

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



MODELACION DE LA FABRICACION DE TUBERIA POR
EL METODO DEL ELEMENTO FINITO

POR

SALVADOR ALMAGUER RENTERIA

TESIS

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

CD. UNIVERSITARIA

MAYO DE 1998

TM
Z5 85 3
.M2
FIME
1998
A4

ASSOCIAZIONE ITALIANA FARMACIA PER
L'AMBITO DI TUBERIA PER

IL MESE DI OTTOBRE

OTTINERTE OTTOBRE



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

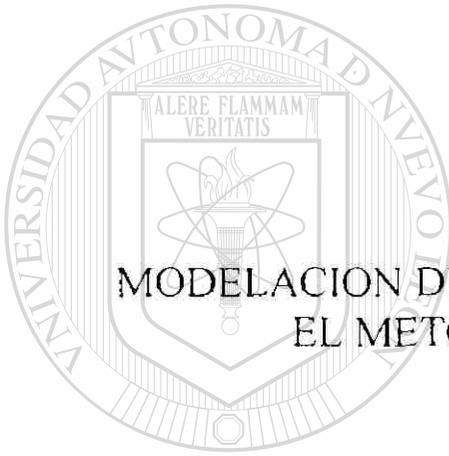
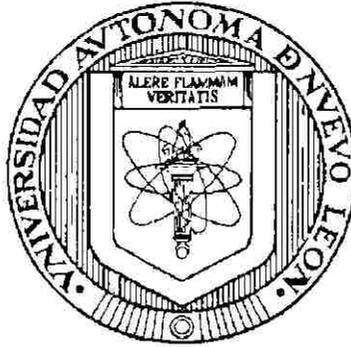


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



MODELACION DE LA FABRICACION DE TUBERIA POR
EL METODO DEL ELEMENTO FINITO

POR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

SALVADOR ALMAGUER RENTERIA

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



TESIS

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

CD. UNIVERSITARIA

MAYO DE 1998

TM
Z5853
.M2
FIME
1998
A4

0119-16060



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

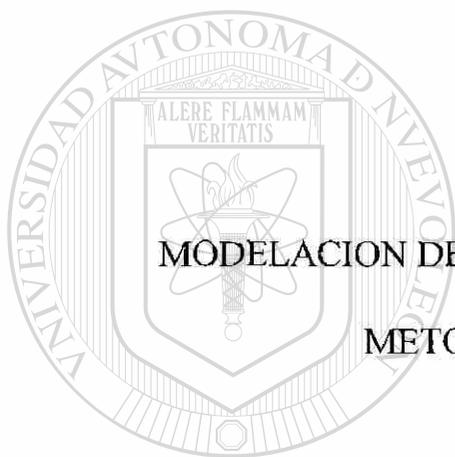
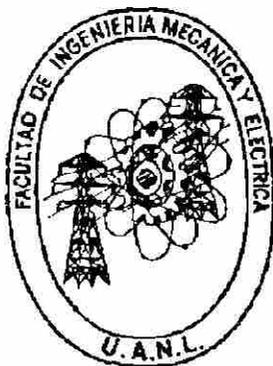
**FONDO
TESIS**

®

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



MODELACION DE LA FABRICACION DE TUBERIA POR EL
METODO DEL ELEMENTO FINITO

POR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

SALVADOR ALMAGUER RENTERIA

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

MECANICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

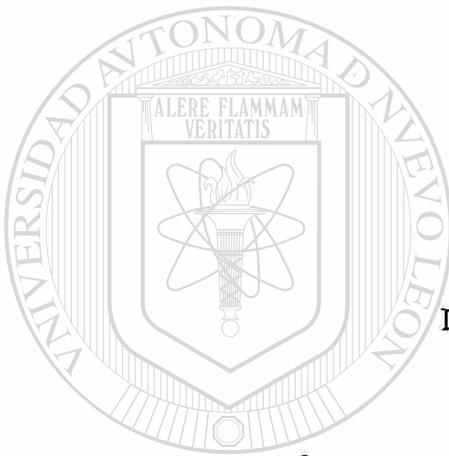
CD. UNIVERSITARIA

MAYO DE 1998

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Modelación de la fabricación de tubería por el método del elemento finito" realizada por el Ing. Salvador Almaguer Renteria sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El comité de Tesis



Asesor
Dra. Martha Patricia Guerrero Mata



Coasesor
Dr. Rafael Colás Ortiz



Coasesor
Florentino Fernández Guzmán



Vo.Bo.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L., Mayo de 1998.

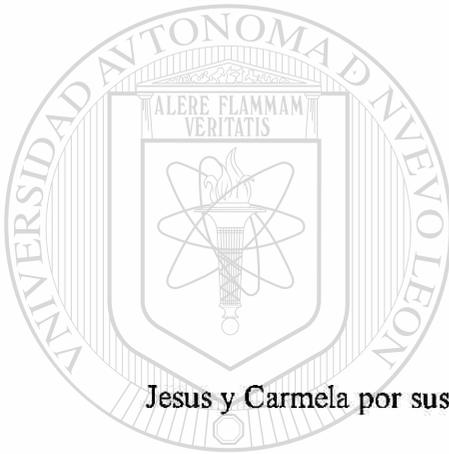
DEDICATORIA

A DIOS

Por darme la vida.

A GABY

Por su amor y apoyo en todo momento. TE AMO.



A MARIANA

Por darme la alegría de ser padre.

A MIS PADRES

Jesus y Carmela por sus sabios consejos para que pudiera salir adelante en la vida y a quienes les debo todo lo que soy.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

A MIS HERMANOS

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Francisco, Lourdes, Mónica, Jesús, Julia, Carmen, José y Lidia, por su apoyo

incondicional que un hermano siempre brinda. A mis cuñadas, cuñados y sobrinos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero para la realización de mis estudios.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, dentro de ella al Doctorado en Ingeniería de Materiales (DIMAT) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica donde realicé mis estudios de Maestría.

A la empresa TUBACERO y dentro de ella al Dr. Florentino Fernández, por la facilidad para la realización de esta investigación.

A la Dra. Martha P. Guerrero por su apoyo y sugerencias para realizar este trabajo.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Rafael Colás por sus consejos, paciencia y valiosa amistad.

Al M.C. Castulo E. Vela Villarreal Director de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por su ayuda brindada.

Al Dr. Alberto Pérez por su amistad y disponibilidad de ayuda en cualquier momento.

A todos mis profesores del DIMAT.

A mis amigos Miguel Yescas, Víctor, Tomi, Domel, Pablo, Carlos Flores, Juanelo, Octavio y al Rafa mi segundo hijo.

A toda la raza del DIMAT.

A mis compañeros de GALVAK.

Al Tío Pepe que me dio tantos momentos de sano esparcimiento.

A mi querida INDY.

INDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	1

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

1.1 INTRODUCCION	2
1.2 FABRICACION DE TUBOS	2
1.3 TIPOS DE SOLDADURA	5
1.3.1 SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA (ERW)	5
1.3.2 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (DSAW)	7

CAPITULO 2 METALURGIA FISICA DEL CONFORMADO DE MATERIALES

2.1 INTRODUCCION	9
2.2 TIPOS DE DEFORMACIONES	9
2.3 ENSAYO DE TENSION	10
2.4 CURVAS DE FLUENCIA	13
2.4.1 ECUACION DE LUDWICK	14
2.4.2 ECUACION DE HOLLOWMAN	15
2.5 TEORIA DE PLASTICIDAD	16
2.6 CRITERIOS DE FLUENCIA	25

CAPITULO 3 MODELACION DEL CONFORMADO

3.1 INTRODUCCION	28
3.2 METODOS DE MODELACION	29
3.2.1 METODO DE ELEMENTO FINITO	30
3.2.2 PUNTO DE VISTA DE LAGRANGE Y EULER	34
3.2.3 INCREMENTOS DE TENSION	35

3.2.4 METODO IMPLICITO Y EXPLICITO	36
3.2.5 MATERIAL Y PARAMETROS	37
3.2.6 CONDICIONES A LA FRONTERA	38
3.3 ANALISIS ESTATICO NO-LINEAL	38
3.4 TECNICAS ITERATIVAS	39
3.4.1 METODO NEWTON-RAPHSON	39
3.4.2 METODO NEWTON-RAPHSON MODIFICADO	40
3.5 CRITERIOS DE CONVERGENCIA	40

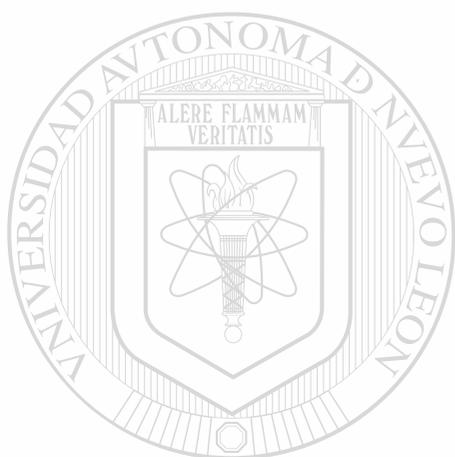
CAPITULO 4 EXPERIMENTACION Y MODELACION

4.1 INTRODUCCION	41
4.2 EQUIPO UTILIZADO	42
4.2.1 GENERALIDADES NISA/DISPLAY	42
4.2.1.1 PREPROCESADOR	43
4.2.1.2 PROCESADOR	43
4.2.1.3 POSPROCESADOR	43
4.3 EXPERIMENTACION	44
4.3.1 RECOPIACION DE MUESTRAS	44
4.3.2 PREPARACION DE MUESTRAS	46
4.3.3 ENSAYOS DE TENSION	47
4.4 MODELACION POR ELEMENTO FINITO	47
4.4.1 MOLINO DE CONFORMADO	47
4.4.2 MODELADO TRANSVERSAL DE LA PLACA	48
4.4.3 MODELADO LONGITUDINAL DE LA PLACA	50
4.4.4 ELEVACION DE LA PLACA	51

CAPITULO 5 RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 INTRODUCCION	53
5.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES	53
5.2 MODELACION POR FEM	60

5.2.1 MODELACION DE LA SECCION TRANSVERSAL	61
5.2.2 MODELACION DE LA SECCION LONGITUDINAL	64
CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS	70
LISTA DE FIGURAS	73
LISTA DE TABLAS	77



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



RESUMEN

La fabricación de tubería de gran diámetro involucra muchas variables que hacen más difícil la predicción de las propiedades finales del material. Muchas de estas variables no se consideran en el diseño tradicional del proceso.

Una alternativa para las predicción de las condiciones finales del material, es el uso del método de elemento finito, ya que éste puede modelar el proceso, para no recurrir a la comúnmente usada técnica prueba y error.

En la presente investigación se realizó una modelación del proceso de conformado de tubos de gran diámetro que utiliza una empresa local líder en el ramo. Debido a las dimensiones de los tubos, es muy difícil predecir los estados de esfuerzos y deformaciones del material por técnicas comunes. Mediante una serie de formulaciones que obedecen a la teoría de la plasticidad, que fueron alimentadas a un sistema de computación, se calculó una relación de esfuerzos y deformaciones.

A la par de esta modelación se realizó una experimentación en muestras tomadas en campo y se caracterizaron. Se realizó una comparación entre la modelación y la experimentación. Los resultados de esfuerzo y deformación obtenidos por ambas técnicas fueron comparados entre si y se llegó a la conclusión que la modelación por el método de elemento finito refleja al proceso de fabricación.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

1.1 INTRODUCCION

Los tubos son utilizados para muchos fines y pueden ser producidos mediante diversos métodos de conformado y éstos pueden ser en frío o en caliente. También se pueden obtener tubos de grandes dimensiones mediante procesos de colada. Pero aquí el enfoque será a tubos de gran diámetro fabricados a partir de una sola placa por el proceso de conformado en frío y con costura por soldadura de resistencia eléctrica y por arco sumergido.

1.2 FABRICACION DE TUBOS

Esta sección trata de la metodología para la fabricación en frío de tubos de gran diámetro por soldadura de resistencia eléctrica (ERW) y doble arco sumergido (DSAW). El proceso consiste en conformar en frío la placa de acero en forma cilíndrica, previo a la operación del soldado. La geometría cilíndrica se logra pasando la lámina por un grupo continuo de rodillos, con diferentes dimensiones cada uno, que van cambiando progresivamente la forma de la placa. Este es el método conocido como formado en rodillos a través de un molino similar a un molino de laminación tradicional.

El molino que se estudió es un molino de cuatro pasos de preforma y tres finales (figura 1.1).

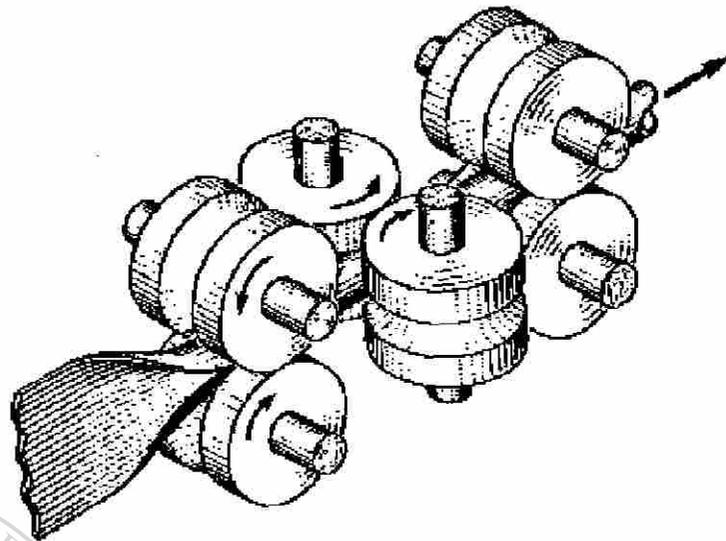


Figura 1.1. Placa conformada en un molino de laminación.

