



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALÚRGIA - ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

**Título: Coeficiente de endurecimiento "n" en
probetas deformadas por rodillos y traccionadas**

Autor: Liónel Hernández Ardevol

Tutores: Ms.C Tomás Fernández Columbié

Ing. Dayanis Alcántara Borges

**Moa, 2010
" Año 52 de la Revolución "**



Declaración de Autoridad:

Yo: Liónel Hernández Ardevol

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Ing. Dayanis Alcántara Borges. _____

MSc. Tomás Fernández Columbié. _____

Liónel Hernández Ardevol. _____



Pensamiento:

Las proposiciones matemáticas, en cuanto tienen que ver con la realidad, no son ciertas; y en cuanto son ciertas, no tienen nada que ver con la realidad.

Albert Einstein.



Dedicatoria:

A mis padres y mi hermano que han sabido guiarme siempre por el mejor de los caminos y me han apoyado en todos mis problemas. Mi padre y mi madre que han sido persistentes conmigo y me dieron todo lo que estuvo a su alcance para que yo pudiera estudiar, a mi hermano que ha sido mi mayor ejemplo a seguir desde el mismo instante en que alcanzó una beca para el IPVCE de Holguín y que siempre estuvo al tanto de todos mis problemas de estudio como un padre más. A los tres por haberme dado todo el amor del mundo para que yo creciera y me criara en un seno familiar decente donde mi camino no podía ser otro que el de llegar algún día a cumplir con mi máspreciado sueño que fue siempre alcanzar un título universitario.

Agradecimientos:

Agradecer a mis padres y mi hermano por la educación que he recibido de ellos y que han sabido compartir conmigo todos los momentos ya sean buenos o malos llenándome siempre del amor y el cariño que toda persona desearía en su vida.

Esta es una de las tantas metas que tiene la vida pero así una de las más grandes por lo que quisiera agradecer a muchas personas que han estado siempre a mi lado apoyándome como las personas de mi grupo que han sabido llenar cada uno de los instantes que hacen que la vida sea más linda. A mis amigos más cercanos Mauris, Marvin, Yoerlis, Roberto, Yandi que siempre han estado a mi lado depositando toda su confianza en mí y apoyándome en todo lo que ha sido necesario.

A mis profesores en general que me han dotado de todo el conocimiento necesario para poder desempeñar mi labor como futuro ingeniero mecánico y en especial a mi tutor principal Tomás Fernández Columbié que tanto tiempo me dedicó y a su familia que en momentos difíciles me tendieron la mano y me acogieron como uno más en ese seno familiar. A todos los que hicieron posible la realización de este trabajo, a todos: MUCHAS GRACIAS.



Resumen

En el presente trabajo se procedió a realizar una búsqueda bibliográfica relacionada con el tema de deformación plástica superficial en frío con el objetivo de determinar los parámetros de dureza del acero AISI 1045 cuando es deformado por DPSR en frío, para ello se desarrolló un procedimiento de cálculo basándose en un análisis estricto en cuanto a las propiedades de este material en su composición original.

Con la ayuda de la metodología que se plantea en el capítulo 2 se realizaron los cálculos pertinentes para lo cual se empleo el programa de computación " Excel " mediante el cual también se desarrollaron una serie de gráficos que facilita un mejor entendimiento acerca de los resultados obtenidos dichos gráficos se encuentran plasmados en el capítulo 3. Finalmente se procedió a mostrar las conclusiones obtenidas y desde este criterio, las recomendaciones para un posterior estudio relacionado con el tema.

Abstract

In the present work it was proceeded to carry out a bibliographical search related with the theme of superficial plastic deformation at low temperature with the objective of determining the parameters of hardness of the steel AISI 1045 when it is deformed by DPSR at low temperature, to reach this, it was developed a calculation procedure being based on a strict analysis taking into account this material properties in their original composition.

With the help of the methodology that is expressed in chapter 2, there were done the pertinent calculations for which it was employed the computer software " Excel " by means of which were also developed a series of graphics that facilitates a better understanding about the results obtained; this graphics are committed to pepped in the chapter 3. Finally it was proceeded to show the obtained conclusions and from this criterion, the recommendations for a later study related to the topic.

**ÍNDICE**

	Contenido	Pág.
	Introducción.....	1
Capítulo I	Marco teórico de la investigación y antecedentes investigativos.....	4
1.1.-	Introducción.....	4
1.2.-	Modelos para determinar la curva esfuerzo deformación.....	4
1.3.-	Coefficiente de endurecimiento por deformación.....	8
1.4.-	Evaluación del endurecimiento por deformación plástica.....	9
1.5.-	Variabilidad del coeficiente de endurecimiento.....	10
1.6.-	Ecuación de Hollomon.....	10
1.7.-	Modelo constitutivo para metales.....	11
1.8.-	Interpretación analítica.....	11
1.9.-	Fundamentos de las tensiones y las deformaciones en los procesos de deformación plástica superficial.....	13
1.10.-	Gráfico tenso – deformacional de un acero común.....	15
1.11.-	Características del Flujo Plástico en los Materiales.....	18
1.12.-	Ensayos de tracción en materiales dúctiles.....	20
1.13.-	Conclusiones del Capítulo I.....	22
Capítulo II	Materiales y Métodos.....	23
2.1.-	Introducción.....	23
2.2.	Características del material del proceso de endurecimiento y tracción.....	23
2.3.-	Diseño de experimento.....	23
2.4.-	Medidas de la deformación.....	25
2.4.1.-	Diseño de experimento para "ε" y "n".....	26
2.4.2.-	Parámetros para determinar K y σ.....	27
2.5.-	Determinación del esfuerzo σ – ε real.....	28
2.5.1.-	Determinación del exponente de endurecimiento.....	30
2.6.-	Conclusiones del capítulo II.....	31
Capítulo III	Análisis de los resultados.....	32
3.1.-	Introducción.....	32
3.2.-	Análisis del diseño de experimento.....	32
3.3.-	Análisis del esfuerzo real último junto al coeficiente de resistencia del material deformado.....	35
3.4.-	Análisis del esfuerzo ingenieril para el límite de fluencia.....	37
3.5.-	Deformación logarítmica ε frente a las fuerzas aplicadas.....	38
3.6.-	Coefficiente de endurecimiento respecto a la fuerza aplicada.....	39
3.7.-	Deformación real vs fuerza F.....	40
3.8.-	Comportamiento de la deformación verdadera frente al esfuerzo verdadero.....	41
3.9.-	Valoración económica.....	42
3.10.-	Impacto medio ambiental.....	42
3.11.-	Conclusiones del capítulo III.....	45
	Conclusiones Generales.....	46
	Recomendaciones.....	47
	Referencias Bibliográficas.....	48

INTRODUCCION

Desde la antigüedad el hombre ha venido desempeñando una labor especial en busca de materiales resistentes a diversas condiciones de trabajo, ya sea bajo el efecto de altas temperaturas, de fricción con otros materiales, de grandes tensiones. En nuestros días uno de los principales problemas en las industrias es la pérdida de algunas piezas y herramientas de trabajo debido al desgaste, a la deformación por choques de altas tensiones, a la deformación por rodadura y otras condiciones de trabajo que pueden ser perjudiciales para el desarrollo industrial de un país.

En los procesos de conformado por deformación plástica son cada vez más requeridas las mayores reducciones de dimensiones de los materiales metálicos trabajados en frío o en caliente. Para satisfacer ese requerimiento es imprescindible disponer de soluciones matemáticas que permitan evaluar el efecto de la cantidad de deformación sobre el endurecimiento que la misma suscita en el material.

El acabado superficial de piezas metálicas es de vital importancia en el mundo actual, ya que los fenómenos físicos, químicos y mecánicos que afectan su desempeño generalmente se inician en la superficie. Se necesitan, más que antes, ingenieros e investigadores dedicados a estos temas con una buena preparación teórica – práctica, ya que los metales siguen representando una parte muy importante en el consumo mundial de materiales.

La deformación plástica superficial (DPS) constituye un método de tratamiento superficial de las piezas para incrementar sus cualidades físico – mecánicas, específicamente la dureza, el acabado superficial y las tensiones residuales compresivas aprovechando la plasticidad de los metales, lo que permite también incrementar la resistencia al desgaste, a la fatiga y a la corrosión.

Aunque la deformación por rodillo se viene empleando desde inicios del pasado siglo en múltiples aplicaciones, aún no se utiliza de manera sistemática, fundamentalmente por desconocimiento, asimismo, se requiere del uso del herramental específico para su aplicación y de la correcta selección del régimen apropiado de trabajo, a partir del tipo de material tratado y del resultado deseado.

Existen diversos procedimientos para el empleo de la deformación plástica superficial como alternativa para el acabado de las piezas, siendo la DPS por rodillo simple un proceso muy empleado que resulta sencillo, de fácil aplicación y es posible emplearlo en una gran cantidad de metales.

Situación problemática

La deformación plástica superficial por rodillo es uno de los métodos de deformación en frío de mayor efectividad ya que con este se endurecen las capas superficiales del material y lo hace relativamente duro y altamente resistente a la fricción, o sea, al desgaste. El coeficiente de endurecimiento "n" para probetas traccionadas se determina para establecer el endurecimiento que alcanza el acero después de someterlo a este proceso, sin embargo en literatura consultadas no existe el comportamiento de este coeficiente cuando probetas de acero AISI 1045 son deformadas por rodillo y luego sometida a ensayo de tracción.

Problema

Insuficiencia de una metodología de cálculo para determinar el coeficiente de endurecimiento "n" en el acero AISI 1045 deformado en frío por rodillo y luego traccionadas.

Hipótesis

Si se **determinan** los valores de los parámetros esfuerzo verdadero (σ), deformación verdadera (ϵ), esfuerzo ingenieril (S), entonces a través de ellos se podrá **determinar** el coeficiente de endurecimiento "n" en probetas de acero AISI 1045 deformadas por rodillos y luego traccionadas.

Objeto de la investigación

Acero AISI 1045 endurecido por el método de deformación por rodadura.

Objetivo General

Establecer la metodología de cálculo para determinar el coeficiente de endurecimiento "n" en probetas de acero AISI 1045 sometidas a deformación por rodillo y luego traccionadas.



Objetivos específicos

- ✓ Determinar los parámetros que permiten establecer el comportamiento del coeficiente "n" en el ensayo $\sigma - \epsilon$ de probetas de acero AISI 1045.
- ✓ Establecer la metodología de cálculo del coeficiente de endurecimiento "n" partiendo de las variables σ , ϵ y S.
- ✓ Análisis de los resultados de la metodología propuesta, así como de la valoración económica del proceso y su incidencia en el medio ambiente.

Tareas

- ✓ Análisis bibliográfico y desarrollo del estado del arte relacionado con el diagrama $\sigma - \epsilon$ empleado en el acero.
- ✓ Determinación de los parámetros que permiten establecer el comportamiento del coeficiente de endurecimiento "n" en el acero AISI 1045 deformado por rodadura y luego traccionado.
- ✓ Análisis de los resultados, así como de la valoración económica de la metodología propuesta.

Capítulo I: Marco Teórico y Antecedentes Investigativos.

1.1. Introducción

Todos los materiales presentan una determinada dureza que depende de la estructura atómica - molecular que presenten los mismos. En algunos casos como el de los aceros esta dureza puede ser clasificada de acuerdo con el tipo de ensayo que se aplique para medir esta dureza. Los mecanismos de endurecimiento en metales tienen como función restringir o dificultar el movimiento de las dislocaciones por lo que los metales serán más resistentes y más duros. El endurecimiento puede ser alcanzado por cuatro métodos diferentes:

- ✓ Endurecimiento por deformación plástica (encruamiento)
- ✓ Endurecimiento por reducción del tamaño de grano
- ✓ Endurecimiento por solución sólida
- ✓ Endurecimiento por precipitación o dispersión
- ✓ Por tratamiento térmico de temple

Tomando la curva de deformación del ensayo realizado al acero AISI 1045 por rodadura y evaluando de esta, las tangentes a los puntos de la misma, se pueden realizar cálculos pertinentes y determinar así mediante trabajos, la pendiente de estas rectas y algunos parámetros que definan la resistencia de este acero ante la deformación superficial por rodadura.

