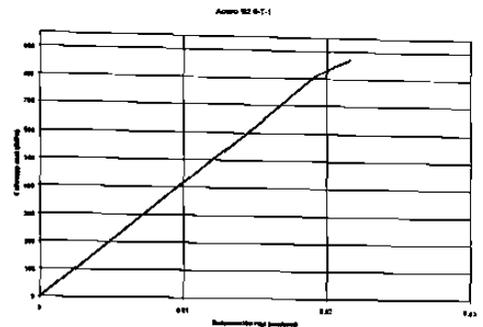
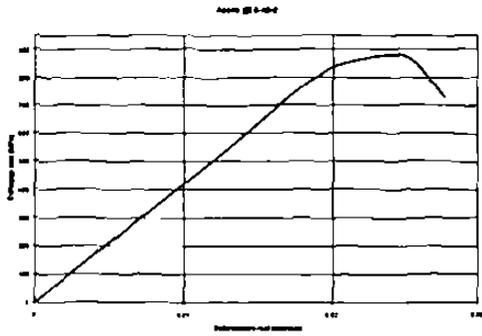
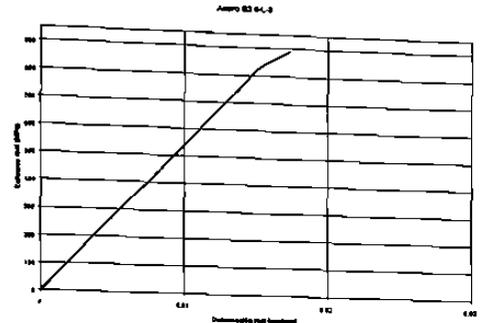
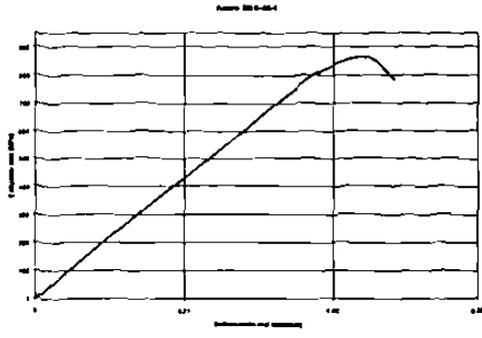












Apéndice C

Datos importantes de las bandas

Acero	Pase	Dirección	n	k(Mpa)	σ (fluencia)MPa	σ (Maximo)Mpa
A1	Banda	45°	0.2275	619	291	401
A1	Banda	45°	0.2170	598	285	394
A1	Banda	45°	0.2340	625	284	399
A1	Banda	Longitudinal	0.2154	603	292	401
A1	Banda	Longitudinal	0.2189	603	289	399
A1	Banda	Longitudinal	0.2215	612	294	402
A1	Banda	Transversal	0.2502	679	302	419
A1	Banda	Transversal	0.2434	688	316	417
A1	Banda	Transversal	0.2763	723	308	411
A2	Banda	45°	0.2117	718	346	456
A2	Banda	45°	0.2037	704	354	458
A2	Banda	45°	0.2221	738	349	457
A2	Banda	Longitudinal	0.2273	790	370	441
A2	Banda	Longitudinal	0.2516	740	331	458
A2	Banda	Longitudinal	0.2399	715	331	463
A2	Banda	Transversal	0.1988	679	379	468
A2	Banda	Transversal	0.2065	686	370	465
A2	Banda	Transversal	0.2281	718	372	468
A3	Banda	45°	0.2672	751	334	453
A3	Banda	45°	0.2642	722	318	450
A3	Banda	45°	0.2552	738	330	470
A3	Banda	Longitudinal	0.2646	735	322	460
A3	Banda	Longitudinal	0.2604	725	326	461
A3	Banda	Longitudinal	0.2458	707	340	463
A3	Banda	Transversal	0.2263	700	399	469
A3	Banda	Transversal	0.2331	703	402	464
A3	Banda	Transversal	0.2239	693	412	470
B1	Banda	45°	0.2142	808	413	540
B1	Banda	45°	0.2301	842	424	537
B1	Banda	45°	0.2157	815	439	533
B1	Banda	Longitudinal	0.2364	850	426	544
B1	Banda	Longitudinal	0.2302	830	427	538
B1	Banda	Longitudinal	0.2296	849	426	554
B1	Banda	Transversal	0.2252	832	424	543
B1	Banda	Transversal	0.2243	823	434	540
B1	Banda	Transversal	0.2329	842	437	543
B2	Banda	45°	0.2285	811	438	535
B2	Banda	45°	0.2295	801	424	535
B2	Banda	45°	0.2376	818	439	533
B2	Banda	Longitudinal	0.2107	823	426	541
B2	Banda	Longitudinal	0.2146	778	425	538
B2	Banda	Longitudinal	0.1915	785	426	554
B2	Banda	Transversal	0.2153	822	428	545
B2	Banda	Transversal	0.1879	744	434	540
B2	Banda	Transversal	0.2298	826	437	543