La unidad para soldar se coloca en el extremo de la máquina formadora, y consta de dos rodillos angulares que sirven de ajuste y alineación y tres para centrar y presionar, mismos que mantienen en posición la pieza formada. Entre el molino de laminación y la unidad para soldar se encuentran dos contactos, que suministran la corriente requerida para generar el calor de soldadura (figura 1.2), enfrente de la unidad para soldar se encuentra un dispositivo para remover la rebaba que se formó en el proceso de soldado por resistencia eléctrica en el tubo.

Debido a que en la parte de contacto se alcanzan temperaturas superiores a 1200°C y, por la presión ejercida, existe un desplazamiento de material tanto en la parte interior como en la exterior del mismo.

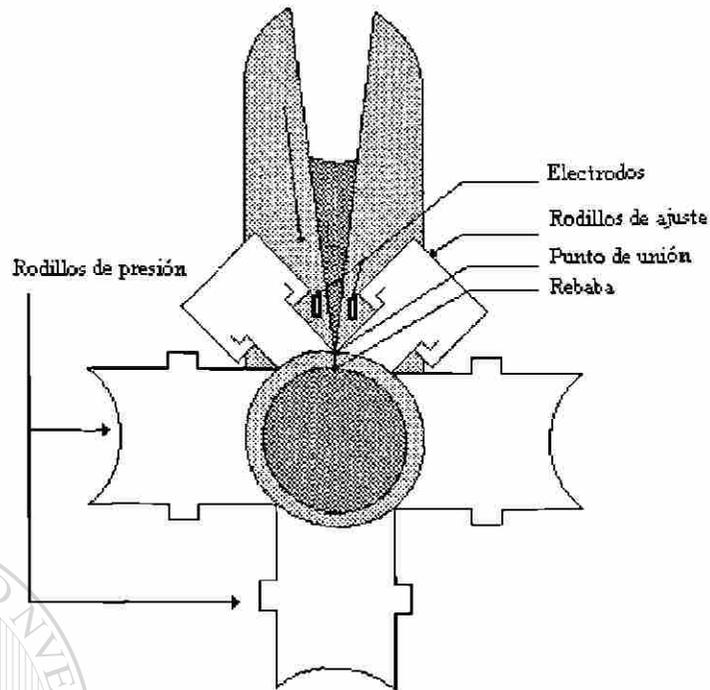


Figura 1.2. Soldadura continua de tubos de acero, a tope por el proceso de alta frecuencia (ERW) resistencia.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Después de que el tubo ha sido soldado pasa el tratamiento de normalizado en su soldadura para reducir esfuerzos residuales. Una vez normalizado el tubo, éste pasa por un juego de rodillos calibradores y de acabado para completar la operación, dándole el tamaño correcto, concentricidad, así como para asegurar una linealidad a lo largo de él. Los tubos de gran diámetro usualmente, se fabrican por soldadura de arco sumergido después de haber sido formados y soldados en grandes prensas especialmente construidas para ello.

1.3 TIPOS DE SOLDADURA

1.3.1 SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA (ERW)

Haciendo un poco de historia se puede decir que el origen de este proceso se remonta hacia finales del siglo XIX y fue utilizado primeramente por Elihu Thompson¹, su origen surgió por la necesidad primordial de la producción masiva de partes que requieren operaciones sencillas de soldadura. Cabe mencionar que debido a que este estudio está enfocado al conformado de tubos de gran diámetro, el proceso de soldadura por resistencia eléctrica será considerado como un proceso de punteado previo al proceso de soldadura por arco sumergido. Este proceso consiste en pasar una alta corriente eléctrica por los metales que se van a unir, lo que causa un calentamiento local y la soldadura se complementa por la aplicación de presión. Cuando la corriente pasa por el metal, la resistencia máxima se encuentra en el punto de contacto; por lo tanto el mayor efecto de calentamiento se presenta en este punto. En la figura 1.3 se puede observar, de forma esquemática, como la corriente que se suministra al tubo es conducida hacia la parte que se requiere soldar.

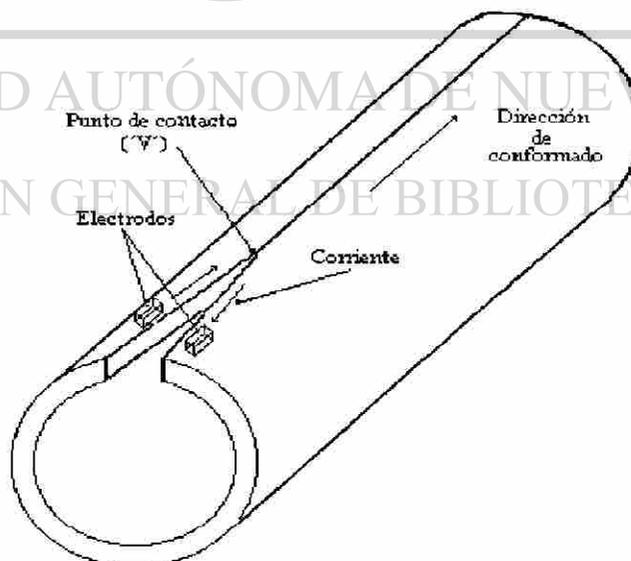


Figura 1.3. Flujo de Corriente.

Generalmente se usa corriente alterna que llega a la máquina con los voltajes comerciales habituales. Un transformador en la máquina reduce el voltaje de 4 a 12 V y eleva el amperaje lo suficiente como para tener el calentamiento adecuado. La potencia necesaria es de 4 a 6 kVA/cm², basada en un tiempo de aplicación de alrededor de 10 seg. Para otros intervalos de tiempos, la potencia varía inversamente con él. La presión necesaria para efectuar las soldaduras en los aceros, varía de 280 a 560 kg/cm².

La soldadura por resistencia es un proceso que está adaptado a la unión de metales de diferentes calibres como es la producción de tubos. Generalmente el equipo es adecuado para un solo tipo de trabajo y debe llevarse el material a la máquina. Es un proceso que permite una aplicación regulada y precisa del calor. Asimismo, la operación es extremadamente rápida si se compara con otros tipos de soldadura^{1,2}.

En todas las soldaduras por resistencia existen muchos factores que se requieren tener en cuenta, pero tres de éstos deben considerarse de una forma rigurosa y están expresados en la relación³:

$$H = I^2 R t \quad (1.1)$$

donde H es el calor, I es la corriente de la soldadura, R es la resistencia del metal que se va a soldar y t el tiempo².

Estas tres variables (corriente, resistencia y tiempo) deben manejarse cuidadosamente y deben ser determinadas en función de factores tales como espesor del material, tipo y tamaño de los contactos, con el fin de producir buenas soldaduras.

El factor tiempo de aplicación de la corriente de soldadura es muy importante, ya que debe haber un lapso ajustable después de que se ha aplicado la presión hasta el momento de iniciar la soldadura. La corriente se conecta y se mantiene el periodo suficiente para la unión, luego se desconecta, pero la presión permanece aplicada, hasta

que el metal se enfría y, en esta forma, los electrodos no producen arcos eléctricos. La presión sobre la soldadura puede obtenerse, por medios mecánicos, por presión del aire, por resortes o presión hidráulica. Su aplicación debe controlarse y coordinarse con la aplicación de la corriente de soldadura.

El amperaje secundario o de soldadura queda determinado por el transformador. Para tener la posibilidad de variar la corriente secundaria, el transformador está equipado con un regulador, que varía el número de vueltas de la bobina primaria³.

1.3.2 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (DSAW)

El nombre de este proceso es debido a que el arco del metal se encuentra cubierto por una masa granular fusible (fundente) durante la operación de soldadura. Aparte de esta característica, su operación es bastante similar a otros métodos automáticos de soldadura por arco. En esta operación se alimenta un electrodo desnudo a través del cabezal soldador al material granular, como se muestra en la figura 1.4. Este material se extiende a lo largo de la costura que se va a soldar y toda la acción se efectúa debajo de él. El arco es iniciado cuando el electrodo entra en contacto con el tubo bajo el fundente o colocando algún medio conductor, tal como lana o fibra metálica. El intenso calor del arco produce inmediatamente un charco de metal líquido en la junta y al mismo tiempo derrite una parte del fundente granular. Este material flota sobre el metal fundido, formando una cubierta que elimina las pérdidas por salpicadura y protege la junta soldada contra la oxidación. Al enfriar, la escoria fundida se solidifica y se remueve fácilmente. El material granular que no se funde, se recupera y se usa nuevamente.

Este proceso está limitado a soldaduras planas aún cuando pueden hacerse con inclinaciones ligeras o en uniones circulares. Es conveniente usar un apoyo de acero, cobre o algún material refractario en la junta para evitar la pérdida de metal fundido. El proceso usa corrientes altas², de 300 a 1200 amperes, que permiten altos valores en la transferencia de corriente hacia el metal y altas velocidades de soldadura. Se obtiene una

penetración profunda, por lo que la mayor parte de los espesores comerciales de placa se pueden soldar con un solo paso. Es posible soldar placas delgadas sin preparación mientras que sólo se requiere una pequeña muesca en forma de V en las de mayor espesor. La mayor parte de las soldaduras de arco sumergido se hacen sobre aceros de bajo carbono y de aleación, pero pueden también usarse en muchas aleaciones no ferrosas¹.

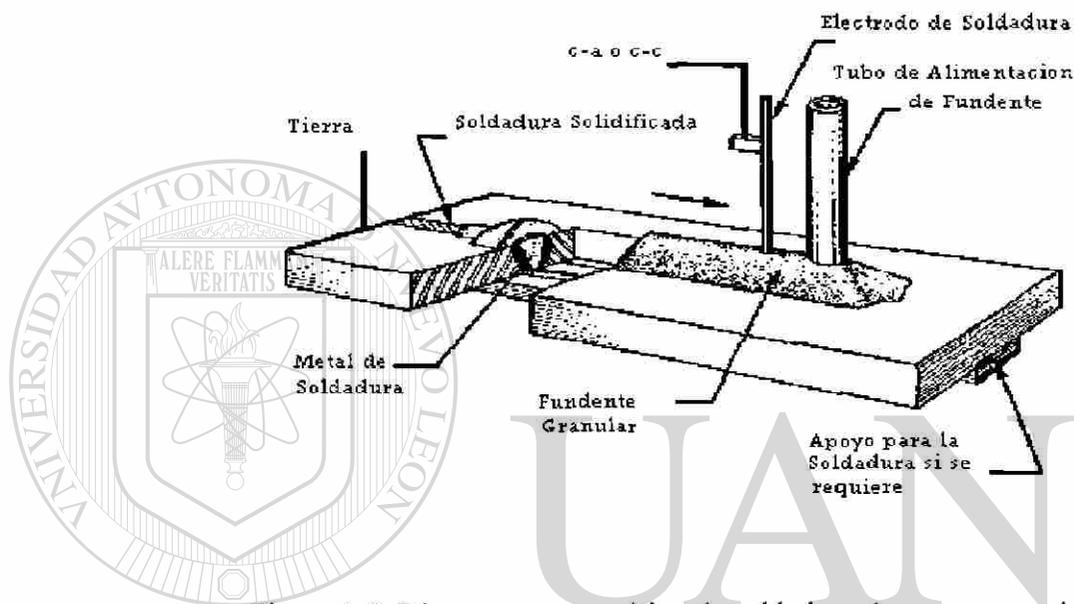


Figura 1.4. Diagrama esquemático de soldadura de arco sumergido.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 2

METALURGIA FISICA DEL CONFORMADO DE MATERIALES

2.1 INTRODUCCION

Sería innecesario conformar materiales si estos se pudiesen colar, conservando buenas propiedades mecánicas, con la amplia variedad de formas y tamaños exigidos por la industria. Sin embargo, esto está lejos de ser técnicamente posible. En todos los procesos de conformado el material se deforma permanentemente debido a la fuerza que se aplica. Uno de los propósitos de este capítulo es el de presentar la relación matemática que existe entre el esfuerzo aplicado a un material y la deformación que éste experimenta.

Con la finalidad de conocer la relación entre la cantidad de deformación y la magnitud del esfuerzo.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS 2.2 TIPOS DE DEFORMACIONES

El formado mecánico de los materiales se logra mediante la aplicación de fuerzas externas de magnitud necesaria como para modificar su forma externa. Las formas de deformación que pueden experimentar los cuerpos debido a la aplicación de una fuerza se pueden clasificar en tres tipos, dependiendo del proceso de conformado. Estos tipos se ejemplifican en la figura 2.1.

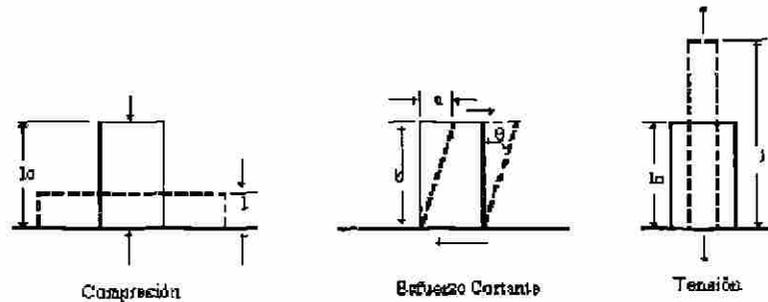


Figura 2.1. Tipos de deformaciones que puede experimentar un cuerpo.