Como objetivo del capítulo se planteó lo siguiente:

Realizar un estudio minucioso de los trabajos precedentes que estén relacionados con el tema y establecer así el estado del arte y algunas especificaciones necesarias para el posterior entendimiento del trabajo.

1.2. Modelos para determinar la curva esfuerzo - deformación

La descripción del comportamiento de la curva esfuerzo - deformación y del endurecimiento que experimenta un metal, a través de expresiones matemáticas, es de suma importancia en diferentes aspectos de su estudio elasto - plástico, debido a que la zona plástica de la curva depende de parámetros que predicen los

mecanismos de formabilidad y deformación del material. Actualmente los estudios se centran en simulaciones numéricas de miembros estructurales y procesos de conformado de metales, en los cuales se alcanzan deformaciones superiores al esfuerzo de fluencia y para ello es necesario conocer los parámetros de la expresión matemática que describe la fluencia del mismo.

Una de las expresiones más utilizadas para predecir el comportamiento plástico de metales dúctiles es la ecuación de Hollomon, la cual establece una ley potencial de la forma, donde "K" representa el esfuerzo para una deformación natural igual a uno y se le denomina coeficiente de resistencia, "n" es conocido como coeficiente de endurecimiento por deformación y es numéricamente igual a la deformación última "u" del material, y "Y" son el esfuerzo y la deformación real respectivamente. Una de las aplicaciones de la ecuación de Hollomon es la evaluación de la formabilidad, a través del coeficiente de endurecimiento por deformación. (Kleemola y Nieminen, 1974) usaron el valor de "n" para el cálculo de la ductilidad residual de cobre deformado. Sin embargo es importante resaltar que la ecuación de Hollomon es una expresión empírica que no puede describir exactamente la curva esfuerzo-deformación para todos los metales.

Existen diferentes relaciones empíricas, que aunque no poseen ningún sentido físico conocido, proporcionan mejores aproximaciones a valores experimentales (Ono, 1972). Entre estos modelos se encuentran los de Ludwik y Swift, los cuales incluyen el efecto de endurecimiento del material por trabajo en frío (Jonson y Mellor, 1973), (Hill, 1998).

Otro modelo muy utilizado es el de (Ramberg – Osgood, 1945), el cual utiliza una ecuación de tres parámetros para expresar la relación entre el esfuerzo (S) y la deformación ingenieril (e) hasta un valor ligeramente mayor al esfuerzo de fluencia del material (Ramberg y Osgood, 1943). Los tres parámetros considerados por Ramberg - Osgood son el módulo de elasticidad E_0 , la resistencia a la fluencia S_y ($S_{0.2}$) y el parámetro "n" que define la forma de la curva (Hill, 1945).

(MacDonald et al., 2000) reportó una serie de ensayos en columnas acanaladas de acero inoxidable AISI-304. Las curvas de Ramberg - Osgood fueron ajustadas a

curvas esfuerzo - deformación obtenidas de ensayos de columnas cortas y probetas de tracción usando los esfuerzos de prueba del 0,01% y 0,2% para determinar el parámetro "n". Las curvas de Ramberg - Osgood ajustadas mostraron errores perceptibles para deformaciones superiores al 0,2% y la expresión modificada sugerida por McDonald.

(Olsson, 2001) estudió modelos avanzados en plasticidad para aleaciones de acero inoxidable y realizó un gran número de ensayos en probetas cargadas uniaxial y biaxialmente. Graficó las curvas esfuerzo-deformación como esfuerzo verdadero (S) versus deformación ingenieril (e) y observó experimentalmente que la curva esfuerzo-deformación se acercaba a una línea recta para grandes deformaciones. Propuso que la curva esfuerzo verdadero vs. deformación ingenieril se puede aproximar con la ecuación de Ramberg - Osgood hasta una deformación del 2%, y una línea recta desde este punto en adelante. La línea recta se obtiene como un ajuste promedio de la curva esfuerzo - deformación (Olsson, 2001).

El modelo de Ramberg - Osgood fue modificado por (Rasmussen, 2003) para ampliar su rango de aplicación en la curva esfuerzo - deformación hasta el punto máximo, para lo cual introdujo dos parámetros adicionales, el esfuerzo último S_u y la deformación última ϵ_u (Rasmussen, 2003). De esta manera Rasmussen propone definir el comportamiento del material, desde el inicio de la curva hasta el esfuerzo de fluencia con la ecuación de Ramberg - Osgood, y desde el esfuerzo de fluencia hasta el esfuerzo último (Rasmussen et.al. 2002 y Bezkorovainy et.al., 2002).

En los procesos de conformado por deformación plástica son cada vez más requeridas mayores reducciones de dimensiones de los materiales metálicos trabajados en frío o en caliente. Para satisfacer ese requerimiento es imprescindible disponer de soluciones matemáticas que permitan evaluar el efecto de la cantidad de deformación sobre el endurecimiento que la misma suscita en el material. Ya en el año 1735 Bülfinger hizo una proposición de tal solución y mucho después, en la primera mitad del siglo pasado trabajaron también en ello (Ludwik, 1909, Hollomon 1945 y Voce, 1948). Hasta ahora, la solución más ampliamente y frecuentemente utilizada es la denominada ecuación de Hollomon, la cual es una ecuación potencial

que se expresa $\sigma_H = K \varepsilon^n$, donde σ_H es el esfuerzo real según Hollomon, ε es deformación real, la constante K ha sido llamada coeficiente del endurecimiento y n – exponente del endurecimiento. El significado de "n" fue precisado por Low 1949, quien obtuvo $n = \varepsilon_u$, siendo ε_u la cantidad de deformación real correspondiente a la resistencia última real σ_u . Al igual que todas soluciones propuestas hasta la actualidad, la ecuación de Hollomon no expresa una ley natural, pues es de carácter empírico en el intento de representar la trayectoria de la curva real σ vs ε en el segmento correspondiente a la deformación plástica uniforme de una probeta durante el ensayo de tracción uniaxial.

Ese segmento abarca deformaciones reales en el intervalo comprendido desde la deformación real ε_y correspondiente al límite de fluencia real σ_y , hasta ε_u . Para determinar los valores de "K" y "n", de caracterización del comportamiento plástico de un dado material que haya sido ensayado a tracción uniaxial, la ecuación de Hollomon suele ser ajustada mediante regresión lineal al citado segmento previamente obtenido aplicando las ecuaciones $\varepsilon = \ln(1 + e)$ y $\sigma = S(1 + e)$, donde "S" y "e" son, respectivamente, esfuerzo nominal y cantidad de deformación nominal. En vez de tal ajuste, ha sido más riguroso considerar el resultado del estudio de Low 1949, $n = \varepsilon_u$, y a partir de esto obtener el valor del coeficiente del endurecimiento K mediante una ecuación adecuada.

No obstante, en este segundo caso de determinación de "n" y "K" se confronta el problema, al menos en los aceros, de que a medianas y bajas deformaciones la curva resultante de la ecuación de Hollomon presenta considerable desviación por encima del segmento de deformación plástica uniforme, siendo mayor esa desviación a más baja deformación y si más resistente es el material.

(Swift, 1952) propuso una modificación para identificar en un dado material la menor deformación desde la cual podría ser aplicada la ecuación de Hollomon en coincidencia con el segmento señalado.

(Ludwigson, 1971), en relación con materiales metálicos de red cristalina cúbica de caras centradas y con baja energía de las fallas de apilamiento de las dislocaciones

parciales, propuso una corrección a esa misma ecuación para lograr su aprovechamiento a bajas deformaciones.

(Samuel, 2006), en un trabajo de profusa experimentación ha obtenido que las curvas resultantes de la ecuación de Hollomon no representen satisfactoriamente a los segmentos de deformación plástica uniforme ni de los materiales de baja ni de los de alta energía de fallas de apilamiento.

En consecuencia, al menos para los materiales metálicos indicados se recomienda usar la ecuación $\sigma_R = q\varepsilon^n$ preservando en ella la importante relación obtenida por Low 1949: $n = \varepsilon_u$. Un más racional aprovechamiento de esta nueva ecuación requeriría de hallar los significados físicos de alguna(s) o todas las constantes a, b, c y d.

1.3. Coeficiente de endurecimiento por deformación

El grado de endurecimiento conseguido mediante la deformación plástica en frío no sólo depende de la cantidad de deformación aplicada sino también del llamado coeficiente de endurecimiento por deformación que no es otra cosa que la derivada de la tensión real o verdadera respecto de la deformación real ($d\sigma/d\varepsilon$). Esta magnitud indica cuánto se endurece el material por cada incremento elemental en la cantidad de deformación en frío aplicada. Su valor no es constante sino que varía con la propia deformación, en el caso de policristales y salvo para deformaciones pequeñas, este coeficiente decrece con el aumento de la deformación pero siempre se mantiene positivo hasta la fractura del material; de hecho este descenso del coeficiente de endurecimiento es el que causa la localización de la deformación plástica durante el ensayo de tracción de un material dúctil.

Para el caso de metales y aleaciones unifásicas la principal variable que controla este coeficiente es la energía de falla de apilamiento (EFA) pues esta magnitud influye en el grado de disociación de las dislocaciones y esto a su vez determina la facilidad o dificultad para que las dislocaciones de hélice realicen el llamado deslizamiento cruzado. A medida que la EFA es más grande, la disociación de las dislocaciones es menor y mayor la facilidad para que se produzca el deslizamiento cruzado, lo que se traduce en un menor coeficiente de endurecimiento debido a que

las dislocaciones tienen entonces mayor posibilidad de sortear barreras y formar más rápidamente una subestructura de dislocaciones más estable con formación de celdas. Cuyas paredes están formadas por una alta densidad de dislocaciones empaquetadas mientras que en el interior de las celdas existe una red de dislocaciones más abierta (menos densa y entramada).

La EFA depende, entre otras cosas, de la estructura cristalina. Los metales BCC tienen a presentar mayor EFA que los FCC. Sin embargo existen grandes diferencias entre los metales de una misma estructura cristalina, como es de esperar ya que esta EFA no solo depende de la distribución o arreglo de los átomos sino también de la energía del enlace atómico en la aleación. Otra variable que influye en el coeficiente es el tamaño de grano, y se recuerda que esta variable ejerce un efecto relativamente pequeño si se lo comprara con el de la EFA y además sólo se hace sentir para el rango de pequeñas deformaciones. Para grandes deformaciones la pendiente de la curva tensión real – deformación casi no varía para diferentes tamaños de grano (Robert et al., 1971, Dieter (1967)).

1.4. Evaluación del endurecimiento por deformación plástica

Habiendo sometido un material a ensayo de tracción uniaxial, obtenido su curva nominal S vs e y finalmente obtenido su curva real σ vs ϵ usando las ecuaciones $\epsilon = \ln(1+e)$ y $\sigma = S(1+e) = S(\exp \epsilon)$, la variación del esfuerzo " σ " que se produce en el segmento de deformación plástica uniforme de la curva σ vs ϵ , comúnmente es expresado con la ecuación de Hollomon $\sigma_H = K \epsilon^n$ habiendo definido los valores de las constantes " n " y " K ". En procedimiento preciso, estos valores no deben ser definidos mediante el simple ajuste por regresión lineal, de la ecuación de Hollomon al segmento mencionado, pues pueden así resultar valores de " n " diferentes a los incuestionablemente previstos por Low 1949: $n = \epsilon_u$. A partir de este dato, la constante K puede ser definida asumiendo ideal representatividad de la ecuación de Hollomon, es decir, asumiendo $\sigma_H = \sigma \rightarrow K \epsilon^n = S(\exp \epsilon)$ y considerando el caso particular $K(\epsilon_u)^n = S_u(\exp \epsilon_u)$, donde S_u es la resistencia última nominal. Puesto que $n = \epsilon_u$, la penúltima ecuación puede ser escrita $K n^n = S_u(\exp n)$, y de aquí resulta: $K = S_u(\exp 1/n)^n$.