Apéndice D

Puntos de fluencias

PASES	DIRECCIÓN	ACEROS A			ACEROS B	
		VALOR (MPA)				
		6076	6076	6076	7061	7061
		1	2	3	1	2
1	Longitudinal	526	600	515	673	570
1	Longitudinal	522	600	526	673	576
1	Longitudinal	529	600	526	659	582
2	Longitudinal	576	700	576	666	714
2	Longitudinal	582	700	576	673	700
2	Longitudinal	582	700	564	679	685
3	Longitudinal	627	830	700	673	678
3	Longitudinal	646	823	675	679	692
3	Longitudinal	640	830	670	673	657
4	Longitudinal	700	853	693	858	742
4	Longitudinal	700	830	714	849	721
4	Longitudinal	700	853	721	858	728
5	Longitudinal	777	800	841	981	783
5	Longitudinal	777	800	841	972	816
5	Longitudinal	792	800	833	954	810
6	Longitudinal	-----	-----	-----	970	800
6	Longitudinal	-----	-----	-----	970	830
6	Longitudinal	-----	-----	-----	970	823
1	45°	596	637	526	626	576
1	45°	593	637	536	679	594
1	45°	593	643	526	646	582
2	45°	606	726	605	686	678
2	45°	600	726	605	686	678
2	45°	629	726	617	679	692
3	45°	633	769	700	679	685
3	45°	673	769	700	673	685
3	45°	660	769	700	673	678
4	45°	726	830	721	849	728
4	45°	707	853	707	841	721
4	45°	746	853	721	849	721
5	45°	753	746	783	900	774
5	45°	792	738	800	900	774
5	45°	777	756	800	918	783
6	45°	-----	-----	-----	960	807
6	45°	-----	-----	-----	970	815
6	45°	-----	-----	-----	960	800
1	Transversal	607	637	578	666	635
1	Transversal	607	643	578	679	641
1	Transversal	607	656	568	666	635
2	Transversal	653	740	623	700	721
2	Transversal	647	740	647	700	742
2	Transversal	658	760	635	700	749
3	Transversal	686	876	731	733	742
3	Transversal	686	876	725	739	735
3	Transversal	673	869	731	739	735
4	Transversal	700	876	771	866	750
4	Transversal	646	900	785	891	750
4	Transversal	686	884	778	883	750
5	Transversal	815	838	866	972	850
5	Transversal	815	853	866	981	834
5	Transversal	815	853	858	972	850
6	Transversal	-----	-----	-----	1030	830
6	Transversal	-----	-----	-----	1050	838
6	Transversal	-----	-----	-----	1030	830

Apéndice E

Datos del molino

PARAMETRO	UNIDADES	ACEROS A			ACEROS B	
		VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
Acero		6076	6076	6076	7061	7061
Secuencia		1	2	3	1	2
Ancho de entrada	pulg*1000	39625	39625	39625	38000	38000
Números de pases real	_____	5	5	5	6	6
Cedula de rolado real pase 1	mils*10	580	580	580	560	560
Cedula de rolado real pase 2	mils*10	410	410	410	400	400
Cedula de rolado real pase 3	mils*10	300	300	300	290	290
Cedula de rolado real pase 4	mils*10	220	220	220	210	210
Cedula de rolado real pase 5	mils*10	171	171	171	155	155
Cedula de rolado real pase 6	mils*10	_____	_____	_____	123	123
Velocidad promedio pase 1	fpm/10	109	109	120	103	74
Velocidad promedio pase 2	fpm/10	152	151	143	142	134
Velocidad promedio pase 3	fpm/10	193	203	200	176	175
Velocidad promedio pase 4	fpm/10	215	206	209	194	145
Velocidad promedio pase 5	fpm/10	222	227	226	228	217
Velocidad promedio pase 6	fpm/10	_____	_____	_____	235	226
Tensión poniente pase 1	lbs/10	2234	2243	2203	2257	2337
Tensión poniente pase 2	lbs/10	1828	1837	1829	1852	1844
Tensión poniente pase 3	lbs/10	2017	2007	2009	1998	1985
Tensión poniente pase 4	lbs/10	1771	1782	1781	1845	1847
Tensión de poniente pase 5	lbs/10	1248	1241	1246	1100	1101

Tensión poniente pase 6	lbs/10	_____	_____	_____	1046	1050
Tensión oriente pase 1	lbs/10	4	4	4	4	3
Tensión oriente pase 2	lbs/10	2132	2132	2149	2152	2150
Tensión oriente pase 3	lbs/10	1841	1838	1839	1869	1872
Tensión oriente pase 4	lbs/10	1657	1645	1645	1541	1622
Tensión oriente pase 5	lbs/10	1572	1567	1569	1466	1470
Tensión oriente pase 6	lbs/10	_____	_____	_____	945	947
Fuerza pase 1	toneladas	763	752	752	813	812
Fuerza pase 2	toneladas	703	684	699	829	847
Fuerza pase 3	toneladas	656	631	648	801	809
Fuerza pase 4	toneladas	628	608	626	797	838
Fuerza pase 5	toneladas	594	569	593	840	831
Fuerza pase 6	toneladas	_____	_____	_____	993	988

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Ing. Fernando Martínez Contreras

**Candidato al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería
Mecánica con especialidad en Materiales**

Tesis:

**Propiedades mecánicas en aceros de bajo carbono laminados
en frío**

Nacido el 17 de Marzo de 1977 en Monterrey N.L. México. Hijo de la Sra. Juana María Contreras Bermúdez y el Sr. José Juan Martínez Moya.

El Ing. Fernando Martínez Contreras cursó sus estudios de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Nuevo León, obteniendo el grado de Ingeniero Mecánico Administrador en noviembre de 1999, continuando con los estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales en la misma facultad.

El Ingeniero Martínez Contreras ha laborado en las siguientes áreas; compras e ingeniería de la empresa CAMISA, investigación en el área de tecnología de la empresa HYLSA y como consultor técnico en metalurgia mecánica para la empresa Daimler-Chrysler de México.