La deformación que sufre la pieza se define geoméricamente en términos de las dimensiones originales y finales. En los casos de compresión y tensión, la deformación (e) está dada por:

$$e = (l - l_0) / l_0 \quad (2.1)$$

donde l y l_0 son las longitudes final e inicial, respectivamente, con lo que el valor en compresión de la deformación es negativo y en tensión es positivo.

Al aplicar esfuerzos cortantes se tiene que la deformación se define por:

$$y = a/b = \tan\theta \quad (2.2)$$

donde a y b son las componentes del desplazamiento en la dirección x y y , respectivamente y θ es el ángulo entre ellos.

2.3 ENSAYO DE TENSION

Para determinar la relación entre la fuerza aplicada y la deformación se utilizan ensayos mecánicos. En general un simple ensayo de tensión puede determinar esta relación. Este ensayo es una prueba mecánica relativamente sencilla, pero provee

información muy importante. La prueba consiste en una probeta que está sujeta y a la que se le aplica una fuerza incremental en forma continua, al tiempo que se registra simultáneamente la elongación de la probeta.

De este ensayo se obtiene una curva esfuerzo-deformación, que se construye de las medidas tomadas de carga contra elongación. El valor de esfuerzo calculado al dividir la carga entre el área original transversal de la probeta, se conoce como ingenieril.

$$S = P/A_0 \quad (2.3)$$

La deformación usada en la misma curva se obtiene dividiendo el cambio entre la longitud inicial y la final, entre la longitud inicial.

$$e = (l - l_0)/l_0 \quad (2.4)$$

La forma y la magnitud de la curva esfuerzo-deformación de un metal dependerá de su composición, tratamiento térmico y la historia de deformación plástica. Los parámetros que son usados para describir este tipo de curva son: la resistencia tensil, el esfuerzo o punto de cedencia, el porcentaje de elongación y la reducción de área.

La forma general de la curva esfuerzo deformación se puede apreciar en la figura 2.2, que muestra la trayectoria de la probeta al ser deformada. De los datos que se mencionaron anteriormente el punto de cedencia es uno de los más importantes ya que este indicará el inicio de la deformación permanentemente. Existen varios criterios para la obtención de este parámetro, una forma fácil de localizar este punto es trazar una línea paralela a la parte elástica (donde la carga es proporcional a la deformación), pero desfasada del origen y justo donde interceptan las dos líneas se puede tomar como punto de cedencia, este método se puede apreciar en el inserto de la figura 2.2.

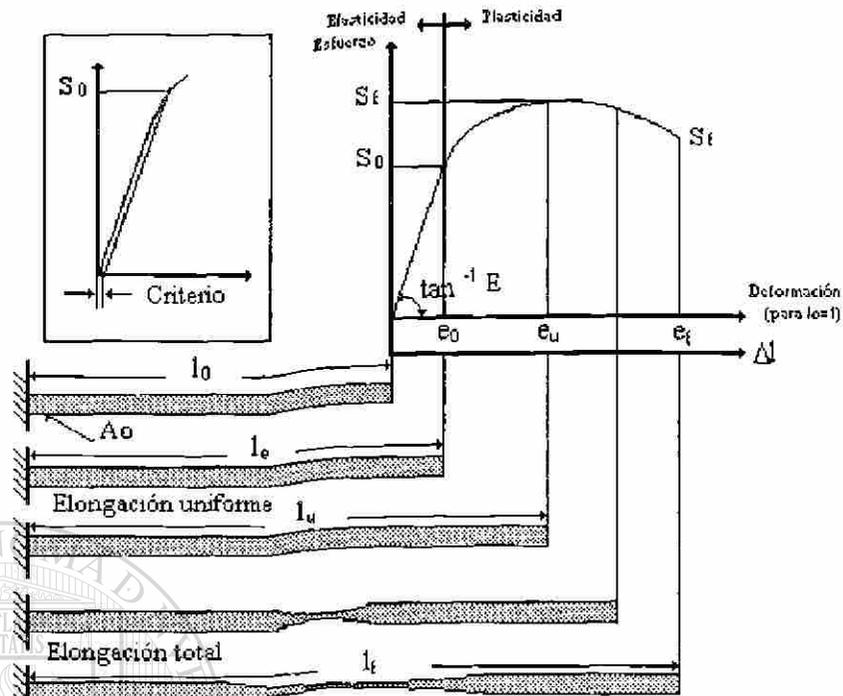


Figura 2.2. Ensayo de tensión.

La curva esfuerzo deformación ingenieril no da un indicador verdadero de las propiedades del material, por que ésta es calculada enteramente usando las dimensiones originales de la probeta y las dimensiones están cambiando continuamente conforme se desarrolla el ensayo, como se aprecia en la figura 2.2.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Por lo anterior, se requiere determinar una curva donde se pueda obtener la relación esfuerzo deformación verdadera. El esfuerzo real requerido para deformar la pieza se define como la relación de carga aplicada por el área transversal instantánea.

$$\sigma = P/A \quad (2.5)$$

Y la deformación verdadera está dada por;

$$\varepsilon = \ln(l/l_0) \quad (2.6)$$

2.4 CURVAS DE FLUENCIA

La curva obtenida por carga uniaxial, mediante el ensayo de tensión, es de fundamental interés cuando se representa en términos de esfuerzo deformación reales. Se observa, figura 2.3, que el esfuerzo necesario para mantener la elongación uniforme se incrementa continuamente, si se decide descargar una vez alcanzada la deformación plástica, la trayectoria encontrada será exactamente paralela a la porción elástica de la curva original, como se observa en la figura 2.3. El valor de ϵ a $\sigma = 0$ es igual a la deformación plástica aplicada. Además, en la recarga la curva tomará una inclinación igual al valor original del esfuerzo con el que fue descargado.

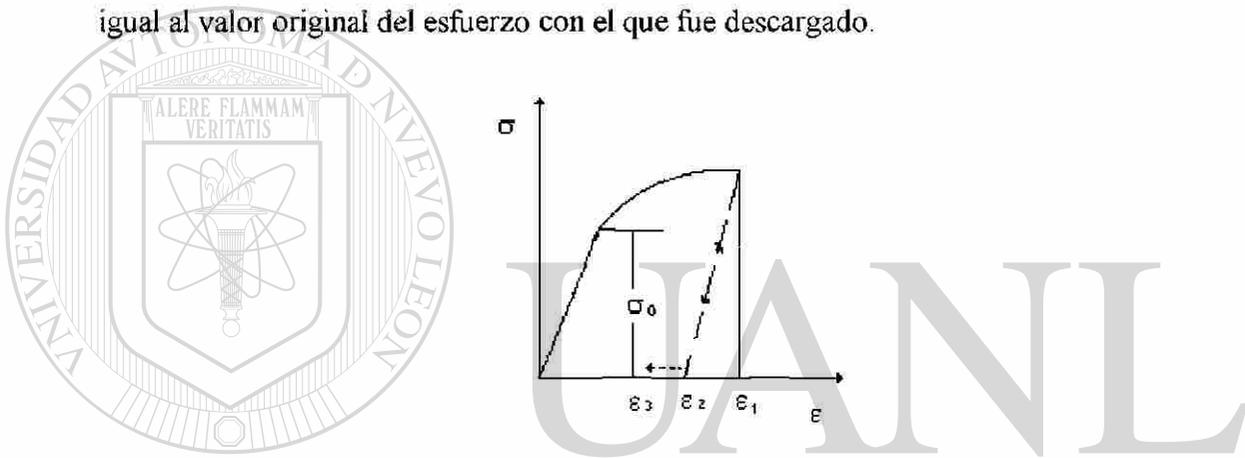


Figura 2.3. Curva esfuerzo deformación para un material dúctil.

Si el material es deformado plásticamente hasta alcanzar el esfuerzo de cedencia en una dirección (como es el caso de tensión), y después se descarga hasta obtener un valor de esfuerzo igual a cero y se vuelve a cargar, pero esta vez en dirección contraria (como es el caso de compresión), lo que se encuentra es que el esfuerzo de cedencia en la descarga es menor que el original. Si se observa la figura 2.4 se aprecia que $\sigma_b < \sigma_a$, esta dependencia del esfuerzo de cedencia con la trayectoria y dirección de la carga es llamado efecto Bauschinger⁴. Este efecto es comúnmente ignorado en la teoría de plasticidad y por lo tanto se supone que el esfuerzo de cedencia en la recarga es igual al de la carga inicial⁵

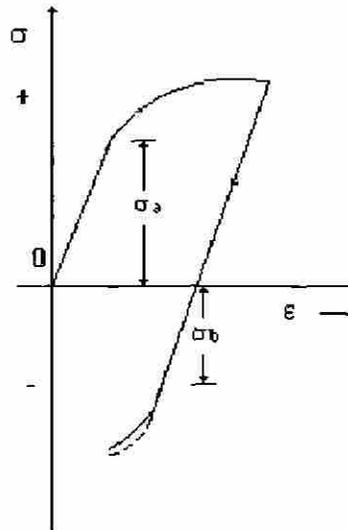


Figura 2.4. Efecto Bauschinger.

A veces es conveniente expresar la curva esfuerzo-deformación mediante una expresión analítica, aunque hoy en día esa necesidad está desapareciendo en gran parte al disponer de computadoras, las cuales pueden manejar curvas de esfuerzo-deformación a partir de los datos numéricos correspondientes. Sin embargo, todavía se puede usar algunas expresiones sencillas, algunas de ellas se describen a continuación.

2.4.1 ECUACION DE LUDWICK

Se puede decir que el endurecimiento por deformación, en algunos materiales, se comporta de una forma parabólica y, por lo tanto, su comportamiento matemático se puede describir por la ecuación propuesta por Ludwick en 1909 y que se expresa de la siguiente manera⁶:

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (2.7)$$

donde k y n son coeficientes que dependen del tipo de material. al segundo se le conoce como exponente de endurecimiento por deformación. La forma gráfica se puede

visualizar en la figura 2.5 en la que se aprecia de una forma obvia que en la ecuación (2.7) no se toma en cuenta la deformación elástica, ya que ésta resulta ser menor al 0.1%⁶.

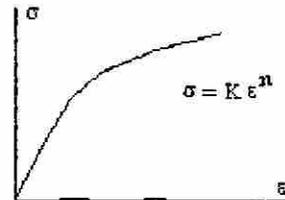


Figura 2.5. Curva esfuerzo-deformación, propuesta por Ludwick.

2.4.2 ECUACION DE HOLLAMAN

Para metales que son trabajados en frío con una tensión de fluencia Y , los resultados se representan mejor mediante la ecuación propuesta por Holloman y que se expresa como:

$$\sigma = Y + k\epsilon^n \quad (2.8)$$

El despreciar la deformación elástica se considera a veces como equivalente a suponer un módulo de Young (E) infinito⁵. Con frecuencia esta ecuación se puede simplificar aún más, suponiendo que la relación endurecimiento-deformación sigue un comportamiento lineal, ($n=1$).

$$\sigma = Y + k\epsilon \quad (2.9)$$

Esto es bastante aproximado para procesos de conformado en frío que tengan varios pasos de trabajo⁶. En la figura 2.6 se aprecia de forma gráfica la ecuación propuesta por Holloman.

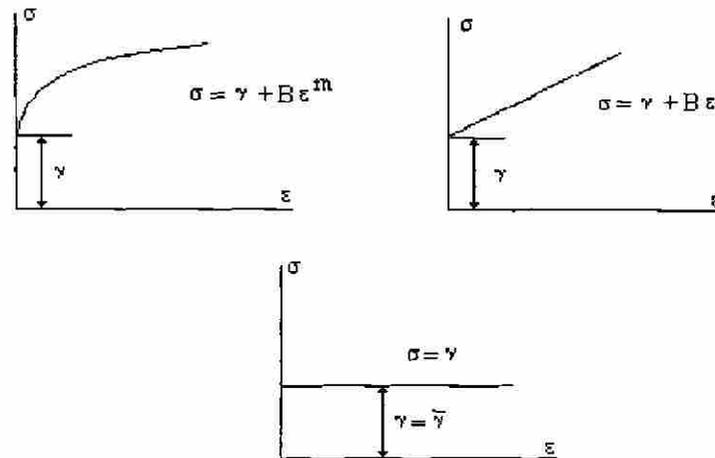


Figura 2.6. Formas aproximadas de la curva esfuerzo-deformación.

2.5 TEORÍA DE PLASTICIDAD

Existe un gran número de aspectos en el tema de la deformación plástica, que hacen difícil la formulación matemática de la teoría de la plasticidad, en comparación con el desarrollo elástico de un sólido⁸. Uno de estos factores, es que la deformación plástica no es un proceso reversible como lo es la elástica. La deformación elástica depende sólo del estado inicial y final de esfuerzos y deformaciones, mientras que la deformación plástica depende de la trayectoria de carga. Otro aspecto es el fenómeno de endurecimiento por deformación, ya que éste es difícil de introducir en la teoría de plasticidad sin considerar una formulación matemática compleja. También existen varios aspectos relacionados con el material como son: anisotropía, histéresis elástica y el efecto Bauschinger, pero estos factores no pueden ser tratados fácilmente por la teoría de la plasticidad. Sin embargo, aún con todos estos factores la teoría de la plasticidad es una de las áreas más importante de la mecánica continua, ya que permite conocer el estado de esfuerzos que se generan al aplicar una carga a un cuerpo. En general se puede determinar una distribución de esfuerzos mediante la representación de los esfuerzos en un cubo unitario como se muestra en la figura 2.7⁵.