1.5. Variabilidad del coeficiente del endurecimiento

De la ecuación de Hollomon $\sigma_H = K\varepsilon^n$ se tiene que el coeficiente del endurecimiento es $K = \sigma_H/\varepsilon^n$. Dentro de este estudio fue considerado que la satisfactoria representatividad de $\sigma_H = K\varepsilon^n$ exigiría el cumplimiento de la siguiente condición análoga resultante de la experimentación: $\sigma/\varepsilon^n \approx \text{const.}$ Tomando en cuenta sólo los puntos σ_i, ε_i del segmento de deformación plástica uniforme, la constancia experimental indicada no fue ratificada por ninguno de los ensayos de tracción uniaxial de los aceros al carbono que fueron tomados para las pruebas de este trabajo. En todos los casos fueron obtenidas curvas con trayectoria y esto fue interpretado como evidencia de que el coeficiente del endurecimiento no es una constante y por lo tanto tampoco es un coeficiente. Tal resultado constituye una versión de corroboración del estudio de Samuel 2006. La tarea de hallar una ecuación de ajuste para la correlación entre la variable σ/ε^n y la cantidad de deformación real ε .

1.6. Ecuación de Hollomon

Una de las ecuaciones empíricas más común que describe el comportamiento plástico de un acero al carbono, debido a que ajusta de una manera más satisfactoria y simple los esfuerzos y deformaciones, es la ecuación de Hollomon (Kishore, 1996): $\sigma = \sigma_0\varepsilon^n$ donde σ es el esfuerzo real; σ_0 y n son el coeficiente y el exponente de endurecimiento por deformación de Hollomon, respectivamente; y " ε " es la deformación real. Las variables σ y ε definen cada uno de los puntos de la curva esfuerzo - deformación real del material recocido. El coeficiente σ_0 es el esfuerzo real para producir una deformación real unitaria y el exponente " n " es una medida de la capacidad de endurecimiento por deformación del material; ambos valores, que se reportan como propiedades de los metales, varían para cada aleación y dependen de la condición del material (Callister, 1991). Una de las utilidades prácticas de esta expresión matemática es que permite estimar la formabilidad del material al considerar la magnitud del exponente de endurecimiento " n " (Datsko, 1991).

La ecuación de Hollomon también se define como el lugar geométrico de todos los valores posibles que puede alcanzar el límite de fluencia de un metal mediante deformación plástica (Datsko, 1991). Cuando el material tiene trabajo en frío, el

esfuerzo de fluencia se puede determinar teóricamente utilizando la ecuación de Hollomon del material recocido.

Este conocimiento es de gran importancia ya que, al diseñar, se puede estimar el esfuerzo de fluencia resultante de la pieza fabricada mediante deformación plástica. Sin embargo, la discrepancia de los valores calculados del esfuerzo de fluencia, con respecto a los experimentales, ha sido motivo de estudio debido a su importancia en el diseño ingenieril. (Ratke y Welch, 1983) asumen que esta discrepancia se debe al método empírico empleado en la obtención de los modelos matemáticos utilizados en el cálculo.

1.7. Modelo constitutivo para metales

En el ensayo de tracción simple, cuando se ha desarrollado la estricción, se alcanzan grandes deformaciones y grandes rotaciones. Por esta razón, para obtener resultados realistas es necesario emplear elementos con una descripción de la cinemática no lineal, y modelos constitutivos de plasticidad con grandes deformaciones.

El modelo elastoplástico de Von Mises, con endurecimiento isotrópico no lineal adecuado (potencial, saturación) se emplea habitualmente para representar el comportamiento de metales. También se han propuesto modelos más complejos para plasticidad de metales, por ejemplo aquellos en los que el endurecimiento depende del camino de carga (Ortiz y Popov, 1983), pero la dificultad de los ensayos experimentales necesarios para su caracterización los han hecho poco utilizados.

Para metales dúctiles y procesos de carga suficientemente lentos, en los cálculos no intervienen los fenómenos relacionados con la mecánica de la fractura y los efectos dinámicos.

1.8. Interpretación analítica

El ensayo de tracción en metales dúctiles pasa por dos etapas desde el punto de vista del estado tensional de la probeta. En la primera, las deformaciones son pequeñas sin que exista una disminución apreciable de la sección transversal, y el estado tensional en el cuello es uniaxial con distribución homogénea de las tensiones. La segunda fase se presenta cuando la tasa de aumento de la tensión

debido al endurecimiento del material es menor que la tasa con que disminuye la sección transversal. Entonces se presenta un fenómeno de inestabilidad de tipo geométrico, en el que las deformaciones se concentran en la sección central de la probeta, formándose un cuello o estricción. El flujo plástico queda confinado en esta zona, permaneciendo en estado de carga plástica, y el resto de la probeta queda en descarga elástica.

Esta segunda fase se caracteriza porque aparecen tensiones radiales y circunferenciales que dan lugar a un estado tensional triaxial no homogéneo en la zona del cuello.

Para interpretar analíticamente el ensayo de tracción consideraremos una probeta de longitud inicial l_0 y diámetro inicial D_0 . En un instante genérico denominaremos l y D a la longitud y diámetro de dicha probeta, y P a la fuerza aplicada en dirección axial. En lo sucesivo se considera un sistema de coordenadas cilíndricas denotando por u_r y u_z los desplazamientos según el radio y el eje de la probeta, respectivamente.

Desde el punto de vista experimental pueden citarse dos contribuciones muy importantes (Norris et al., 1978) quien ensayó y simuló numéricamente probetas de acero y (Goicolea, 1985) que ensayó y estudió computacionalmente probetas de aluminio, ya que ambos autores brindan abundante información útil que se discute detalladamente más adelante.

(Norris et al., 1978) estudiaron probetas de acero A 533 Grado B, Clase 1, extraídas de un material testigo reservado de un recipiente destinado a la industria nuclear.

Estos ensayos se realizaron siguiendo las normas de la ASTM (no indican la norma en cuestión), para lo cual utilizaron una máquina de ensayos equipada con celdas de carga, así como extensómetros y otros dispositivos de medición que fueron complementados con una serie de fotografías de alta resolución. De esta forma pudieron registrar diferentes variables de interés como la estricción y alargamiento de la probeta, forma del cuello y otras variables de interés.

La probeta estudiada era ligeramente cónica, con un diámetro máximo de 12,83 mm, un diámetro mínimo de 12,70 mm y la longitud total 53,34 mm.

Las propiedades mecánicas del material empleado son módulo de elasticidad $E = 207$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,29$, tensión de fluencia inicial $Y_0 = 0,458$ GPa y tensión de rotura $Y_r = 0,621$ GPa, después del ensayo los resultados obtenidos demostraron que la reducción del área del material se comportaba a un 65% del área final con respecto a la inicial.

1.9. Fundamentos de las tensiones y las deformaciones en los procesos de deformación plástica superficial

Se denomina esfuerzos residuales ó internos, al estado de esfuerzos existente en el volumen de un material en ausencia de una carga externa (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos, tal como un gradiente térmico (James, 1996; Masubuchi, 1980).

En general, se distinguen tres clases de esfuerzos residuales de acuerdo con la distancia o rango sobre el cual pueden ser observados (James y Buck, 1980). La primera clase de esfuerzos residuales, denominados macroscópicos, son de naturaleza de largo alcance y se extienden sobre varios granos del material. La segunda clase de esfuerzos residuales son denominados micro esfuerzos estructurales, abarcan la distancia de un grano o parte de uno, y pueden presentarse entre fases diferentes y tener características físicas distintas. La tercera clase de esfuerzos residuales se presenta sobre varias distancias interatómicas dentro de un grano. Los esfuerzos residuales son siempre consecuencias de deformaciones elásticas y/o plásticas no homogéneas sobre una escala macroscópica o microscópica (Macherauch y Kloos, 1986).

Las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta retícula interna es necesaria la introducción de energía a la pieza.

A diferencia de la deformación plástica superficial, las tensiones de compresión remanentes, durante el temple, surgen como resultado de las transformaciones estructurales, antes las cuales la austenita se transforma en martensita con una estructura menos densa. Con el aumento del coeficiente de la fricción externa y de la superficie de contacto del instrumento con la superficie de tratamiento aumentan las

irregularidades de la deformación plástica con consecuencia en el nivel de las tensiones remanentes y la profundidad de su difusión (Korotsiche, 1989).

(Boyle y Spence, 1989) plantean que al examinar la deformación plástica y el endurecimiento por deformación en frío se puede observar que a cada valor de tensión, le corresponde una determinada deformación. Cualquier material bajo la acción de una tensión constante puede, en determinadas condiciones, deformarse progresivamente con el tiempo. Este fenómeno recibe el nombre de fluencia.

Durante la operación de rodilado se genera un estado tensional volumétrico de compresión no uniforme dado por la fuerza compresiva constante y por las reacciones de oposición del material ante la misma, en las otras dos direcciones. (Martynenko, 2002).

(Pero Sanz, 1999) señala que en la teoría de la plasticidad se aborda los métodos de cálculo de tensiones y deformaciones en un cuerpo deformado. Es necesario, como lo es también para la teoría de la elasticidad, establecer ecuaciones de equilibrio y compatibilidad y determinar las relaciones experimentales entre la tensión y la deformación.

La relación general entre la tensión y la deformación debe contener:

- ✓ Las relaciones elásticas de tensión deformación.
- ✓ La condición de tensión para la cual comienza el flujo plástico.
- ✓ Las relaciones plásticas de tensión deformación o el incremento de las mismas.

(Mazein, 2001) considera que las tensiones residuales y las deformaciones que aparecen en el proceso de elaboración, determinan en gran nivel la exactitud de las piezas y la calidad de su capa superficial. Para elevar la efectividad de los procesos tecnológicos de la deformación plástica superficial hace falta tener un modelo del estado tensión deformación que se forma en el resultado de la elaboración.

(Dieter, 1967 y Pero Sanz, 1999) señalan que en materiales estables poco sensibles a la velocidad de deformación, como el acero, la curva real de tensión (σ) deformación (ε) conocida también como curva de fluencia y que solo es válido desde

el comienzo en la zona de fluencia plástica o de estabilidad plástica hasta la carga máxima a partir de la que se inicia la estricción local.

(Smith, 2001), para el estudio de la relación entre las tensiones y las deformaciones existen otros modelos que permiten caracterizar el comportamiento del material bajo determinadas condiciones tecnológicas. La idea de caracterizar la plasticidad para operaciones de conformación sobre la base del ensayo de tracción es predominante, pero tal aproximación está siendo considerada y sobre esa misma base, buscándose otras aproximaciones para caracterizar el proceso de deformación plástica. (Pogodin, 1979).

1.10. Gráfico tenso - deformacional de un acero común

Los diagramas esfuerzo - deformación de diversos materiales varían ampliamente y diferentes ensayos de tensión con el mismo material pueden producir resultados diferentes de acuerdo con la temperatura de la probeta y la velocidad de carga. Sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes en los diagramas de varios grupos de materiales y dividirlos en dos amplias categorías: materiales dúctiles y materiales frágiles.

Se ha determinado que en estos procesos de compresión directa surgen tensiones residuales una vez finalizado los mismos. Para conocer las peculiaridades de la deformación plástica del material es necesario analizar su comportamiento de desplazamiento contra la fuerza aplicada al mismo, como se muestra en la figura 1.1.

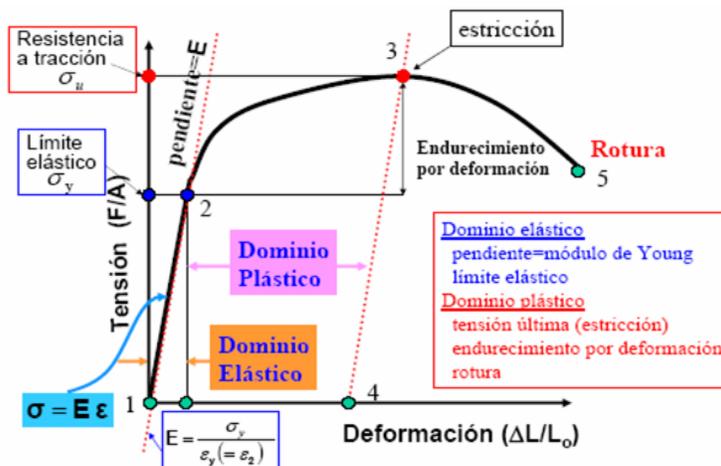


Figura.1.1. Muestra la curva ingenieril tensión-deformación de un acero común.

En (Dieter, 1967); (Álvarez, 1999), se plantea que las tensiones residuales internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas y se producen cuando un cuerpo sufre una deformación plástica no uniforme, y el signo de la tensión residual producida por dicha deformación será opuesto al de la deformación plástica que la produjo.

En general, la curva tensión-deformación así obtenida, presenta cuatro zonas diferenciadas:

- 1. Deformaciones elásticas.** En esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.
- 2. Fluencia o cadencia.** Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo

caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

3. **Deformaciones plásticas.** Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.
4. **Estricción.** Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por ese zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

La resistencia (fluencia y rotura) es una propiedad o característica de un material o elemento mecánico. Esta propiedad puede ser inherente al material o bien originarse de su tratamiento y procesado. Habitualmente sólo se dispone de información correspondiente al ensayo de tracción. Los componentes de máquinas en general trabajan bajo estados de tensión multidireccional. El objetivo de las teorías de fallo estático, es relacionar el fallo en un estado unidireccional (ensayo de tracción) con el fallo bajo cualquier estado de tensiones. (Korotsiche, 1989).

Durante el ensayo de tracción, si se descarga la probeta luego de alcanzar la zona plástica pero antes de producirse la ruptura, la curva σ - ϵ cambia de forma. La longitud de la probeta tiende a recuperarse, pero no alcanza la longitud inicial,

quedando con una longitud mayor que se denomina deformación permanente. A nivel gráfico, la curva se devuelve con la pendiente de la zona elástica.

Finalmente, si la curva σ - ϵ del material no presenta claramente dónde termina la zona elástica y comienza la zona plástica, se define como punto de fluencia al correspondiente a una deformación permanente del 0,2%.

1.11. Características del Flujo Plástico en los materiales

El comportamiento elástico y plástico de los materiales puede ser perfectamente analizado mediante la curva esfuerzo-deformación. Se denomina esfuerzo de fluencia o cedencia al menor valor del esfuerzo para el cual se produce una deformación permanente o deformación plástica. Se llama fluencia convencional al valor del esfuerzo para una deformación permanente del 0,2%. El valor del esfuerzo máximo (resistencia a la tracción) es el mayor valor del esfuerzo en una curva σ - ϵ convencional o al valor del esfuerzo para el punto de máxima carga en el ensayo; este valor de esfuerzo junto con el de fluencia o límite elástico, se encuentran tabulados para la mayoría de los materiales.

El esfuerzo de fractura es el valor al cual se reproduce la fractura de la probeta, y cuyo valor no tiene gran importancia, pues una vez se supere el máximo valor, la probeta fallará, irremediablemente a menores valores de esfuerzo (Callister, 1991).

La alúmina experimenta una deformación plástica despreciable, mientras que los metales y polímeros experimentan un flujo plástico considerable. En la práctica se manejan dos valores que tienen que ver con el comportamiento plástico de los materiales, el primero es el esfuerzo de cedencia (o fluencia), que es el esfuerzo en el que comienza la deformación plástica, el segundo es la resistencia última a la tensión, que es el esfuerzo máximo que un material puede soportar antes de la ruptura. La resistencia a la cedencia es especialmente importante porque la mayor parte de las máquinas y estructuras deben trabajar en el rango elástico.

Generalmente la definición más útil de resistencia a la cedencia es la del corrimiento de 0,2 % (en una gráfica esfuerzo - deformación). En la mayoría de los metales la fluencia comienza con movimientos atómicos que inmovilizan el de las dislocaciones, en polímeros es el realineamiento de cadenas. Cuando el esfuerzo se intensifica

estas dislocaciones se liberan y comienzan a moverse y a generar otras dislocaciones móviles. La región resultante de la deformación plástica llamada banda de Lüders, se propaga a través del material. (Callister, 1991).

El valor del módulo es una medida de la rigidez del material, entre mayor pendiente tenga la curva más rígido será el material. Para el caso del acero E vale 20×10^{10} N/m² o 30×10^6 PSI. Otros valores característicos del ensayo en esta región elástica, son el límite proporcional y el límite elástico. El valor del límite proporcional es el valor del mayor esfuerzo, para el cual existe proporcionalidad directa entre el esfuerzo y la deformación. El valor del límite elástico es el mayor valor del esfuerzo hasta el cual el material mantiene un comportamiento elástico (Moreno, 2005).

Las cargas de variación brusca, no podrán ser analizadas de la misma manera que en los ensayos estáticos, sino como ondas de tensión que, al propagarse en el volumen de la probeta, generan deformaciones por los mismos mecanismos que en sollicitaciones estáticas, pero su propagación y acumulación serán función de la velocidad de variación de la amplitud de tensión.

La idea de caracterizar la plasticidad para operaciones de conformación sobre la base del ensayo de tracción es predominante desde hace tiempo (Pogodin, 1979), pero tal aproximación está siendo considerada y sobre esa misma base, buscándose otras aproximaciones para caracterizar el proceso de deformación plástica.

Desde que se formularon las bases teóricas de la plasticidad hasta el presente, los estudios ingenieriles han estado preponderantemente dirigidos hacia el análisis de la distribución de tensiones y deformaciones en los materiales bajo un tipo de deformación, y en la predicción del rango límite de esta deformación en relación con la resistencia intrínseca del material.

(Mallo, 1987), plantea que el análisis exhaustivo del desarrollo de los procesos por deformación plástica se está intentando realizar mediante el seguimiento en cada instante del continuo cambio en forma y posición de la superficie de fluencia. Un estudio aproximado de la transformación de la superficie de fluencia se puede realizar mediante los criterios del endurecimiento por deformación en frío.

Se considera que la tensión residual compresiva puede llegar hasta valores entre -1000 y -1600 [MPa] a una profundidad de 0,08 a 0,1 mm de la superficie. Es importante tener en cuenta que los valores anteriores δ dependen del material y del proceso de elaboración. Dichas tensiones aparecen a una profundidad entre un 10 y un 50% de la profundidad de la capa endurecida.

1.12. Ensayos de tracción en materiales dúctiles

En el ensayo de tracción a una probeta se le aplica una carga uniaxial. En cada instante se mide la carga P aplicada y el alargamiento δ que experimenta la probeta, obteniendo una curva carga-alargamiento ($P-\delta$). El alargamiento de la probeta debe medirse con precisión y para ello se recurre a la utilización de un extensómetro. Con objeto de que la geometría de la probeta no influya en los resultados obtenidos, se utiliza una geometría estandarizada.

Por otra parte, a fin de que el sistema de sujeción de la máquina no origine una fractura prematura, los extremos de la probeta suelen presentar una sección mayor que la zona central, asegurando de esta manera que la fractura tenga lugar en el centro, lejos de la zona de fijación a las herramientas de la máquina. La zona central de la probeta se caracteriza por presentar una sección uniforme, siendo ahí donde se colocará el extensómetro para la medición de la deformación. (Badiola, 2004)

En los materiales elásticos, en particular en muchos metales dúctiles, un esfuerzo de tracción pequeño lleva aparejado un comportamiento elástico. Eso significa que pequeños incrementos en la tensión de tracción comporta pequeños incrementos en la deformación, si la carga se vuelve cero de nuevo el cuerpo recupera exactamente su forma original, es decir, se tiene una deformación completamente reversible.

Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que existe un límite, llamado límite elástico, tal que si cierta función homogénea de las tensiones supera dicho límite entonces al desaparecer la carga quedan deformaciones remanentes y el cuerpo no vuelve exactamente a su forma. Es decir, aparecen deformaciones no-reversibles.

Este tipo de comportamiento elasto - plástico descrito más arriba es el que se encuentra en la mayoría de metales conocidos y también en muchos otros materiales. El comportamiento perfectamente plástico es algo menos frecuente, e implica la aparición de deformaciones irreversibles por pequeña que sea la tensión. Otros materiales además presentan plasticidad con endurecimiento y necesitan esfuerzos progresivamente más grandes para aumentar su deformación plástica total. Incluso los comportamientos anteriores pueden ir acompañados de efectos viscosos, que hacen que las tensiones sean mayores en casos de velocidades de deformación altas, dicho comportamiento se conoce con el nombre de viscoplasticidad. La plasticidad de los materiales está relacionada con cambios irreversibles en esos materiales.

A diferencia del comportamiento elástico que es termodinámicamente reversible, un cuerpo que se deforma plásticamente experimenta cambios de entropía, como desplazamientos de las dislocaciones. En el comportamiento plástico parte de la energía mecánica se disipa internamente, en lugar de transformarse en energía potencial elástica.

Hasta cuanto se ha logrado indagar a propósito del presente trabajo, ningún estudio anterior ha considerado la constancia del coeficiente del endurecimiento (K y n) como causa de las citadas desviaciones. Aquí se determina que, al menos en el acero al carbono AISI 1045, el llamado coeficiente del endurecimiento en realidad es una variable dependiente de la cantidad de deformación real ϵ .

1.13. Conclusiones del capítulo I

- ✓ En las bibliografías estudiadas se ha determinado el coeficiente de deformación por rodadura n para distintos casos pero ninguno lo ha hecho para la curva σ - ϵ del acero AISI 1045 deformado por el mismo método.
- ✓ Se determina que, al menos en un grupo de aceros al carbono, el llamado coeficiente del endurecimiento en realidad es una variable dependiente de la cantidad de deformación real ϵ .
- ✓ La energía de falla de apilamiento EFA sólo se hace sentir para el rango de pequeñas deformaciones dado esto en las deformaciones plásticas no existe esta energía ya que aquí de hecho no hay transformación de energía en potencial elástica como ocurre en las deformaciones del mismo tipo.

Capítulo II: Materiales y Métodos

2.1. Introducción

La deformación en frío permite al material adquirir nuevos índices de resistencia mecánica por lo que se encuentra entre uno de los procesos más empleados en la industria, aumenta la dureza del material, así como la ductilidad, la tenacidad.

En el caso de los aceros esta dureza se mide con la realización de varios experimentos y se establece la curva de $\sigma - \epsilon$ con la cual se trabaja desarrollando una metodología de cálculo específica y se pueden determinar varios parámetros que caracterizan estos materiales deformados por diferentes formas ya que no siempre alcanzan el mismo índice de dureza.

Como objetivo del capítulo se establece

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones en la que se realizarán los experimentos.

2.2. Características del material del proceso de endurecimiento y tracción

El acero AISI 1045 presenta gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste. Posee alta tenacidad y plasticidad, también es un material con facilidad de conformación y su costo de producción es bajo ofreciendo buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga.

La composición química estándar que se recoge en tabla 2.1 de este acero, según norma GOST y sus equivalencias de otras normas como la American Society for Metals editada por Databook (1988), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System - UNS, de la American Society for testing Materials - ASTM y la SAE.

Tabla 2.1. Composición química estándar del acero AISI 1045.

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,45	0,25	0,65	0,40	0,10	0,40

2.3. Diseño de experimento

Para el cálculo de los parámetros a establecer para la metodología de la determinación del coeficiente de endurecimiento n , así como de aquellos que intervienen en el proceso de Deformación Plástica Superficial por Rodillo del acero

AISI 1045 se debe tener en cuenta el diseño de experimento establecido (Fernández, 2007). Este diseño de experimento se recoge en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Matriz de planificación del experimento. (Fuente Fernández, 2007).