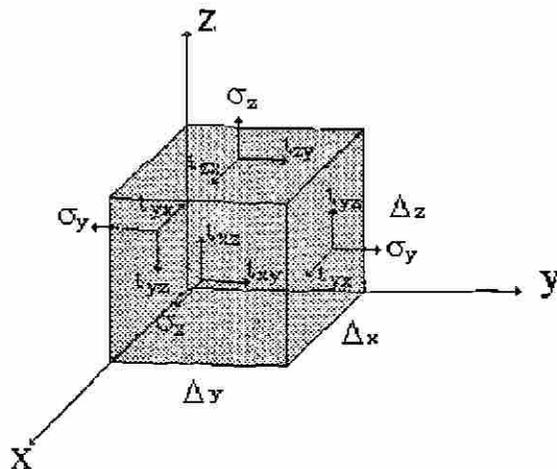


Figura 2.7. Distribución de esfuerzos en un cubo unitario.

Los esfuerzos de tensión actúan normalmente a las caras del cubo y son identificados por el suscrito que también identifica la dirección en la que el esfuerzo actúa; por ejemplo σ_x es la componente que actúa sobre los planos normales a la dirección x . Por convención los esfuerzos normales con valores arriba de cero se les considera tensiles y aquellos con valores abajo de cero se les considera compresivos.

Se requiere de dos suscritos para describir los esfuerzos cortantes. El primer suscrito indica el plano en el que el esfuerzo actúa y el segundo la dirección en que actúa; por ejemplo τ_{xz} actúa en los planos normales a x en la dirección z . Estos esfuerzos son positivos si se encuentran actuando en una cara positiva y apuntan a la dirección positiva, éste también es positivo si se encuentran actuando en una cara negativa y apuntando a una dirección negativa. Serán negativos si el esfuerzo actúa en una cara positiva y apuntan a una dirección negativa y viceversa. En la figura 2.8, se observa de forma esquemática las convenciones negativas y positivas de los esfuerzos cortantes.

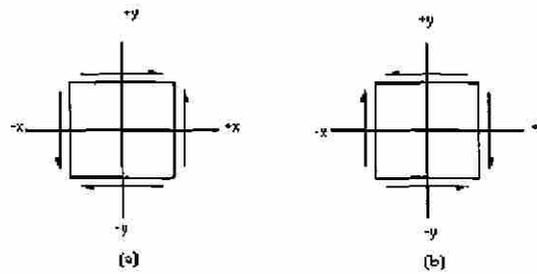


Figura 2.8. Esfuerzos cortantes (a) positivos, (b) negativos.

Del planteamiento de una distribución de esfuerzos surge la necesidad de conocer los valores numéricos de las nueve componentes que describen el estado de sollicitaciones en que se encuentra un cuerpo. Estas son σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} , τ_{zy} . Sin embargo, esto puede ser simplificado si se supone que las áreas de las caras de la unidad del cubo son lo suficientemente pequeñas para considerar que el cambio del valor del esfuerzo cortante es despreciable. Esta suposición permite que la suma de los momentos alrededor de un eje se nulifiquen:

$$(\tau_{xy} \Delta_y \Delta_z) \Delta_x = (\tau_{yx} \Delta_x \Delta_z) \Delta_y \quad (2.10)$$

con lo que se reduce el número de componentes indicadas a solo seis de ellas. El manejo de las seis componentes resulta complicado, por lo que el estado de sollicitaciones puede ser referido a los esfuerzos principales, estos se definen como esfuerzos normales a los planos en donde los esfuerzos cortantes son nulos. Los esfuerzos principales se determinarán mediante la figura 2.9;

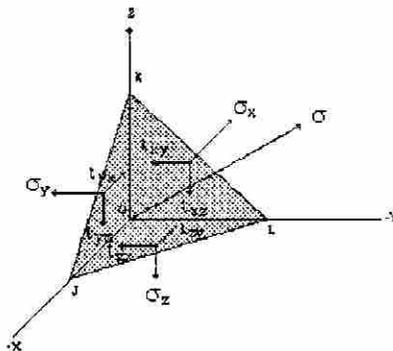


Figura 2.9. Esfuerzos principales .

en donde se supone que plano JKL es principal y por lo tanto la tensión σ normal a este plano es principal. Si l , m y n son los cosenos directores de σ , entonces sus proyecciones a lo largo de sus ejes cartesianos (S_x , S_y , y S_z) se definen como;

$$\begin{aligned} S_x &= \sigma l & S_y &= \sigma m & S_z &= \sigma n \\ \text{Area KOL} &= A_l & \text{Area JOK} &= A_m & \text{Area JOL} &= A_n \end{aligned}$$

Tomando la suma de las fuerzas en la dirección x , resulta.

$$\sigma A_l - \sigma_x A_l - \tau_{yx} A_m - \tau_{zx} A_n = 0 \quad (2.11)$$

de forma simplificada queda:

$$(\sigma - \sigma_x)l - \tau_{yx}m - \tau_{zx}n = 0 \quad (2.12)$$

La suma de fuerzas a lo largo de los otros ejes es:

$$-\tau_{xy}l + (\sigma - \sigma_y)m - \tau_{zy}n = 0 \quad (2.13)$$

$$-\tau_{xz}l - \tau_{yz}m - (\sigma - \sigma_z)n = 0 \quad (2.14)$$

Las ecuaciones (2.12), (2.13) y (2.14) son homogéneas y lineales en términos de los cosenos directores l , m y n . La única solución no trivial del sistema se encuentra al resolver la ecuación de tercer grado.

$$\begin{aligned} &\sigma^3 + (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2)\sigma \\ &- (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Las tres raíces de la ecuación (2.15) son las tensiones principales σ_1 , σ_2 , y σ_3 . Para determinar la dirección, con respecto a los ejes originales x , y y z en que el esfuerzo principal actúa, es necesario sustituir σ_1 , σ_2 , y σ_3 en las ecuaciones (2.16), (2.17) y

(2.18). Las tres ecuaciones deberán ser resueltas simultáneamente para l , m y n con la ayuda de la relación auxiliar $l^2 + m^2 + n^2 = 1$.

Se observa que las combinaciones de los componentes del estado de sollicitación no cambia el valor numérico de los coeficientes de la ecuación (2.15), por lo que las cantidades:

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = I_1 \quad (2.16)$$

$$\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 = I_2 \quad (2.17)$$

$$\sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 = I_3 \quad (2.18)$$

se les conoce como los tres invariantes del tensor tensión.

Debido a que la deformación plástica es una relación de los esfuerzos cortantes más que de los normales, es importante plantear una relación que involucre los primeros con estos últimos, por lo que se tiene:

$$\tau^2 = (\sigma_1 + \sigma_2)^2 l^2 m^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)^2 l^2 n^2 + (\sigma_3 + \sigma_2)^2 n^2 m^2 \quad (2.19)$$

En la figura (2.10) se observa la posición relativa de los planos que contienen a los esfuerzos cortantes principales (τ_1 , τ_2 y τ_3), y, como se ilustra, dichos planos se encuentran orientados a 45° con respecto a los normales. Es de notar que los valores numéricos se asignan como valor máximo normal a σ_1 y como valor mínimo a σ_3 , el valor cortante máximo será el de τ^2 .

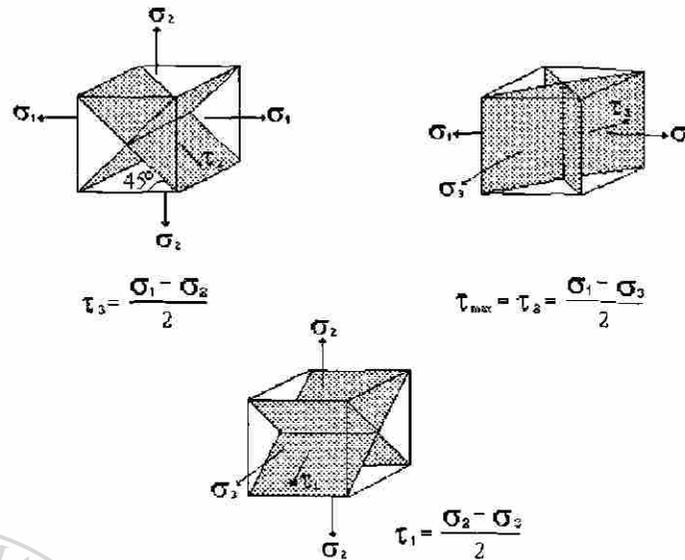


Figura 2.10. Planos de los esfuerzos cortantes principales.

Las formas de desplazamiento a que están sujetos los puntos que forman un continuo, pueden ser: translación, rotación y deformación. La deformación de un sólido puede deberse por dilatación (cambio de volumen) o por distorsión (cambio de forma).

Si se considera un cuerpo sólido con coordenadas x , y , y z , en un punto Q , que está sujeto a desplazamiento y será descompuesto en sus componentes de translación y deformación se obtendrán unas nuevas coordenadas de posición $x+u$, $y+v$, y $z+w$, (figura 2.11) donde las componentes de desplazamiento son u , v y w . Si el vector desplazamiento es constante para todas las partículas del cuerpo, no se considera que hubo deformación sino sólo translación.

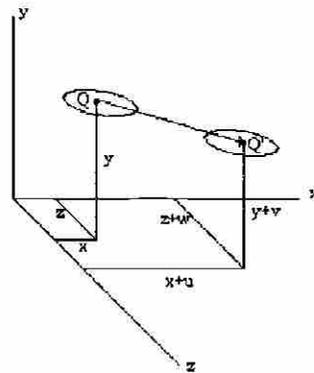


Figura 2.11. Desplazamiento del punto Q .

Para comenzar la discusión de la deformación, se partirá del análisis de un elemento simple bidimensional, como se observa en la figura 2.12 en donde los puntos A y B se encuentran separados por una distancia (dx). Cuando una fuerza es aplicada en la dirección x , los puntos A y B se moverán a la posición A' y B' respectivamente. Como el desplazamiento (u) depende de la posición a lo largo del eje x , el punto B se desplaza un poco más que A.

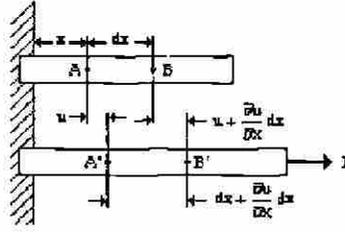


Figura 2.12. Deformación Unidimensional.

La deformación normal (e_x) se calcula por:

$$e_x = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx - dx}{dx} \quad (2.20)$$

El desplazamiento en el caso unidimensional está dado por:

$$u = e_x x \quad (2.21)$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ésta se puede generalizar en tres dimensiones para encontrar las componentes de desplazamiento en función de las coordenadas originales del punto:

$$u_i = e_{ij} x_j \quad (2.22)$$

Los coeficientes que relacionan el desplazamiento con las coordenadas del punto en el cuerpo constituyen los componentes del tensor deformación. Tres de estos términos pueden ser identificados como deformación normal:

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.23)$$

pero la identificación de otros componentes requiere de más trabajo.

Si se considera un elemento plano xy que ha sido distorsionado mediante la aplicación de esfuerzos cortantes, como se observa en la figura 2.13.

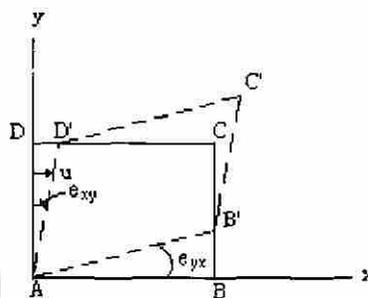


Figura 2.13. Distorsión angular de un elemento.

El desplazamiento de los puntos a lo largo de la línea AD es paralelo a x , pero este componente de desplazamiento incrementa a medida que la distancia y aumenta, por lo que, al hacer referencia a la ecuación (2.24):

$$e_{xy} = \frac{DD'}{DA} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.24)$$

similarmente, para la distorsión angular de x :

$$e_{yx} = \frac{BB'}{AB} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.25)$$

En general, componentes de desplazamiento como las e_{xy} , e_{yx} , etc., producen deformación tangencial o cortante y rotación de cuerpo rígido, figura 2.14. Como se

requiere identificar la parte del desplazamiento que provoca la deformación de los rotacionales, lo que resulta en:

$$\mathbf{e}_{ij} = \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} + \boldsymbol{\omega}_{ij} \quad (2.26)$$

donde

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.27)$$

es el tensor deformación y

$$\boldsymbol{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.28)$$

es el tensor rotación.

Es importante resaltar la costumbre ingenieril que se tiene al llamar al corte simple (también llamado cambio angular total), figura 2.14, como deformación tangencial o cortante, que es igual a:

$$\gamma_{ij} = 2\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \quad (2.29)$$

que no son cantidades tensoriales.

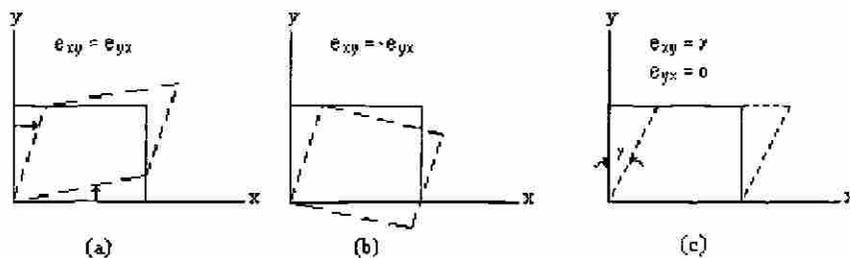


Figura 2.14. Desplazamientos producidos por deformación y rotación: (a)corte puro, (b)rotación, y (c)corte simple.