Niveles	Respuestas			Salidas	
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)	n	Ŷ
Nivel superior (+1)	110	2 500	0,25	n	Ŷ
Nivel medio (Δ)	54	1 500	0,125		
Nivel inferior (-1)	27	500	0,075		
Número de ensayo				n_1	\tilde{Y}_n
1a	27	500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
1b	27	500	0,125	n_{1b}	
1c	27	500	0,25	n_{1c}	
2a	27	1500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
2b	27	1500	0,125	n_{1b}	
2c	27	1500	0,25	n_{1c}	
3a	27	2500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
3b	27	2500	0,125	n_{1b}	
3c	27	2500	0,25	n_{1c}	
4a	54	500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
4b	54	500	0,125	n_{1b}	
4c	54	500	0,25	n_{1c}	
5a	54	1500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
5b	54	1500	0,125	n_{1b}	
5c	54	1500	0,25	n_{1c}	
6a	54	2500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
6b	54	2500	0,125	n_{1b}	
6c	54	2500	0,25	n_{1c}	
7a	110	500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
7b	110	500	0,125	n_{1b}	
7c	110	500	0,25	n_{1c}	
8a	110	1500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
8b	110	1500	0,125	n_{1b}	
8c	110	1500	0,25	n_{1c}	
9a	110	2500	0,075	n_{1a}	\tilde{Y}_n
9b	110	2500	0,125	n_{1b}	
9c	110	2500	0,25	n_{1c}	

El número de experimento cuando intervienen k factores con tres niveles cada uno (-1, Δ y +1), se determina con un arreglo de la función exponencial: $N = 3^k$

Donde:

N = Número de experimentos.

K = Número de factores.

En este caso, se analizará la influencia de tres factores, de aquí que $k = 3$ luego, el número de experimento sería: $N = 3^3 = 27$ experimentos.

En total, para el desarrollo de los experimentos se utilizarán 27 probetas deformada por rodadura (probetas marcadas todas del 1 al 9, seguido de la letra "a" para la primera réplica, la letra "b" para la segunda, y la letra "c" para la tercera réplica).

2.4. Medidas de la deformación

La magnitud más simple para medir la deformación es lo que en ingeniería se llama deformación axial o deformación unitaria se define como el cambio de longitud por

unidad de longitud:
$$e = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

Donde l_0 es la longitud inicial de la zona en estudio y l_f la longitud final o deformada.

Para establecer la medida de la deformación se tiene en cuenta las medias (\bar{Y}_n) derivadas de la matriz de planificación de experimento establecido en la tabla 2.1 y los resultados del plan experimental establecido (Piñeiro, 2009), los cuales se recogen en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Resultados de los datos iniciales y finales de las probetas. (Fuente Piñeiro, 2009)

PROBETAS	ANTES DEL ENSAYO		DESPUÉS DEL ENSAYO		
	l_0	$A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$	l_{f1}	l_{f2}	l_{f3}
	mm	mm ²	mm	mm	mm
Patrón	120,12	11,05	143,56	143,68	143,53
Pta 1	120,11	87,25	132,70	134,50	133,48
Pta 2	120,13	88,74	130,94	131,91	133,45
Pta 3	119,98	89,58	131,72	130,32	131,87
Pta 4	120,05	90,25	134,98	135,43	133,99
Pta 5	120,01	89,08	133,12	133,31	133,33
Pta 6	119,95	88,91	131,15	131,28	129,97
Pta 7	120,17	89,58	134,13	136,10	135,04
Pta 8	120,04	91,43	132,95	133,83	134,83
Pta 9	119,90	89,92	126,99	126,95	127,96

El número de experimento cuando intervienen k factores con dos niveles cada uno, se determina con un arreglo de la función exponencial: $N = 3^k$

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que $k = 2$ luego, el número de experimento sería: $N = 3^2 = 9$ experimentos.

En este caso las variables de entrada o dependiente se consideran:

S – Avance; mm/rev.

n – número de revoluciones por minutos; rev/min

P – Fuerza; [N]

Factores:

l_0 – Longitud inicial de la probeta; mm

A_0 – Área de la sección transversal de la probeta antes del ensayo; mm^2

De esta forma se evalúa el comportamiento de la deformación (ϵ) para cada una de las probetas.

2.4.1. Diseño de experimento para " ϵ " y "n"

La matriz de experimento para " ϵ " y "n", resultado de la tabla 2.2 se recoge en la tabla 2.3 con la cual se registrarán estos dos parámetros del proceso de deformación del acero AISI 1045 deformado en frío por rodadura y luego traccionado.

Tabla 2.3. Matriz experimental para " ϵ " y "n"

PROBETA S	ANTES DEL ENSAYO			DESPUÉS DEL ENSAYO		
	l_0	d_0	l_f	d_f	ϵ	n
	mm	mm	mm	mm	%	-
Pta Patrón	120,12	11,05	143,59	5,51	ϵ_p	n_p
Pta 1	120,11	10,54	133,56	6,40	ϵ_1	n_1
Pta 2	120,13	10,63	132,10	7,65	ϵ_2	n_2
Pta 3	119,98	10,68	131,30	8,46	ϵ_3	n_3
Pta 4	120,05	10,72	134,80	6,60	ϵ_4	n_4
Pta 5	120,01	10,65	133,25	7,56	ϵ_5	n_5
Pta 6	119,95	10,64	130,80	8,01	ϵ_6	n_6
Pta 7	120,17	10,68	135,09	6,50	ϵ_7	n_7
Pta 8	120,04	10,79	133,87	7,28	ϵ_8	n_8
Pta 9	119,90	10,70	127,30	8,90	ϵ_9	n_9

2.4.2. Parámetros para determinar K y σ

Para determinar el coeficiente de resistencia K y el esfuerzo real o verdadero σ se deben de tener presentes una serie de parámetros que se recogen en la tabla 2.4 la cual se muestra como matriz experimental para la determinación de las variables de salida antes mencionadas.

Tabla 2.4. Matriz de planificación para determinar K y σ

Probetas	Fuerza(N)	n(rev/min)	S(mm/rev)	K (kgf/mm ²)	σ (kgf/mm ²)
1	500	27	0,075	K ₁	σ_1
2	500	54	0,125	K ₂	σ_2
3	500	110	0,25	K ₃	σ_3
4	1500	27	0,075	K ₄	σ_4
5	1500	54	0,125	K ₅	σ_5
6	1500	110	0,25	K ₆	σ_6
7	2500	27	0,075	K ₇	σ_7
8	2500	54	0,125	K ₈	σ_8
9	2500	110	0,25	K ₉	σ_9
Patrón	-	-	-	K _p	σ_p

Para verificar si los resultados obtenidos son beneficiosos o no en el desarrollo de posteriores trabajos con el acero AISI 1045 se tendrán en cuenta una serie de parámetros normalizados de este material los cuales se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Propiedades del acero AISI 1045

NO SAE AISI	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN σ		LÍMITE DE FLUENCIA σ_f		ALARGAMIENTO EN 50 MM δ	DUREZA BRINELL
	kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa	%	HB
1045	68,7	673,7	42,2	413,8	23	215

2.5. Determinación del esfuerzo $\sigma - \epsilon$ real

Una de las ecuaciones empíricas más común que describe el comportamiento plástico de un acero al carbono, debido a que ajusta de una manera más satisfactoria y simple los esfuerzos y deformaciones, es la ecuación de Hollomon [1]:

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2.1)$$

Donde σ es el esfuerzo real; σ_0 y n son el coeficiente y el exponente de endurecimiento por deformación de Hollomon, respectivamente; y ϵ es la deformación real.

El exponente de endurecimiento por deformación puede tener valores de $n = 0$ (cuando es un sólido perfectamente plástico) a $n = 1$ (cuando es un sólido elástico). Para varios metales n tiene valores de 0,1 y 0,5.

K – constante experimental, calculada de un grupo de datos para la curva de tensión, que es numéricamente igual a un valor extrapolado del esfuerzo verdadero en una deformación verdadera de 1,00.

ϵ – Deformación verdadera que es el logaritmo natural de la relación de la longitud de calibración instantánea (L), a la longitud de calibración original (L_0); así que :

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_0} \quad \text{ó} \quad \epsilon = \ln(1 + e) \quad (2.2)$$

Siendo \ln el logaritmo natural en las condiciones de establecimiento de la curva e – deformación ingenieril.

El método de prueba es útil para estimar la deformación en el acuellamiento en un ensayo tensil uniaxial, prácticamente provee un parámetro empírico para apreciar el estiramiento relativo en formabilidad de un sistema metálico. El exponente de endurecimiento por deformación es también una medida del incremento del de resistencia de un material debido a la deformación plástica.

Para la determinación de los valores experimentales de la tensión verdadera cuando no ha ocurrido el acuellamiento se emplea la ecuación 2.3

$$\sigma = S(1 + e) \quad (2.3)$$

Siendo S la tensión ingenieril.

Para estimar el comportamiento de esta tensión se consideran las 27 probetas establecidas en el diseño de experimento.

La ecuación de Hollomon también se define como el lugar geométrico de todos los valores posibles que puede alcanzar el límite de fluencia de un metal mediante deformación plástica (Datsko, 1991). Cuando el material tiene trabajo en frío, la deformación ingenieril se puede determinar teóricamente utilizando la ecuación del material de la siguiente manera

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

Siguiendo la teoría con la cual se desarrolló la ecuación para la deformación ingenieril se pone de manifiesto la ecuación para el cálculo de la tensión ingenieril donde el material aún no ha sido deformado, en ese instante de tiempo en el cual se comienza a aplicar la fuerza a la probeta sin existir aún la deformación la ecuación de dicha tensión sería:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (2.5)$$

Donde:

F = fuerza en (kgf/mm^2), definida anteriormente como la fuerza un instante antes del acuellamiento que en este caso se comporta como un esfuerzo de fluencia (σ_F) del material deformado.

Las variables σ y ε definen cada uno de los puntos de la curva esfuerzo - deformación real del material recocido. El coeficiente σ_0 es el esfuerzo real para producir una deformación real unitaria y el exponente n es una medida de la capacidad de endurecimiento por deformación del material; ambos valores, que se reportan como propiedades de los metales, varían para cada aleación y dependen de la condición del material (Callister, 1991). Una de las utilidades prácticas de esta expresión matemática es que permite estimar la formabilidad del material al

considerar la magnitud del exponente de endurecimiento n en la ecuación (2.1) (Datsko, 1991).

2.5.1. Determinación del exponente de endurecimiento

La determinación del exponente por endurecimiento de la forma logarítmica de la curva de tensión de esfuerzo verdadero contra deformación verdadera dentro del rango plástico se determina por la ecuación (2.5)

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (2.5)$$

Al obtener los logaritmos de la gráfica de esfuerzo contra deformación verdadera de la ecuación, de estos pares de datos ($\log \sigma$, $\log \varepsilon$), se calcula mediante regresión lineal del $\log \sigma$ contra $\log \varepsilon$, la pendiente, n , y el % de error de la curva.

La ecuación para calcular la regresión lineal es la siguiente:

$$n = \frac{\left[N \sum_{i=N} (\log \varepsilon_i \log \sigma_i) - \left(\sum_{i=N} \log \varepsilon_i \sum_{i=N} \log \sigma_i \right) \right]}{N \sum_{i=N} (\log \varepsilon_i)^2 - \left(\sum_{i=N} \log \varepsilon_i \right)^2} \quad (2.7)$$

Donde N es el número de datos. La ecuación para calcular la pendiente de la curva es hecha en forma conveniente y por representaciones simbólicas para facilitar el trabajo con dicha metodología como sigue:

$$Y = \log \sigma$$

N – número de datos pares.

$$X = \log \varepsilon$$

SD – desviación estándar de "n" valores.

$$b = \log K$$

n – valor de n

La ecuación para la pendiente de la línea de regresión lineal provee el exponente de deformación de la siguiente forma:

$$n = \frac{N \sum XY - \sum X \sum y}{N \sum X^2 - \left(\sum X \right)^2} \quad (2.8)$$

Las ecuaciones para el coeficiente de resistencia son las siguientes:

Capítulo III: Análisis de los resultados

3.1. Introducción

La deformación de los materiales se caracteriza por la composición química, las propiedades mecánicas y físicas del material, teniendo en cuenta la superficie a deformar. La elección de los parámetros durante el ensayo determinan en gran medida los resultados que queremos obtener.

El análisis de estos resultados permite evaluar el comportamiento del material AISI 1045 bajo estas condiciones de operación.

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental ya unido al trabajo matemático para el ajuste de todas las ecuaciones, y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas que describan las regularidades del comportamiento de la curva tenso-deformacional del acero AISI 1045 endurecido por deformación plástica superficial sometido a la acción de cargas de tracción únicamente para la parte donde comienza a deformarse plásticamente. Así mismo se revela a partir de los modelos obtenidos; el mecanismo de rotura del acero AISI 1045 en las referidas condiciones así como las tensiones residuales en el cuello de la probeta deformada.

El objetivo del capítulo es:

1. Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2. Análisis del diseño de experimento

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son adecuadas para generar la información que se busca. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores, pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos.

Para determinar el comportamiento del coeficiente de endurecimiento "n" en la curva tensión – deformación se empleó el software "Excel", los valores representados con anterioridad son válidos hasta el límite de rotura, los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.1 donde se valoran las variaciones del material según la dureza obtenida.

Tabla 3.1 Matriz de planificación del experimento. (Fuente Fernández, 2007).

Niveles	Respuestas			Salidas	
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)	n	Ŷ
Nivel superior (+1)	110	2 500	0,25	n	Ŷ
Nivel medio (Δ)	54	1 500	0,125		
Nivel inferior (-1)	27	500	0,075		
Número de ensayo				n ₁	Ŷ _n
1a	27	500	0,075	0,11	0,11
1b	27	500	0,125	0,10	
1c	27	500	0,25	0,12	
2a	27	1500	0,075	0,11	0,10
2b	27	1500	0,125	0,11	
2c	27	1500	0,25	0,09	
3a	27	2500	0,075	0,08	0,09
3b	27	2500	0,125	0,13	
3c	27	2500	0,25	0,06	
4a	54	500	0,075	0,08	0,11
4b	54	500	0,125	0,13	
4c	54	500	0,25	0,12	
5a	54	1500	0,075	0,12	0,10
5b	54	1500	0,125	0,12	
5c	54	1500	0,25	0,06	
6a	54	2500	0,075	0,09	0,08
6b	54	2500	0,125	0,08	
6c	54	2500	0,25	0,09	
7a	110	500	0,075	0,13	0,12
7b	110	500	0,125	0,12	
7c	110	500	0,25	0,12	
8a	110	1500	0,075	0,12	0,11
8b	110	1500	0,125	0,09	
8c	110	1500	0,25	0,12	
9a	110	2500	0,075	0,06	0,06
9b	110	2500	0,125	0,07	
9c	110	2500	0,25	0,06	

Con el diseño de experimento expuesto anteriormente se procesaron los datos pertinentes empleando el procedimiento de cálculo desarrollado en el capítulo 2 a los que se les atribuyen los resultados a los que se hace referencia en este capítulo.

Tabla 3.2. Resultados de las datos iniciales y finales de las probetas. (Fuente Piñeiro, 2009)

PROBETA S	ANTES DEL ENSAYO			DESPUÉS DEL ENSAYO		
	l_0	d_0	l_f	d_f	ϵ	n
	mm	mm	mm	mm	%	-
Pta Patrón	120,12	11,05	143,59	5,51	0,18	0,18
Pta 1	120,11	10,54	133,56	6,40	0,09	0,11
Pta 2	120,13	10,63	132,10	7,65	0,09	0,10
Pta 3	119,98	10,68	131,30	8,46	0,12	0,09
Pta 4	120,05	10,72	134,80	6,60	0,10	0,11
Pta 5	120,01	10,65	133,25	7,56	0,09	0,10
Pta 6	119,95	10,64	130,80	8,01	0,12	0,08
Pta 7	120,17	10,68	135,09	6,50	0,11	0,12
Pta 8	120,04	10,79	133,87	7,28	0,06	0,11
Pta 9	119,90	10,70	127,30	8,90	0,11	0,06

Al evaluar la longitud inicial (l_0) y la longitud final (l_f) de la probeta deformada por rodadura para diferentes niveles de carga con valores de 500 N, 1500 N y 2500 N, se observa que el % de deformación (ϵ) va desde 0,06 hasta 0,12 y el coeficiente de endurecimiento (n) con un rango similar. Esto demuestra que el material tiende a ser plástico ya que se cumple la condición de que cuando n tiende a 0 ($n \rightarrow 0$) es perfectamente plástico.

3.3. Análisis del esfuerzo real último junto al coeficiente de resistencia del material deformado

Tabla 3.3. Comportamiento del coeficiente de resistencia (k) y el esfuerzo (σ).

Probetas	Fuerza(N)	n(rev/min)	S(mm/rev)	K (kgf/mm ²)	σ (kgf/mm ²)
1	500	27	0,075	154,06	121,39
2	500	54	0,125	149,78	116,82
3	500	110	0,25	154,31	120,04
4	1500	27	0,075	155,01	123,85
5	1500	54	0,125	157,52	124,42
6	1500	110	0,25	155,80	122,35
7	2500	27	0,075	157,67	127,27
8	2500	54	0,125	159,62	129,45
9	2500	110	0,25	158,37	127,85
Patrón	-	-	-	99,53	73,17

Los esfuerzos calculados por la ecuación de Hollomon para las diferentes cargas de deformación unitaria en 2.1 se recogen en la tabla 3.3.

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran los comportamientos del esfuerzo verdadero y el coeficiente de resistencia frente a la fuerza aplicada respectivamente.

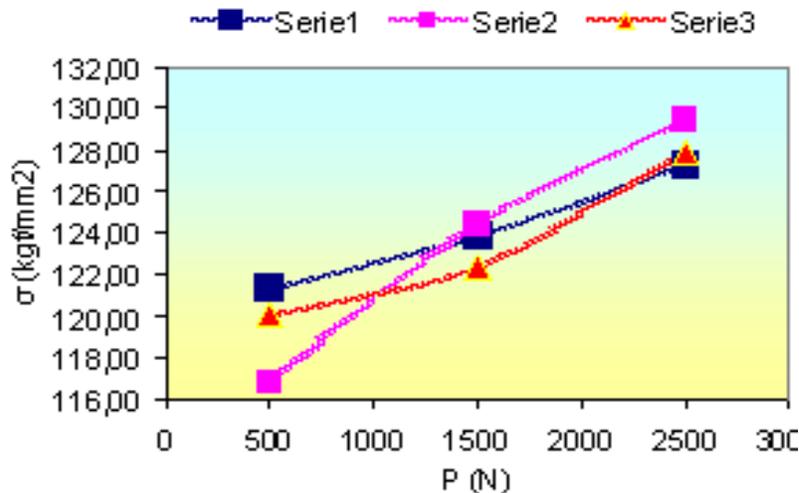


Figura 3.1. Comportamiento del esfuerzo verdadero frente a la fuerza aplicada

Según la figura 3.1 el esfuerzo real o verdadero mantiene un comportamiento uniforme y directamente proporcional en cuanto a la fuerza aplicada ya que el mismo mantiene un orden creciente en las tres series representadas en el mismo orden que crece la fuerza ensayada en el material. Cada serie presenta valores de 500 N, 1500 N y 2500 N respectivamente. De aquí podemos determinar que mientras mayor es la

fuerza que se le aplica al material para deformarlo mayor es el esfuerzo que debe de realizar la máquina de tracción para romper la probeta de dicho material mediante tensiones del tipo antes mencionado de donde se deduce que la carga es un factor fundamental en el proceso de deformación.

Para el cálculo de "n" y "k" se determinaron los ensayos de tensión realizados hasta la fractura del material, el cálculo se realizó del esfuerzo verdadero y deformación verdadera después de la zona de inestabilidad y antes de la carga máxima con un avance de 0,075, 0,125 y 0,25 respectivamente para cada una de las fuerzas aplicadas. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de "n" y "k" fueron las ecuaciones 2.7 y 2.10 respectivamente. En la figura 3.2 se presenta el comportamiento del coeficiente de resistencia "K" respecto a la fuerza de ensayo.

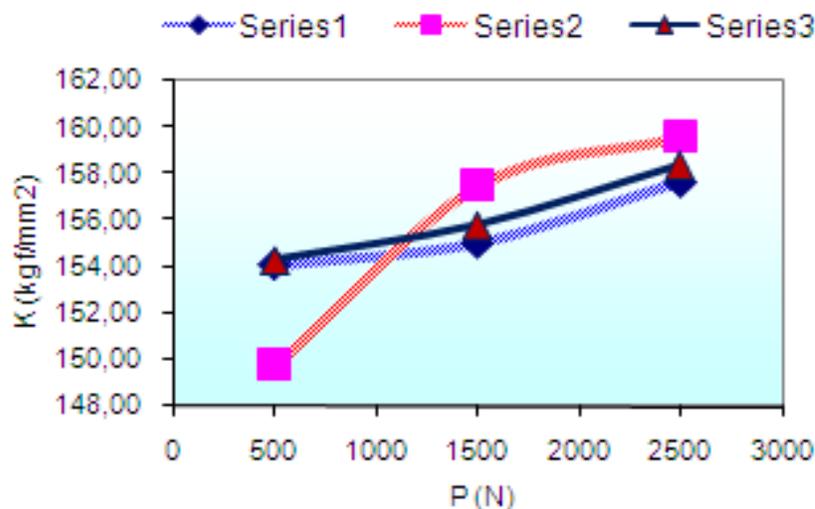


Figura 3.2. Comportamiento del coeficiente de resistencia frente a la fuerza aplicada.

En la figura 3.2 se puede observar como K es mayor en las tres series observadas con el incremento de fuerza aplicada por cada serie debido a la deformación superficial por rodadura que sufrió el material el cual es endurecido por acritud con esta deformación por lo que este coeficiente se comporta directamente proporcional al aumento de las fuerzas debido a la interacción y agrupamiento de los granos que dan lugar a la aparición de tensiones residuales entre las partículas. Esto nos demuestra que con este método el acero AISI 1045 puede tener muchas más aplicaciones en diversos casos en dependencia de las condiciones de resistencia

que se necesiten con sólo aplicarle una deformación superficial por el método de la rodadura.

En dependencia del incremento de las cargas las variables k y σ se comportan de la siguiente manera; para una fuerza de 500N el comportamiento del coeficiente de resistencia k oscila entre 149 kgf/mm² y 154,5 kgf/mm², para 1500 N está entre 155 kgf/mm² y 158 kgf/mm², y para 2500 N se comporta entre 157 kgf/mm² y 160 kgf/mm². En el caso del esfuerzo σ su comportamiento para 500 N va desde 116 kgf/mm² a 121,5 kgf/mm², para 1500 N oscila en un rango de 122 kgf/mm² a 124,5 kgf/mm² y para 2500 N se encuentra entre los 127 kgf/mm² y 129,5 kgf/mm².

3.4. Análisis del esfuerzo ingenieril para el límite de fluencia

El acero AISI 1045, normalizado y sometido a esfuerzo de tracción experimenta una reducción del área prolongado con respecto a un acero de este mismo tipo que ha sido tratado superficialmente, ya que en la superficie del mismo se ha endurecido por la acritud. Todos los materiales no experimentan la misma curva por que no presentan el mismo módulo de elasticidad. Teniendo en cuenta que el esfuerzo ingenieril en este caso para el límite de fluencia ya que estos son los parámetros justo un instante antes del acuellamiento, o sea, justo en el límite de fluencia, se calcula por la ecuación 2.5, en el proceso de deformación con rodillo este tiene su comportamiento según las diferentes cargas como se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Comportamiento de la tensión ingenieril frente a la carga aplicada.

Probetas	Fuerza (N)	S (kgf/mm ²)
1	500	42,96
2	1500	43,64
3	2500	44,43
4	500	41,63
5	1500	43,76
6	2500	45,01
7	500	42,54
8	1500	43,20
9	2500	45,95

La figura 3.3 muestra este comportamiento, en ella se puede observar como la tensión ingenieril presenta una total dependencia de la fuerza aplicada ya que a

medida que aumenta la fuerza aumenta la tensión ingenieril con una tendencia a ser iguales para una fuerza de 2 500 N.