2.6 CRITERIOS DE FLUENCIA

El problema de deducir las relaciones matemáticas necesarias para la predicción del límite elástico en un material sujeto a cualquier estado de sollicitaciones es importante en la teoría de la plasticidad⁹. En tracción uniaxial o en compresión pura, la tensión de fluencia se puede definir, en principio, de una forma fácil. Si el metal ha sido deformado anteriormente una cantidad cualquiera conocida, la fluencia tendrá lugar tan pronto como la tensión alcance una magnitud Y , que se puede deducir a partir de la curva de esfuerzo deformación para las condiciones apropiadas⁶.

La mayoría de los sistemas de tensión son complejos y no es posible realizar ensayos de fluencia por separado para todas las variaciones posibles, de manera que se necesita encontrar alguna norma para las combinaciones de tensiones que producirán la fluencia en un elemento de una pieza.

Se han propuesto diversos criterios de fluencia de los cuales los más importantes son los propuestos por Tresca y Von Mises. Estos criterios forman el punto de partida del conformado de los metales. Los criterios de fluencia son esencialmente relaciones empíricas que están desarrolladas a partir de observaciones experimentales⁵. A continuación se describen dichos criterios.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1.- Criterio de Tresca.

Este criterio supone que la cedencia ocurre cuando el máximo esfuerzo cortante alcanza un valor crítico. Esto parece razonable, ya que se sabe que la deformación plástica depende del deslizamiento de dislocaciones que es esencialmente un proceso de cizallamiento.

El máximo esfuerzo cortante está dado por:

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (2.30)$$

donde σ_1 es algebraicamente el mayor y σ_3 es el menor de los esfuerzos principales.

Para tensión uniaxial ;

$$\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.31)$$

y el esfuerzo cortante de cedencia τ_0 es igual para $\sigma_0/2$. Sustituyendo en la ecuación (2.30).

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \tau_0 = \sigma_0/2 \quad (2.32)$$

Adicionalmente, el criterio de máximo esfuerzo cortante está dado por:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (2.33)$$

Para un estado de corte puro, $\sigma_1 = -\sigma_3 = k$, $\sigma_2 = 0$, el criterio de máximo esfuerzo cortante predice que la cedencia ocurrirá cuando:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \sigma_0 \quad (2.34)$$

o

$$k = \sigma_0/2 \quad (2.35)$$

entonces el criterio de máximo esfuerzo cortante puede ser escrito como:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1' - \sigma_3' = 2k \quad (2.36)$$

2.- Criterio de Von Mises.

Este criterio propone que la cedencia deberá ocurrir cuando el segundo invariante [J] del tensor reducido del esfuerzo exceda algún valor crítico:

$$J_2 = k^2 \quad (2.37)$$

$$k^2 = (1/6)[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.38)$$

Para evaluar la constante k y relacionarla con la cedencia en el ensayo de tensión, se tiene que:

$$\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.39)$$

$$\sigma_0^2 + \sigma_0^2 = 6k^2 \quad (2.40)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{3} * k \quad (2.41)$$

Sustituyendo la ecuación (2.38) en (2.40) se obtiene el criterio de Von Mises.

$$\sigma_0 = (1/\sqrt{2})[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.42)$$

La forma geométrica de los criterios de fluencia que fueron descritos anteriormente se muestran en el espacio de tensiones principales en la figura 2.15.

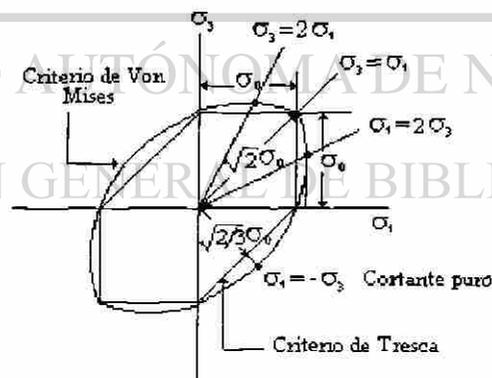


Figura 2.15. Forma geométrica de los criterios de fluencia.

CAPITULO 3

MODELACION DEL CONFORMADO

3.1 INTRODUCCION

Los productos fabricados por procesos de conformado en frío son muy importantes en diferentes sectores industriales, tales como en la de construcción o mecánica. Las aplicaciones de los productos derivados por este proceso son muy grandes y las partes pueden ir desde perfiles de ventanas, hasta partes muy complejas para aplicaciones específicas, como el caso de la industria aeronáutica.

Existen muchas técnicas para el análisis de los procesos de conformado, el principal propósito de estas técnicas, es el de conocer la magnitud de la deformaciones y los esfuerzos involucrados, así como, la predicción de las propiedades mecánicas. Entre los muchos tipos de análisis se encuentran el método de líneas de deslizamiento, el método de elemento finito (FEM) y el método de diferencias finitas (FD)¹⁰ entre otros.

Desde la década de los setenta, los métodos de FEM y FD se empezaron a explotar. Hoy en día, la tendencia de la industria, así como la academia es a utilizar paquetes comerciales para la simulación de procesos que manejan cualquiera de las dos técnicas FEM o FD, en lugar de crear sus programas propios.

Es mucho más barato usar un paquete de FEM o FD que crear uno particular, los costos de programación son altos, así como, los de capacitación y sólo un número reducido de personas pueden usarlo.

3.2 METODOS DE MODELACION

En el análisis de problemas de conformado se involucran muchos parámetros que afectan el proceso, algunas de las variables que intervienen son: desplazamientos, esfuerzos y velocidad. Estos problemas son caracterizados por diferentes ecuaciones constitutivas, así como las ecuaciones diferenciales que los gobiernan. Existen problemas que no pueden ser resueltos analíticamente, pero estos pueden resolverse encontrando una aproximación razonable por métodos numéricos. Esto es posible si el continuo a analizar es discretizado (dividir el sistema en pequeños elementos). De esta forma se reemplazan las ecuaciones diferencial que lo gobiernan, por simples ecuaciones algebraicas que se pueden resolver relativamente fácil.

Los métodos de modelación pueden ser divididos principalmente en diferencias finitas, elemento finito y métodos integrales, cada uno tiene sus propios beneficios. La diferencia entre estos tipos de modelación es la técnica para obtener las ecuaciones de discretización¹¹, es decir las ecuaciones algebraicas que reemplazaran a las ecuaciones diferenciales.

Es importante conocer las variables que interviene en el proceso de conformado a analizar para poder tomar una decisión acertada en cuanto al tipo de análisis a utilizar. ®

Algunos parámetros que se deben analizar se listan a continuación:

- 1.- Tipo de proceso.
- 2.- Contacto del sistema con los alrededores.
- 3.- Tipo de ecuaciones gobernantes.
- 4.- Tipos de condiciones a la frontera.
- 5.- Tipo de material.

3.2.1 METODO DE ELEMENTO FINITO

El método de elemento finito (FEM por sus siglas en inglés Finite Element Method) fue propuesto en 1943 por Courant. Pero no fue sino hasta 1956 cuando Turner hizo uso práctico de la técnica y presentó los primeros resultados. El método recibió este nombre en 1960 por Clough¹². El FEM es una de las técnicas numérica más poderosa disponible hoy en día para el análisis de estructuras complejas y sistemas mecánicos¹³. El método de elemento finito es usado para analizar sistemas tanto lineales como no lineales. En la parte de sistemas no lineales está incluido la cedencia del material, fluencia, contacto y fricción, entre otros. El método de elemento finito es usado también en análisis estáticos y dinámicos. Este método ha sido aplicado a problemas de flujo de fluidos, transferencia de calor y potencia eléctrica. La versatilidad en la aplicación de este método a diversos problemas, es la mayor razón por la cual se ha hecho tan popular.

La idea básica de esta técnica, es la de dividir el sistema continuo a analizar en un número finito de elementos, esta división es comúnmente llamada discretización.

Un modelo es construido de la siguiente manera, un número finito de puntos, llamados nodos, son definidos en las fronteras de los elementos que se generaron por la discretización. Los nodos que fueron definidos tendrán la función de mantener unido el continuo de tal forma que la formulación y los grados de libertad que caracterizan a dicho nodo dependerán del tipo de análisis a realizar y del método utilizado para obtener las ecuaciones de discretización. Por lo tanto el sistema ahora se define como un conjunto de elementos conectados entre si por medio de nodos ubicados en sus fronteras.

Las cuatro técnicas mas comunes usadas en la derivación de las ecuaciones básicas de discretización para el análisis por el FEM son las siguientes:¹⁴

- 1.- La aproximación directa.
- 2.- El método variacional.

- 3.- El método de residuos ponderados.
- 4.- La aproximación de balance de energía.

La descripción de cada una de estas técnicas se describe en un documento previo¹⁰.

Para obtener la solución de un problema usando el método de elemento finito se puede seguir los siguientes pasos genéricos:

- 1.- Generación de la geometría.
- 2.- Discretización del sistema.
- 3.- Selección del tipo de elemento adecuado.
- 4.- Asignación de las propiedades del material y las condiciones de frontera.
- 5.- Solución del conjunto de ecuaciones.

Un concepto muy simple de lo que sería el método se puede observar en la figura 3.1.

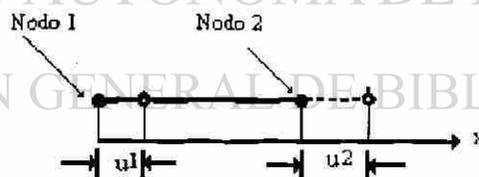


Figura 3.1. Elemento unidimensional.

El ejemplo es relativamente simple, se trata de una geometría unidimensional, que consta de un elemento y dos nodos. Para este ejemplo los nodos tienen un grado de libertad que es el desplazamiento (u_1 y u_2). El vector desplazamiento en el método del elemento finito de un punto o un nodo tiene un máximo de seis componentes tres de

tracción y tres de rotación. Las ecuaciones que relacionan las fuerzas aplicadas en los nodos para provocar los desplazamientos son:

$$P_1 = k_{11}u_1 + k_{12}u_2 \quad (3.1)$$

$$P_2 = k_{21}u_1 + k_{22}u_2 \quad (3.2)$$

Los coeficientes de rigidez k_{ij} se calculan en base a las propiedades del material y geometría del elemento. Las ecuaciones de rigidez se manipulan en la computadora en una matriz de la forma:

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Cuando se agrega un segundo elemento como se observa la figura 3.2, se extienden las dimensiones de la matriz:

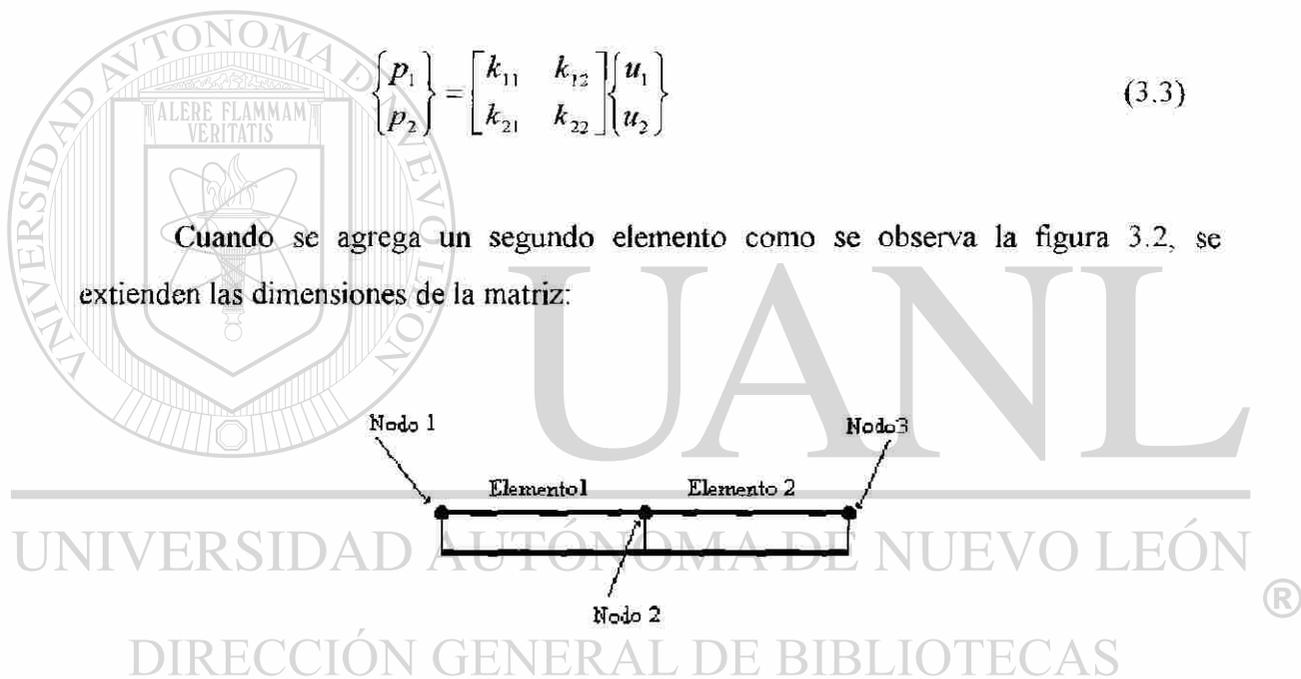


Figura 3.2. Dos elementos unidimensionales.

$$\begin{Bmatrix} P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{22} & k_{23} \\ k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

Cuando estos dos elementos se combinan en un medio continuo, se puede usar el principio de superposición⁵ para llegar a encontrar la rigidez de un continuo con dos elementos:

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ 0 & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

El elemento finito fue originalmente desarrollado para resolver problemas de esfuerzo plano. La adición de una tercera dimensión causa que el número de ordenes de magnitud se incremente, aumentando el número de ecuaciones simultáneas. Pero el problema se resuelve utilizando computadoras rápidas.