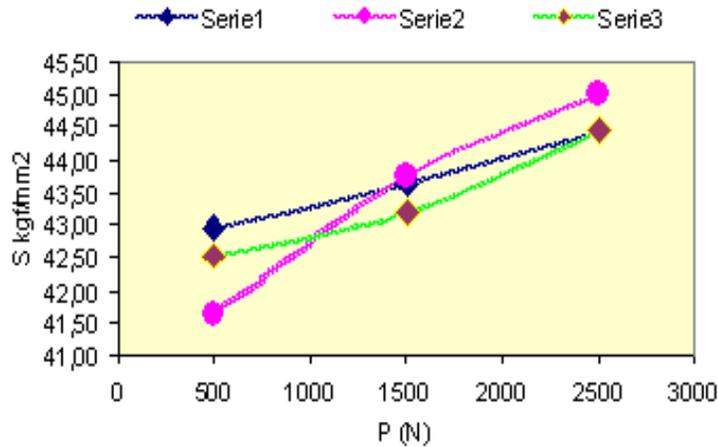


Figura 3.3. Comportamiento de la Tensión Ingenieril frente a la Fuerza aplicada

Esta tensión mantiene un comportamiento uniforme en dependencia de la carga aplicada como se muestra en las tres series representadas ya que para una fuerza de 500 N oscila entre 41,5 kgf/mm² y 43 kgf/mm², para 1500 N, esta entre 43 kgf/mm² y 43,8 kgf/mm², y para 2500 N este valor aumenta de 44,4 kgf/mm² a 46 kgf/mm², como se pudo observar en cada una de las fuerzas aplicadas por separado se incrementa el endurecimiento de la pieza durante el proceso de deformación plástica el cual se realiza de forma gradual, el flujo plástico del acero AISI 1045 es lento a partir de la primera carga aplicada, ya que el material ofrecerá mayor resistencia a ser deformado en la medida que el mismo se endurece superficialmente por acritud.

3.5. Deformación logarítmica ϵ frente a las fuerzas aplicadas

La deformación presenta variaciones en todo su trayecto respecto a las fuerzas aplicadas, hay una tendencia a disminuir desde un 0,12 % hasta un 0,06 % cuando se aplica fuerza de 2 500 N, este efecto está condicionado porque en la medida que el material endurece presenta mayor resistencia a ser deformado, esta actitud en el acero AISI 1045 está motivado a que el mismo presenta buenas condiciones para ser deformado en frío y endurecer por este fenómeno. Como se parecía en la figura la serie 2 difiere en su valor para 1500 N y para 2500 N es la serie 3 la que rompe su curso para separarse de las otras dos, esto viene condicionado porque en cada serie

se aplicaron números de revoluciones y avances diferentes, variables estas que no tienen una influencia estable en todo el proceso.

En la figura 3.4 se grafica el comportamiento de la Deformación ϵ vs P.

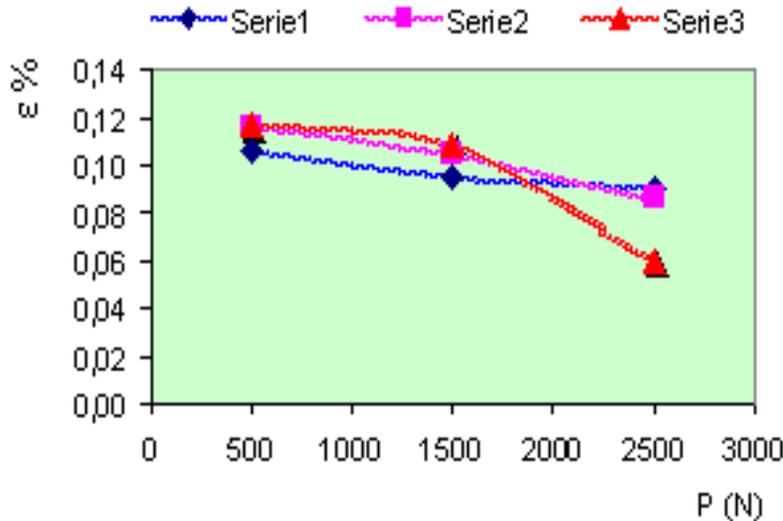


Figura 3.4. Comportamiento de la Deformación frente a las fuerzas aplicadas.

3.6. Coeficiente de endurecimiento respecto a la fuerza aplicada

El coeficiente de endurecimiento se atribuye en este caso a la capacidad del material de endurecerse mediante deformación por acritud por lo que a mayor fuerza aplicada en la superficie del material más este se endurece y menor es la capacidad de endurecimiento por deformación plástica ya que al disminuir este existen condiciones, puede convertirse en un material perfectamente plástico, o sea, puede convertirse en un material totalmente duro y a la vez frágil, esta última es la tendencia del acero AISI 1045 deformado por rodadura, de este modo el material no aceptaría ningún tipo de deformación, ya sea esta plástica o elástica, si no que al ponerlo bajo la acción de alguna carga en vez de deformar rompería instantáneamente. En este caso se calcula este coeficiente para el cuello deformado específicamente antes de la rotura.

En la figura 3.5 se puede observar como en las tres series de fuerzas aplicadas este coeficiente se comporta inversamente proporcional a la fuerza aplicada, o sea, a medida que aumenta la fuerza disminuye el coeficiente de acritud como también se le llama en este caso, el estudio de este coeficiente se hace un tanto específico ya

que a todos los materiales no se les puede evaluar por un igual comportamiento del mismo.

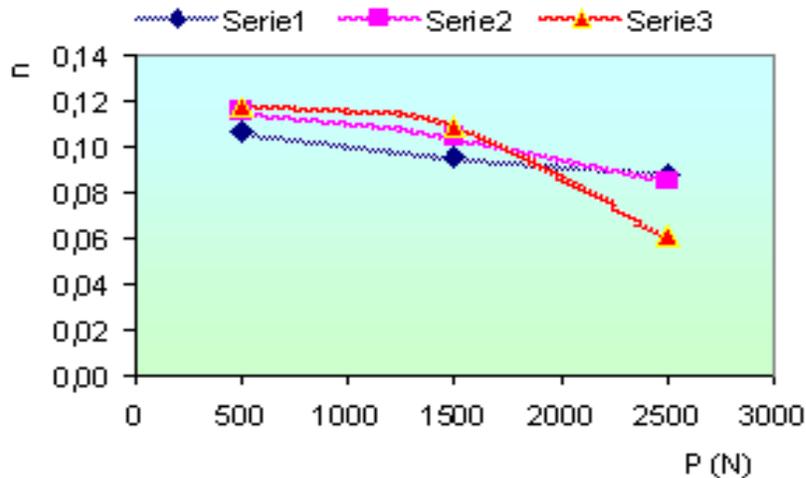


Figura 3.5. Comportamiento del coeficiente de dureza respecto a la fuerza aplicada.

No obstante como se puede apreciar su tendencia es a $n = 0,1$ manteniendo un comportamiento bastante estable por lo que se toma este valor como un límite del coeficiente acritud para el acero AISI 1045 deformado por rodadura, por cuanto estos ensayos están realizados para un margen de error del 0,2%.

3.7. Deformación real vs fuerza F

El % de deformación verdadero ϵ calculado por la ecuación 2.2 depende de la capacidad de deformar que presente el material estudiado además de que también tiene una dependencia de la deformación ingenieril "e" que se calcula por la ecuación 2.4 aunque no es esta precisamente nuestro objetivo de estudio en el trabajo.

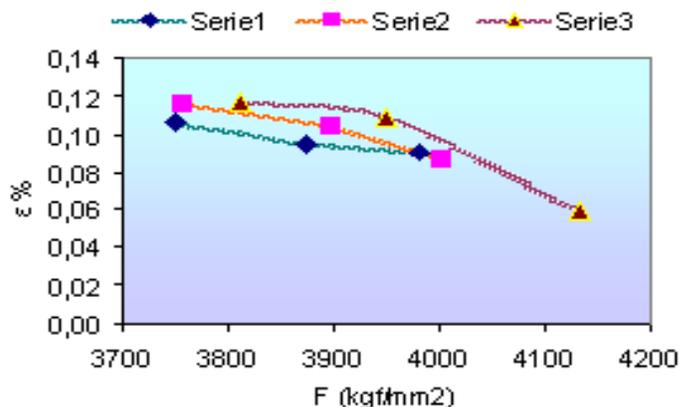


Figura 3.6. Comportamiento de la deformación verdadera ϵ frente a la fuerza F.

En la figura 3.6 se muestra el comportamiento de la deformación verdadera respecto a la fuerza aplicada por la máquina de tracción, como se puede observar a medida que aumenta la fuerza disminuye el % de deformación, este comportamiento viene influenciado porque a medida que el material deforma mayor resistencia va a ofrecer este a ser deformado y por tanto menor va a ser la capacidad de deformar del material. Esto viene dado de esta manera debido a que para los estudios realizados sólo se tomó la parte de la deformación plástica en el ensayo de tracción.

3.8. Comportamiento de la deformación verdadera frente al esfuerzo verdadero

En este caso se podrá observar el comportamiento de la curva tenso – deformacional pero ya analizada para su modelo real de la forma $y = ax^b$ que es la forma de la ecuación de Hollomon $\sigma = K\varepsilon^n$ la cual rige todo el procedimiento de cálculo para determinar los parámetros de dureza del acero AISI 1045 deformado por el método de la rodadura. Como se puede observar en la figura 3.7 se observa las tres series de este comportamiento para el cual ε decrece con el aumento del esfuerzo σ comportamiento este que tiene una explicación similar al comportamiento de ε respecto a F , pues mientras mayor esfuerzo realiza la máquina para deformar el material más este se endurece y menor va a ser el % de deformación en cada instante. Esto ocurre porque a medida que el material endurece menor va a ser la elongación ingenieril. La diferencia entre las series viene dada porque a cada serie se le aplicaron avances y números de revoluciones distintos, parámetros estos que no tienen una influencia homogénea en todo el proceso.

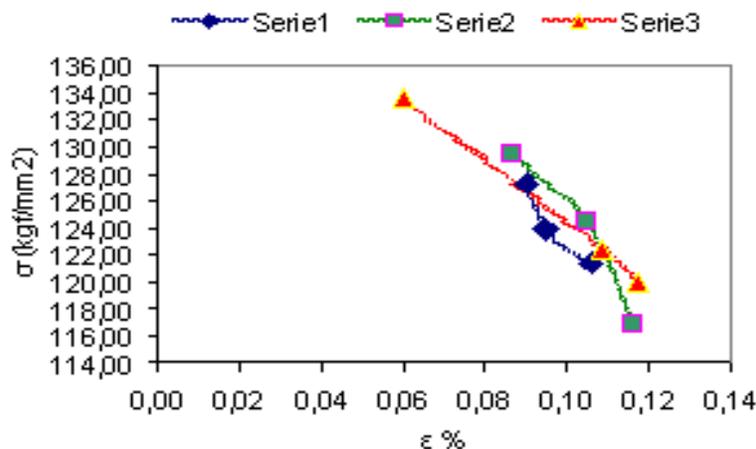


Figura 3.7. Comportamiento de la deformación verdadera respecto al esfuerzo verdadero

No obstante este % de deformación oscila alrededor de 0.1%, en relación con los experimentos antes realizados con el acero AISI 1045 sometidos a otros tratamientos y sin tratamiento alguno se puede observar que la deformación prácticamente no varía con el empleo del tratamiento sea cual fuere este no siendo así con el esfuerzo que si aumenta con la deformación superficial del material y con la fuerza aplicada como se a analizado en anteriores epígrafes.

3.9. Valoración económica

Para la realización del análisis económico se toma como referencia el tiempo de ejecución obtenido durante cálculo de los parámetros de trabajo en máquinas computadoras en la elaboración de las simulaciones.

Tabla 3.10. Costo por concepto de tiempo para equipos eléctricos.

Por concepto de consumo diario				
Cantidad de equipos	Consumo (kW/h)	Tarifa (\$/kW)	Tiemp (h)	Costo _{Co} (\$)
2 – lámparas	0,16	0,04	2	0,124
1 - lámpara	0,02			
1- Computadora	0,25			
1 - Aire acondicionado	1,12			
Días trabajado en la realización del trabajo:48				
Costo total de días trabajado: 5,952 CUC				

3.10. Impacto medio ambiental

Las nuevas tecnologías impactan la vida económica, política, cultural e ideológica de cada nación.