Existen una infinidad de formas de los elementos que se pueden utilizar en diferentes análisis, alguno de ellos se puede observar en la figura 3.3, donde se puede observar elementos de dos y de tres dimensiones, así como de diferente orden.

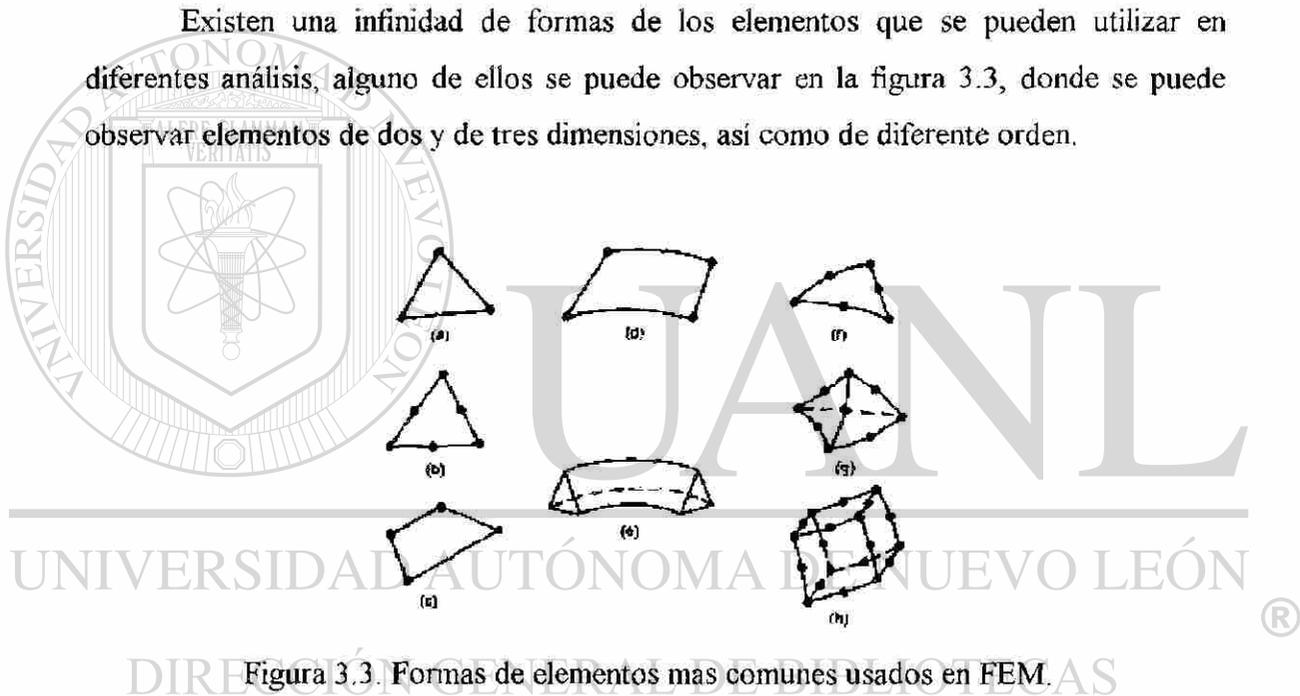


Figura 3.3. Formas de elementos mas comunes usados en FEM.

La solución por el método del elemento finito implica calcular la matriz de rigidez para todos los elementos en el continuo. Estos elementos son entonces ensamblados en una matriz de rigidez para completar el continuo.

$$\{P\} = [K] \{u\} \quad (3.6)$$

La fuerza de la matriz es conocida, ya que en eso consisten los valores numéricos en cargas y reacciones. El desplazamiento u es un factor desconocido que se resuelve por la ecuación 3.6, que da el desplazamiento en todos los nodos. Cuando esta matriz es

multiplicada por las coordenadas de la posición de los nodos $[B]$ y la constante elástica $[D]$ el esfuerzo se determina en todos los nodos.

$$\{\sigma\} = [D][B]\{u\} \quad (3.7)$$

3.2.2 PUNTO DE VISTA DE LAGRANGE Y EULER

El punto de vista de Lagrange del problema de la deformación de un continuo, es la descripción del movimiento de una partícula (P), con posición escogida arbitrariamente, a través del espacio, en un tiempo t , esta descripción es llamada formulación de Lagrange, sin embargo el haber escogido otra posición a un tiempo diferente seguirá teniendo el mismo nombre en el sentido de que la variable x está considerada en un tiempo fijo instantáneo, como se observa en la figura 3.4. Es decir, el estado de referencia es el deformado¹⁵.

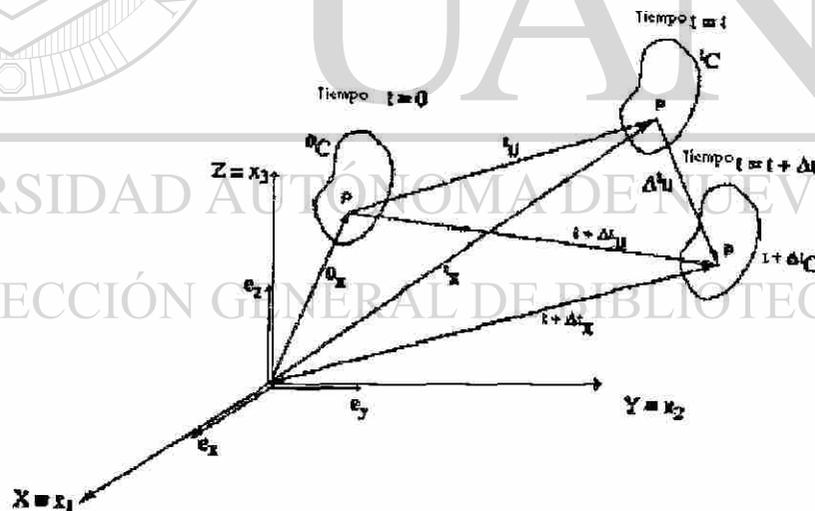


Figura 3.4. Descripción de movimiento.

El uso de esta formulación es particularmente contradictorio debido a la sencillez con que los cambios de velocidad del material pueden ser calculados. Otra ventaja de Lagrange surge en el tratamiento de las condiciones de frontera de una superficie en un

cuerpo que está cambiando durante la deformación. Las condiciones de frontera en la superficie deformada llegan a ser no-lineales porque las condiciones de la superficie depende de un desplazamiento desconocido. El uso de una descripción Lagrange permite tratar las condiciones cinemáticas de manera simple.

El punto de vista de Euler es la descripción de la variables independientes que están en la localización x de la partícula P y en un tiempo t (ver figura 3.4) es llamada descripción espacial y es comúnmente llamada la formulación Euleriana. La descripción se centra en lo que está pasando en una región fija en el espacio en función del tiempo, por lo tanto, esta descripción es difícil de tratar para el principio de mecánica de sólidos, de hecho las leyes de mecánica de continuidad refieren a lo que está pasando en el cuerpo de forma general y no a la región espacial que el cuerpo momentáneamente ocupa. Es decir el estado de referencia, es el no deformado¹⁵.

3.2.3 INCREMENTOS DE TENSION

Con el uso de técnicas iterativas dentro de un incremento de carga es importante calcular siempre los cambios de tensión correspondientes al cambio total de los parámetros de desplazamiento y, por lo tanto, al cambio total de deformación, que se ha acumulado en todas las iteraciones previas. Este punto es de importancia, ya que durante los cambios de desplazamiento iterativos se siguen diferentes trayectorias de deformación, llevando ocasionalmente a cambios de signo de la tensión y a descargas puramente elásticas.

Las tensiones deberán ser calculadas de la forma de una integral en función de la matriz y la deformación de la forma:

$$\Delta\sigma_n^t = \int_0^{\Delta\epsilon_n^t} D_{ep}^* d\epsilon \quad (3.12)$$

Para la integración de la ecuación se han adoptado varios procedimientos. Estos se pueden clasificar en las categorías de métodos explícitos y métodos implícitos.

3.2.4 METODO IMPLICITO Y EXPLICITO

El procedimiento implícito usa estratégicamente un incremento automático, la historia depende del comportamiento, que se obtiene vía de los desplazamientos incrementales y el estado inicial de los incrementos¹⁴.

El procedimiento explícito está basado sobre la implementación de una regla de integración explícita con el uso de la suma global en diagonal de los elementos masa de la matriz. Las ecuaciones de movimiento del cuerpo son integradas usando una integración diferencian central explícita.

La técnica implícita tiene la ventaja de analizar problemas estáticos y casi estáticos fácilmente, porque es incondicionalmente estable con respecto al tamaño del tiempo de los incrementos, pero el uso de esta técnica no es fácil en la solución de problemas que tengan muchos cambios de contacto y cambios en el coeficiente de fricción.

La técnica explícita tiene ciertamente grandes ventajas cuando el análisis es de 3 dimensiones y se encuentra en contacto. El tamaño del tiempo de los incrementos es sólo dependiente de la dimensión de los elementos y las propiedades del material y no de la complejidad del análisis.

Para incrementar la susceptibilidad de las formulaciones explícitas, se pueden seguir los siguientes artificios:

- 1.- La duración del proceso es artificialmente reducido por el incremento de la velocidad de la herramienta.

2.- La estabilidad del tiempo de incrementos está definido por el incremento en la densidad de masa del material.

En general hay casos en que el método explícito es claramente superior y casos en que la situación es lo contraria.

El método implícito es razonablemente efectivo y puede ser mas rápido que el explícito en problemas pequeños. Para problemas complejos con una malla muy refinada el método explícito es mucho mas efectivo. La razón de esto es que el costo del análisis de un procedimiento implícito incrementa al cuadrado del número de grados de libertad, mientras que el costo del análisis para procedimientos explícitos incrementa directamente proporcional al tamaño del problema¹⁴.

3.2.5 MATERIAL Y PARAMETROS

Es muy importante agregar las características reales del material al problema modelado, ya que un mal empleo de dichas características podría causar un error de análisis puesto que las ecuaciones constitutivas estarían tomando valores de material falsos.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Es conveniente expresar los datos de un proceso a modelar en términos de ecuaciones que dependan del proceso y de las variables del material. Algunas de las variables externas del proceso de laminación de placas son:

- 1.- Deformación
- 2.- Estado de esfuerzos.
- 3.- Intervalo de tiempo entre paso y paso.
- 4.- Temperatura.

Existen algunas variables asociadas al material de la placa, como:

- 1.- Composición.
- 2.- Tamaño de grano.
- 3.- Esfuerzos residuales.
- 4.- Textura.
- 5.- Propiedades mecánicas.

El estado de sollicitaciones puede ser empleado para convertir los esfuerzos y las deformaciones en sus valores equivalentes utilizando criterios de fluencia como los de Tresca y Von Mises. Las deformaciones del modelo serán calculadas en cada nodo y los esfuerzos serán calculados en cada elemento.

3.2.6 CONDICIONES A LA FRONTERA

La determinación de las condiciones a la frontera que se utilizarán en la modelación de procesos es un gran problema. Ya que muchas veces no existe simetría en el proceso y esto dificulta encontrarlas. El grado de susceptibilidad de un modelo depende de la forma que estén colocadas las condiciones a la frontera. Las ecuaciones del sistema pueden resolver las condiciones a la frontera cuando éstas son las correctas y de ahí se pueden conocer los esfuerzos y deformaciones reales.

3.3 ANALISIS ESTATICO NO-LINEAL

Se pueden considerar dos tipos de no-linealidad, la del material y la de la geometría o bien la combinación de ambas. En la no-linealidad del material las relaciones que se pueden generar son dependencias de esfuerzos, deformaciones o desplazamientos. Un segundo tipo del desarrollo de no-linealidad no sigue la teoría clásica de la deformación infinitesimal^{19,20} y la deformación es obtenida a partir de los desplazamientos

vía operadores diferenciales. Este tipo de no-linealidad puede involucrar grandes desplazamientos, grandes rotaciones y deformaciones finitas. Consecuentemente, diferentes formulaciones surgen dependiendo del tipo de análisis que se escoja para describir la deformación del cuerpo. Las formulaciones más comunes son la de Lagrange y Euler. Ambas son expresiones matemáticas equivalentes y en ellas se incluyen todos los efectos cinemáticos de la no-linealidad. Si se utilizan las relaciones constitutivas apropiadas los resultados obtenidos deberán de ser similares. La ventaja de utilizar una u otra depende del tipo de problema.

3.4 TECNICAS ITERATIVAS

Muchas de las técnicas iterativas que se usan actualmente tuvieron su origen en la aplicación intuitiva de razonamientos físicos. Pero cada una de estas técnicas tiene una buena historia en el análisis numérico. A continuación se tratarán dos diferentes tipos de análisis numérico.

3.4.1 METODO NEWTON-RAPHSON

Este método es quizás el proceso de mas rápida convergencia para la solución de problemas no-lineales, siempre y cuando la solución inicial esté dentro de la zona de atracción y no haya divergencia. De hecho, es el único proceso en la que la convergencia es cuadrática. A veces se le llama el método de Newton pero, al parecer, fue deducido simultáneamente por Raphson¹².

El proceso de Newton-Raphson, a pesar de su rápida convergencia, puede ser muy caro e incómodo. Una de estas razones es que se tiene que formar y resolver una nueva matriz K para cada iteración.

3.4.2 METODO NEWTON-RAPHSON MODIFICADO

Este método utiliza esencialmente el mismo algoritmo que el proceso Newton-Raphson, pero reemplaza la variable K por una aproximación constante.

El proceso convergerá a una velocidad más lenta, pero las desventajas que se presentaban en el Newton-Raphson desaparecen. De hecho la zona de atracción para este proceso es mayor y se puede conseguir converger para situaciones previamente divergentes, aunque lentamente.

3.5 CRITERIOS DE CONVERGENCIA

La solución numérica de los procesos iterativos se encuentra sólo de forma aproximada y se tiene que poner tolerancias para limitar el número de iteraciones. Frecuentemente los criterios utilizan una norma del cambio de los parámetros de desplazamiento o, de la forma más lógica, la del residuo. En este último caso el límite se expresa como un porcentaje de la norma de las fuerzas exteriores.

El error debido a la solución incompleta de las ecuaciones discretas no lineales se suma al error debido a la discretización que frecuentemente se presenta¹²



CAPITULO 4

EXPERIMENTACION Y MODELACION

4.1 INTRODUCCION

Para ser competitivos en productos derivados de los procesos de conformado en caliente o en frío, se debe contar con las herramientas necesarias y los medios adecuados para obtener una buena calidad de los productos y reducir costos de manufactura. Hoy en día existen en el mercado poderosos paquetes computacionales que son de gran utilidad y permiten visualizar las condiciones de trabajo antes de procesar el producto, además de poder predecir las propiedades mecánicas del mismo.

El tiempo requerido para obtener resultados estará en función, principalmente, de la complejidad del modelo a diseñar y de la capacidad computacional con que se cuente.

Un punto de interés en las actividades de investigación del presente trabajo, es el de simular el proceso de conformado de tubería de gran diámetro por medio del método de elemento finito. Se realizó un análisis de los esfuerzos y deformaciones que se generan en la parte transversal de la placa y a lo largo del tubo mediante un paquete comercial. Así como la determinación experimental de las propiedades mecánicas a lo largo del proceso para relacionar ambas técnicas.

Este trabajo se dividió en tres secciones. Primero se hizo una investigación teórica que se alimentó al procesador, posteriormente se realizó una serie de pruebas en diferentes probetas de acero para tomar los valores arrojados por éstos. Y, por ultimo, se realizó, mediante un paquete computacional, la simulación del proceso. Esto se observa esquemáticamente en la figura 4.1.

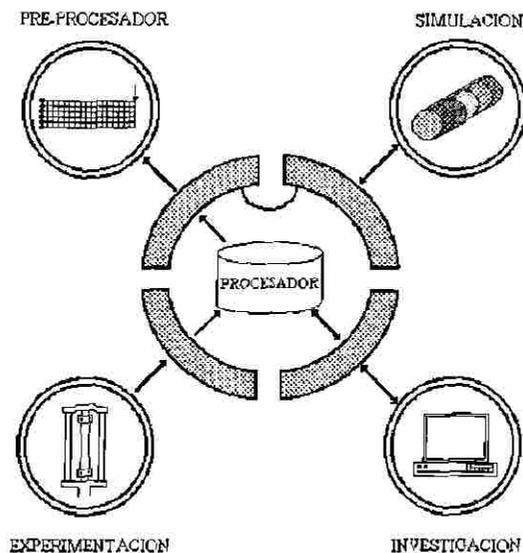


Figura 4.1. Esquema de trabajo.

4.2 EQUIPO UTILIZADO

La presente investigación fue desarrollada con un paquete computacional llamado NISA/DISPLAY instalado en una estación de trabajo Silicon Graphics INDY5500, la cual trabaja bajo una plataforma UNIX y un sistema operativo IRIX 6.2. Para la parte experimental se utilizó una máquina servo hidráulica de tensión/compresión INSTRON modelo 8502, que cuenta con un avanzado multiprocesador digital. Las pruebas fueron realizadas a la misma velocidad y con los mismos parámetros para que las condiciones fueran las mismas en todos los ensayos.

4.2.1 GENERALIDADES NISA/DISPLAY

Este paquete puede resolver diferentes tipos de problemas ya que cuenta con diversos módulos que permiten hacerlo, algunos de los tipos de análisis que se pueden elaborar son: estático (lineal y no lineal), dinámico, transferencia de calor, fatiga, fractura, electromagnético, flujo de fluidos, diseño, rediseño, etc. El paquete cuenta con un

módulo de control de forma gráfica lo que permite generar el diseño de una forma amigable y controlar las variables que se involucran en el proceso. El paquete se divide en tres partes para el análisis completo del modelo, tanto en la generación en la geometría como de la manipulación de las condiciones de frontera.

- Preprocesador
- Procesador
- Posprocesador

4.2.1.1 PREPROCESADOR

También llamado Display III, esta parte cuenta con una interfase gráfica que permite importar archivos realizados en otros paquetes como AUTOCAD. Esta parte del paquete se divide, a su vez, en tres rutinas: construcción del modelo, generación del mallado y, por último, las propiedades del material y condiciones de frontera. Además se indica el tipo de análisis que se le quiere realizar.

4.2.1.2 PROCESADOR

El procesador es el encargado de resolver todas las ecuaciones de elemento finito que se involucran en el modelo. La forma y el tiempo para resolver las ecuaciones depende de la asignación de criterios que se le especifique en el mismo. Estas ecuaciones deben de ser resueltas por alguna técnica numérica.

4.2.1.3 POSPROCESADOR

La interfase gráfica es la misma que la del preprocesador o DISPLAY III. Aquí se interpretan los resultados generados en el procesador. Estos resultados pueden ser manipulados y transformados para visualizar de una manera más clara el proceso y poder

obtener las conclusiones. Los resultados se presentan de una manera gráfica mediante mapas de colores y animaciones. Con esto se obtiene una mejor idea del efecto de las condiciones a la frontera en el proceso.

En general esta parte es una de las más difíciles, ya que se tiene que tener experiencia para poder interpretar los resultados y determinar si éstos son verídicos o hubo una mala asignación en alguna condición a la frontera del modelo, o de las propiedades del material, o de las ecuaciones constitutivas usadas, o algún otro tipo de error.

4.3 EXPERIMENTACION

4.3.1 RECOPIACION DE MUESTRAS

Se realizó una recopilación de muestras en planta durante la fabricación de tubería destinada para la conducción de gas amargo de 50 cm de diámetro. Durante esta operación el molino se detuvo en los diferentes pasos y se fueron cortando muestras de acero del tipo X-52 (designación según API), iniciando en la placa sin procesar y, posteriormente, en la primer preforma pasando por la segunda, tercera y cuarta preformas, hasta los tres pasos finales y la soldadora. La posición de las muestras fue en la sección transversal de la placa. Las muestras fueron extraídas en tres puntos estratégicos de la misma, esto es, en la parte central y en las orillas de ella, tal y como se aprecia en la figura 4.2.

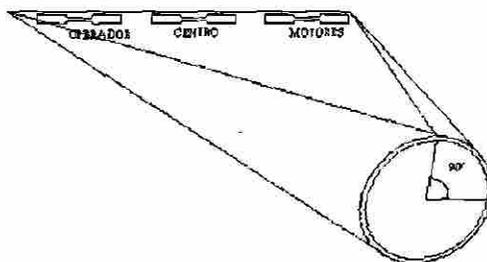


Figura 4.2. Posición de toma de muestras.

Se caracterizaron primero las muestra de placa sin procesar, esto para conocer sus propiedades mecánicas iniciales y composición química. En las Tablas (4.1) y (4.2), se observan los valores obtenidos.

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas de las muestras.

Tubo	Lado *	Esfuerzo de Cedencia [MPa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	n	k [MPa]	Tamaño de Grano μm
1	O	449.53	597.35	0.257	878.9	9
1	C	516.35	617.60	0.257	961.3	9
1	M	439.62	589.62	0.283	850.36	9
2	O	440.49	604.05	0.139	794.6	9
2	C	455.60	605.45	0.289	921.2	9
2	M	471.80	629.75	0.308	966.2	9

*O: operador C: centro M: motores

Tabla 4.2. Composición química de las muestras.

Tubo	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Cu	Al	Ti	Nb	S	P	B
1	0.068	0.21	0.83	0.12	0.023	0.028	0.041	0.0036	0.032	0.03	0.0032	0.0045	0.01	0.016	0.0004
2	0.14	0.16	0.84	0.13	0.15	0.06	0.042	0.0038	0.032	0.036	0.0057	0.0045	0.018	0.0059	0.0004

A la par de la recopilación de las muestras en cada uno de los pasos, se media mediante una cinta métrica el porcentaje de deformación que tenía y así mismo el amperaje que consumía el motor del paso al experimentar esa deformación. Los datos de estas deformaciones y amperajes se muestran en las Tablas 4.3 y 4.4.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 4.3. Deformaciones y amperajes del tubo I.

	MOTORES		CENTRO		OPERADOR	
	ϵ [%]	Amperaje	ϵ [%]	Amperaje	ϵ [%]	Amperaje
Placa	0	0	0	0	0	0
1er Preforma	0.2101	43	0.2101	43	0.2101	43
2do Preforma	0.629	24	0.629	24	0.629	24
3er Preforma	0.9629	33	0.9629	33	0.9629	33
4to Preforma	1.2126	53	1.2126	53	1.2126	53
3er Guías	1.0462	111	1.0462	111	1.0462	111
Soldadora	1.0462	146	1.0462	146	1.0462	146
Enderezado 1	1.0046	65	1.0046	65	1.0046	65
Enderezado 2	1.0878	70	1.0878	70	1.0878	70
Final	0.7126	110	0.7126	110	0.7126	110

Tabla 4.4. Deformaciones y amperajes del tubo II.

	MOTORES		CENTRO		OPERADOR	
	ε [%]	Amperaje	ε [%]	Amperaje	ε [%]	Amperaje
Placa	0	0	0	0	0	0
1er Preforma	0.2101	45	0.2101	45	0.2101	45
2do Preforma	0.629	24	0.629	24	0.629	24
3er Preforma	0.9629	48	0.9629	48	0.9629	48
4to Preforma	1.2126	60	1.2126	60	1.2126	60
3er Guías	1.0462	120	1.0462	120	1.0462	120
Soldadora	1.0462	145	1.0462	145	1.0462	145
Enderezado 1	1.0046	23	1.0046	23	1.0046	23
Enderezado 2	1.0878	80	1.0878	80	1.0878	80
Final	0.7126	109	0.7126	109	0.7126	109

4.3.2 PREPARACION DE MUESTRAS

Las muestras de acero que se obtuvieron en planta fueron sometidas a una preparación, para así poderlas caracterizar. Debido a que las muestras tomadas fueron cortadas entre cada uno de los pasos, éstas se encontraban curvadas por la deformación a la que fueron sometidas. Las muestras tuvieron que ser en una máquina especial. Una vez realizado el proceso de enderezado, las probetas fueron maquinadas y careadas para evitar concentración de esfuerzos. Las dimensiones de las muestras, fueron seleccionadas para que la máquina de ensayos mecánicos tensión/compresión con que se contaba, pudiera ensayarlas sin afectar sus componentes. La magnitud de las probetas se observa en la figura 4.3.

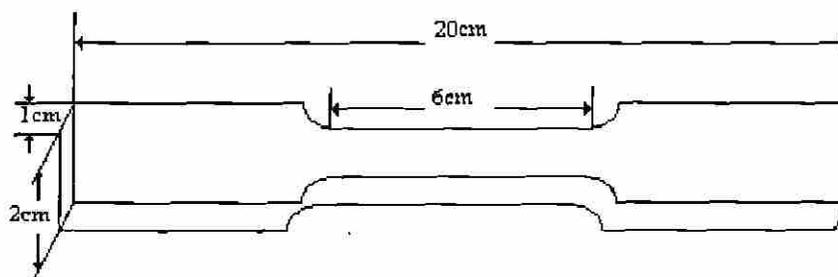


Figura 4.3. Dimensiones de la probeta de tensión.

4.3.3 ENSAYOS DE TENSION

Una vez realizada la preparación de las muestras, se procedió a dimensionar las muestras ya que entre cada una de ellas existió una diferencia debido al maquinado. Los datos fueron alimentados a un programa de computadora que es el encargado de controlar los movimientos de la maquina de tensión.

Cuando estuvo listo el análisis dimensional se realizaron los ensayos de tensión en todas las probetas, para obtener las características de las muestras y saber si hubo cambio de ellas entre cada uno de los pasos. Los parámetros que se aplicaron en los ensayos fueron exactamente los mismos en todos los ensayos para evitar posibles variaciones.

Los datos que se obtuvieron en la maquina universal fueron tabulaciones de carga contra desplazamiento. Estos resultados fueron almacenados en una base de datos, para manipularlos mediante un programa que se diseñó y así conocer sus propiedades mecánicas reales.

4.4 MODELACION POR ELEMENTO FINITO

4.4.1 MOLINO DE CONFORMADO

Se realizó un levantamiento en planta, del molino de conformado de tubos, se recopilaron las dimensiones de los rodillos y la distancia que hay entre cada uno de ellos, así como la elevación con respecto del piso que tienen, para conocer las medidas exactas y poderlo reproducir a escala.