En la actualidad, son muchos los países que por constituirse en "sociedades informatizadas", han incorporado las nuevas tecnologías sin distinguir las condiciones sociales, culturales e históricas de las realidades de cada país.

Es importante señalar que las TIC hoy actúan como un importante motor del crecimiento porque a sus ventajas económicas en términos de valor añadido, productividad y empleo, se suman otras relacionadas con su carácter interconectivo bidireccional, que permite la transmisión y generalización de ventajas y experiencias entre diferentes regiones y ambientes.

Internet nos pone de cara al futuro, hacia la multialfabetización, que aborda no sólo la habilidad de saber leer y escribir para recibir y procesar información, sino también la habilidad para recibir y procesar muchas clases diferentes de información que nos llega a través de diferentes canales. Estos componentes tienen que ser caracterizados dentro de la "nueva alfabetización informativa" que involucra una alfabetización: visual, tecnológica, organizativa, mediática y cultural. Si la sociedad no desarrolla destrezas elementales para utilizar estas nuevas tecnologías perderán el control sobre su propio destino.

Asimismo hay que tener en cuenta sus implicaciones en la vida social, como es la disminución de la interacción personal, ya que se disminuye la comunicación interpersonal, lo cual es preocupante porque en el proceso educativo no solamente se enfatiza el incremento del conocimiento, sino el desarrollo de valores y reglas de comportamiento para una convivencia saludable.

La voz de alerta es que los países latinoamericanos serán capaces de defender su identidad cultural frente al inminente proceso de globalización solo si se supera el espejismo que las nuevas tecnologías han provocado en la sociedad y se le otorga su auténtico lugar en el espacio técnico. Acompañando a ello la dación de políticas comunicacionales que controlen la penetración de valores, hábitos y costumbres ajenos a los suyos.

La alerta sobre las promesas de la tecnología está en que meditemos sobre ellas, las cuales lejos de ayudarnos a la superación de nuestros grandes problemas sociales e históricos nos lo pueden estar agravando. Aparejada con la tecnología viene la pérdida de identidad de las naciones, la incorporación de valores ajenos a nuestros principios, la deshumanización, el incremento del individualismo y la profundización de las desigualdades sociales existentes. Deterioro cualitativo de la vida laboral, pérdida del sentido del trabajo y aumento de la monotonía, disminución de las posibilidades de cooperación, exigencias de cualificación del personal que se traduce en mayores exigencias de perfeccionamiento constante sacrificando el tiempo libre.

Surge entonces la necesidad de formular políticas democráticas nacionales en el sector de la información y de la comunicación que sean integradas, políticas que

tiendan a la preservación de los genuinos valores culturales de los pueblos, así como hay que implementar mecanismos que evalúen el impacto de las nuevas tecnologías. Dicha evaluación debe partir desde una óptica ética -social y política.

El efecto beneficioso de la ciencia y la técnica lo determinan, en lo fundamental, los hombres que controlan su desarrollo y utilización, de modo que para convertir en realidad el progreso y bienestar que ellos pueden ofrecer, se requiere en primer lugar de una organización social capaz de subordinar el fruto de la actividad humana a los intereses vitales de la sociedad como un todo, y no a la de un grupo ávido de ganancias y poder.

Este trabajo no está exento de los riesgos ambientales que en este medio serían perjudiciales aunque presenta muchas ventajas en cuanto a conocimiento profesional se refiere. También trae como consecuencia que el profesional que emplea la tecnología necesaria para desarrollarlo pueda crear en su mente una conexión con informaciones análogas en el ámbito de la comunicación que aún no estaría preparado para procesarlas de tal forma que pueda crear confusión en la forma de pensar del individuo.

Además de la influencia de las TIC también se tiene que resulta perjudicial el roce constante con aglomeraciones de personas que trabajan en un mismo local empleando las mismas tecnologías para sus necesidades profesionales, esto trae consigo riesgos de contraer enfermedades que en nuestro país generalmente son gripes o aún más peligrosas como lo es hoy en día la influenza AH1N1.

3.11. Conclusiones del capítulo III

- ✓ Por medio de los valores obtenidos del ensayo de tracción y los cálculos de la resistencia máxima, junto con el de las tensiones de rotura de cada probeta fabricada de acero AISI 1045 y endurecida por deformación plástica superficial con rodillo, se pudieron construir y analizar todos los gráficos pertinentes para obtener un perfil amplio del comportamiento de los parámetros de dureza del material antes mencionado.
- ✓ Se desarrolló un estudio minucioso con el empleo de la metodología reflejada en el capítulo 2 donde se observa una síntesis generalizada de la tendencia numérica de los parámetros de dureza del acero AISI 1045 deformado por rodadura y luego traccionado.
- ✓ La ocurrencia del endurecimiento a través del mecanismo de deslizamiento se produce a consecuencia del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos y el aumento de la acritud.

Conclusiones Generales

- ✓ Al comparar el valor del esfuerzo máximo obtenido de la probeta patrón $\sigma = 67,4$ kgf/mm² con los mínimos y máximos obtenidos de este trabajo se puede observar que hay un aumento notable con oscilaciones de 116,82 kgf/mm² y 133,51 kgf/mm².
- ✓ Se desarrolló el procedimiento de cálculo requerido para la determinación del coeficiente de endurecimiento "n" en el acero AISI 1045 deformado por rodadura y luego traccionado, para el cual "n" toma valores cercanos a 0,1 y con el cual hemos podido determinar que este procedimiento incrementa en este acero el perfil en cuanto a su uso industrial.
- ✓ Económicamente no resulta un trabajo costoso ya que el mismo sólo requiere de tiempo y de una computadora como máximo consumidor de energía sin embargo en el caso medioambiental si presenta severos riesgos debido al momento que se está viviendo para con las enfermedades que abundan hoy en día esto unido a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y su repercusión en el medio ambiente.



Recomendaciones

- ✓ Emplear el procedimiento de cálculo desarrollado en el capítulo 2 para un posterior estudio de los parámetros de dureza del acero AISI 1045 deformado por rodadura para ensayos entonces de compresión.
- ✓ Hacer un análisis al acero AISI 1045 deformado por rodadura pero ya en este caso para determinar el comportamiento de las tensiones triaxiales para facilitar aún más el trabajo con el mismo.

Referencias Bibliográficas

1. Álvarez, E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J. C, Barr, J. Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II. Universidad de Buenos Aires.Facultad de Ingeniería, 2004.
2. Badiola, V. Materiales Departamento. Ingenierías Mecánica, Energética y de Materiales, Diseño de Máquinas I, 2004, España.
3. Bezkorovainy P, Borns T. y Rasmussen K. (2002): "Strength Curves for Metal Plates in Compression". Research Report N^o R 82
4. Boyle, J. y Spence, J. Stress analysis for creep. Londres: Butterwoths, 1989.
5. Callister W Jr. Materials Science and Engineering. An Introduction. New York (EE.UU): John Wiley and Sons, 1991, p. 132.
6. Datsko J. Material Properties and Manufacturing Processes. New York (EE.UU): John Wiley and Sons, 1991.
7. Dieter, G. Metalurgia Mecánica MacGraw - Hill Book Company, Inc 1967.
8. Hill H. N. (1945): "Determination of Stress – Strain Relations from "Offset", Yield Strength Values", National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Technical Notes 927.
9. Hill R. (1998): "The Mathematical Theory of Plasticity", Clarendon Press, Oxford
10. Hollomon, Tensil Deformation, Trans. AIME, Vol. 162, pp 268, 1945.
11. James M.R. In Handbook of Measurement of Residual Stresses, Edited by J. Lu, Society for Experimental Mechanics, Inc., pp. 1 - 4. 1996.
12. James M.R. y Buck O. Quantitative Non - destructive Measurements of Residual, Stresses, CRC, Critical Reviews in Solid State and Materials Science, Vol. 9, Issue 1. 1980.
13. Jonson W. and Mellor P. B. (1973): "Engineering Plasticity". Van Nostrand Reinhold Editorial, London.
14. Kishore R, Sinha TK. Metall. Mater. A 1996; 27A (10): 3340 – 3343.

15. Korotcishe, L. Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Mir. Moscú. 1989. Pág 53 - 64.
16. Klemola. H. J. and Nieminem M. A. (1974): "On the Strain – Hardening Parameters of Metals", Metallurgical Transactions, Vol. 5, pp. 1863 – 1866.
17. Low, Properties of Engineering Materials, ASM, 1949.
18. Ludwigson, D. Modified Stress-Strain Relation for FCC Metals and Alloys, Metallurgical Transactions, Vol. 2, pp 2825-2828, 1971.
19. Ludwik. P, Elemente der Technologischen Mechanik, Springer Verlag OHG, Berlin, 1909.
20. Macdonald M, Rhodes J. y Taylor G. (2000): "Mechanical Propierties of Stainless Steel Lipped Channels", Proceedings, 15 Internatiomal Speciality Conferenced of Cold Formed Steel Structures. Eds RA La Boube and W – W Yu, University of Missouri Rolla, pp. 673 – 686.
21. Macherauch E. y Kloos K.H. Proc. Int. Conf. Residual Stresses in Science and Technology, Vol. 1, Garmisch-Partenkirchen, DGM-Verlag, Oberursel, 1986. pp. 3 - 26.
22. Mallo, M. Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93 - 121 y 145 - 152.
23. Masubuchi K. Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Elmsford, N.Y. 1980
24. Martynenko, O. V, "The interconnection of strained condition in the area of contact with the kinematics of points of deformed surface points by the rollers plastic deformation of the surface", Proceeding of Fundamental and application problems of machine building technology International Conference, Technology 2002, March 1 - September 10, 2002, Tula Technical University, Russia.
25. Mazein, P.G. Prusakov, D.V., Tchunin, A.V. Modelling the residual stresses and deformation during a surface plastic deformation operations, Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center, Issue #1, (10). January - March 2001, Russia.

26. Moreno, P.A. "Una teoría discreta de dislocaciones en redes cristalinas "Dpto. Mecánica de medios continuos. Universidad de Sevilla. Obtenido de la Red mundial el Lunes 28 de Febrero de 2005.
27. Mechanical metallurgy, George E. Dieter. 3° Edition.
28. Norris, D., Moran, B., Scudder, J. y Quiñones, D. A computer simulation of the tension test. Journal of Mechanics, Physics and Solids, tomo26:págs. 119,1978.
29. Olsson A. (2001): "Stainless Steel Plasticity – Material Modelling and Structural Applications", PhD Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, Sweden.
30. Ono K. (1972): "Strain – Hardening Equations and Uniform Strain", Metallurgical Transactions, Vol. 3, pp. 749 – 751.
31. Ortiz, M. y Popov, E. Distorsional hardening rules for metal plasticity. Journal of Engineering Mechanics, tomo109, nº 4: págs.1042 - 1057, 1983.
32. Pero Sanz, J.A. "Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 1999. España.
33. Pogodin, G.I y otros. "Procesos tecnológicos progresivos en la construcción de maquinaria", Editorial Pueblo y Educación, 1979.
34. Ramberg W. y Osgood W. (1943): "Determination of Steel – Strain Curves by Thre Parameters", National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Technical Notes 902.
35. Rasmussen K. (2003): Full – range stress – Strain curves for Stainless Steel Alloys", Journal of Cosntructional Steel, Researh 59, pp. 47 – 61.
36. Rasmussen K., Borns T, Bezkorovainy P. y Bambach M. (2002): "Numerical Modelling of Stainless Steel Plates in Compresion". Departament of Civil Engineering, The University of Sydney, Research Report N ° R 813.
37. Ratke L, Welch P. Metalkunde 1983; 74 (4): 226 – 232.
38. Robert, R. Reed-Hill. Principios de metalurgia física, 1971.



39. Samuel. K, Limitations of Hollomon and Ludwigson Stress-Strain Relations in Assessing the Strain Hardening Parameters, Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 39, pp. 203-212 (2006).
40. Smith, W.F. "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los materiales", Mc Graw-Hill, 2001, España.
41. Swift, Plastic Instability under Plane Stress, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 1, pp 1-18 1952
42. Voce, The Relationship between Stress and Strain for Homogeneous Deformation J. Inst. Met., Vol. 74, pp 537-562, 1948.