Primero se generó la geometría del proceso completo de fabricación de tubos por medio de la interfase gráfica de NISA/DISPLAY, para tener una visión más amplia del problema que se va a analizar. La imagen generada se puede observar en la figura 4.4.

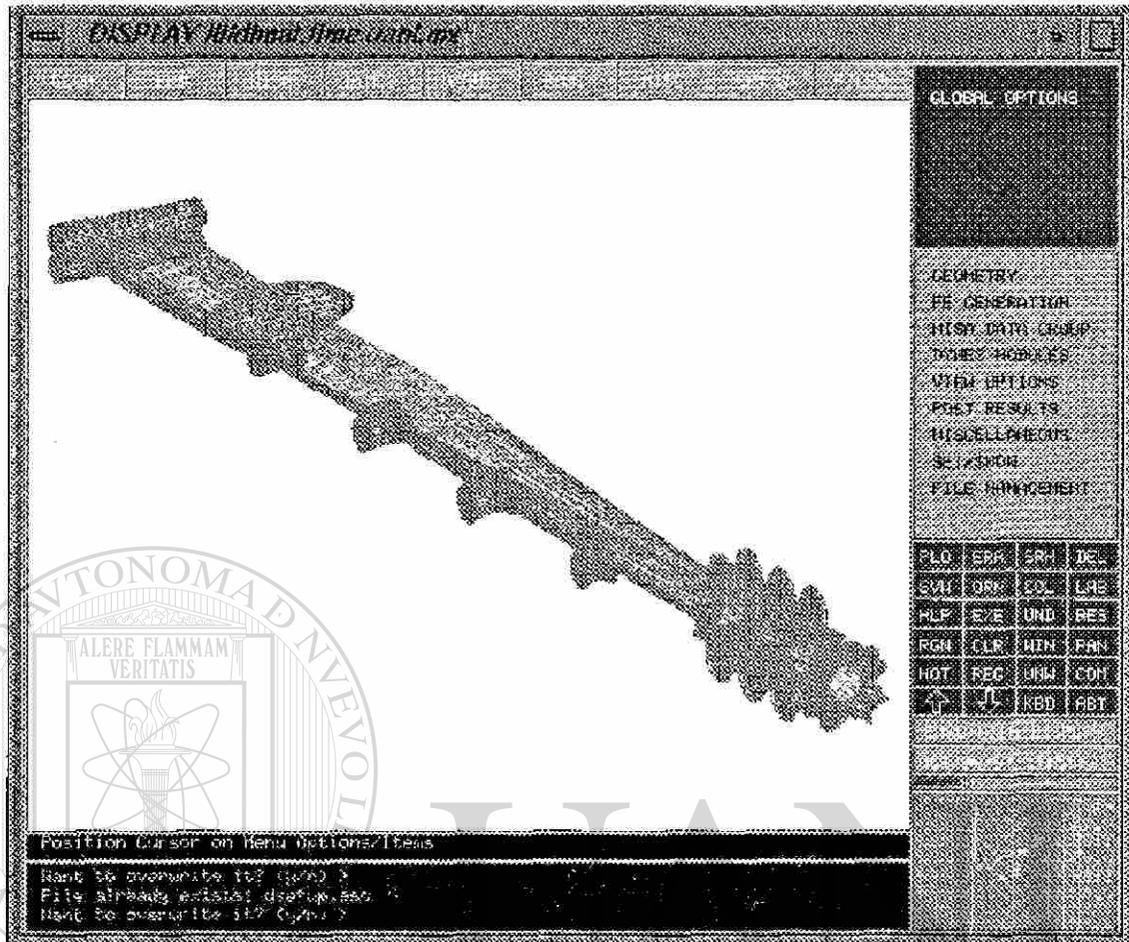


Figura 4.4. Molino de conformado.

4.4.2 MODELAO TRANSVERSAL DE LA PLACA

El realizar la modelación completa del conformado de tubos, con todos los diferentes componentes y variables que interviene en el proceso, sería realmente muy complicado y el costo en tiempo sería muy alto. Por lo que, como primera instancia, se tiene que simular el problema en su forma más simple posible. Esta metodología es la más adecuada, ya que para cualquier tipo de análisis, se requiere tener una idea clara, pero de la forma más simplificada posible, de las variables que gobiernan el proceso.

GENERACION DE LA GEOMETRIA. El primer modelo que se realizó en este trabajo es del tipo bidimensional, para, de esta manera, poder aislar el problema y llevarlo a una

forma relativamente simple. Se construyó un modelo sólido el cual representa una placa de acero, vista desde su sección transversal, que está asociada al herramental que lo deformará hasta obtener la forma circular. La figura 4.5 muestra la construcción del modelo mediante un diseño en NISA/DISPLAY.

MALLADO. El mallado, aunque no lo pareciera, es una parte sumamente importante, ya que, dependiendo del elemento seleccionado, será la exactitud de los resultados, así como el número de éstos. El modelo que se generó fue mallado con un tipo de elemento que aplica esfuerzo plano. Se tuvo mucho cuidado para que los elementos generados tuvieran el espacio y la continuidad óptima. En la figura 4.5 se puede observar también la forma de la malla empleada en la placa y un acercamiento de ella.

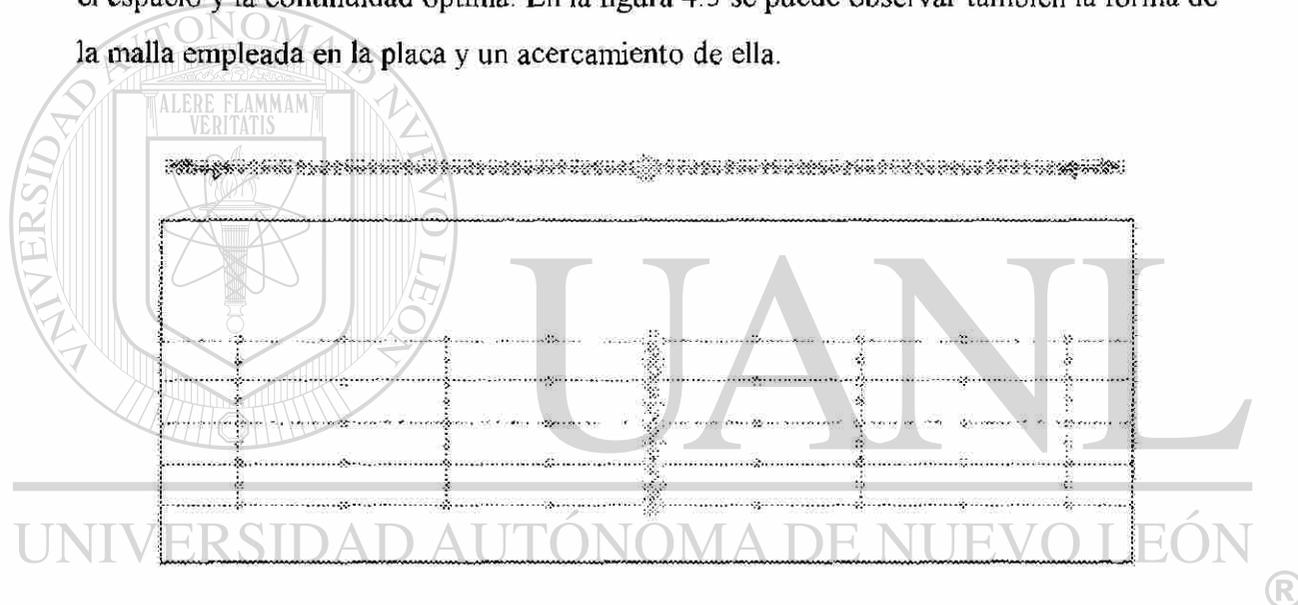


Figura 4.5. Modelo de una placa de acero.

ESPECIFICACION DE PROPIEDADES MECANICAS Y CONDICIONES A LA FRONTERA. Para finalizar la simulación se procedió a definir y alimentar al paquete una serie de datos que caracterizan las propiedades del material, como son el módulo de young, el de poisson, límite de cedencia inicial y endurecimiento por deformación. Estos fueron obtenidos de los resultados experimentales de la placa. Las condiciones a la frontera que gobiernan al proceso, como desplazamientos, rotaciones, velocidad, fuerzas y momentos, fueron asignados al modelo.

4.4.3 MODELADO LONGITUDINAL DE LA PLACA

Como segunda instancia a esta investigación, se realizó un modelo definido como una superficie tridimensional, que representará la deformación idealizada de una placa de metal que será deformada desde plana, hasta obtener la forma circular del tubo, pasando gradualmente por los diferentes pasos.

GENERACION DE LA GEOMETRIA. Se construyó un modelo con elementos tipo placa para representar una superficie que simule la placa deformada. La construcción de este modelo se realizó por medio de la interfase gráfica NISA/DISPLAY. Este modelo ya es tridimensional y, a igual que el bidimensional, está asociado a un herramental que le permitirá y restringirá los desplazamientos para poder ser deformados entre un paso y otro. Las figuras 4.6 y 4.7 muestran la geometría del modelo pero vista transversalmente y longitudinalmente, respectivamente.

MALLADO. La malla que se utilizó en este modelo es complicado, ya que se requiere que todos los elementos tengan la continuidad y por la forma de la placa es difícil acoplarlos. Aunque estos elementos son de tipo bidimensional, se considera al modelo tridimensional al acoplar todos los elementos. En las figuras 4.6 y 4.7 se muestra el tipo de mallado realizado.

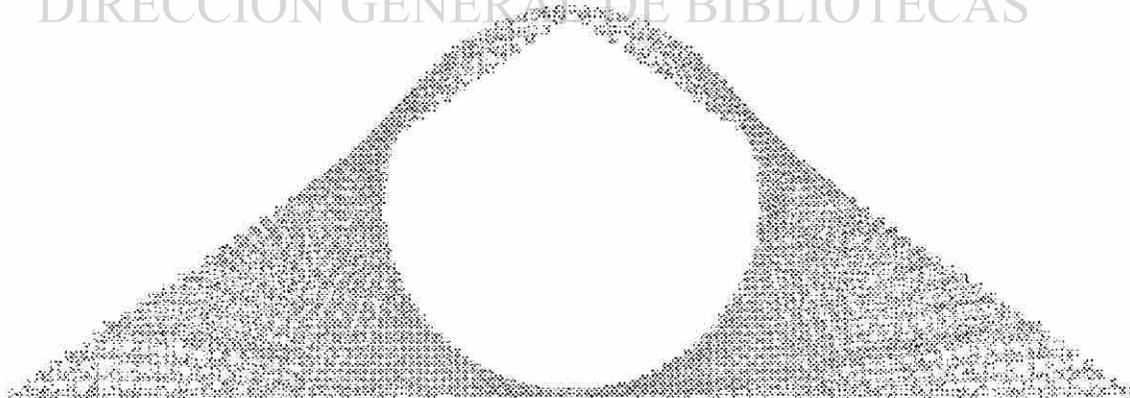


Figura 4.6. Representación idealizada de la placa transversal.

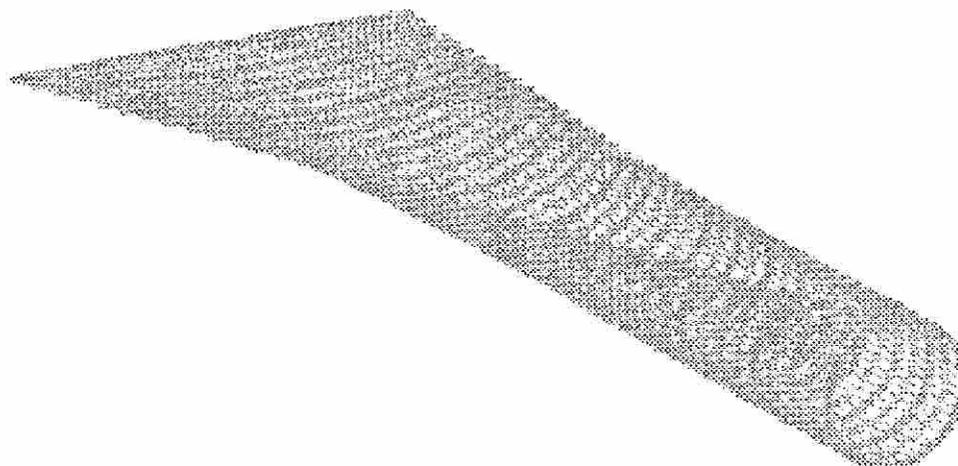


Figura 4.7. Representación idealizada de la placa longitudinal.

ESPECIFICACION DE PROPIEDADES MECANICAS Y CONDICIONES A LA FRONTERA. Las propiedades del material que se utilizaron en este modelo fueron las mismas que se utilizaron para el bidimensional. Las condiciones a la frontera fueron colocadas siguiendo la secuencia que se tiene en el molino, pero con datos generados a partir del modelo bidimensional. De aquí la importancia de simplificar los modelos, para después llevarlos cada vez más hacia lo complejo. Los movimientos de la placa se expresan en forma matemática utilizando funciones específicas.

4.4.4 ELEVACION DE LA PLACA

Cuando un tubo está siendo conformado, está sujeto a esfuerzos de tensión y compresión durante el proceso, por lo que al cambiar en un mismo punto los esfuerzos tensiles a compresibles, el esfuerzo de cedencia es diferente. Existen muchas razones para que este cambio se presente, algunas de ellas se deben a la relación que existen entre el diámetro y el espesor y otra es el cambio de elevación de los rodillos a lo largo de proceso. Estos cambios de tensión a compresión viéndolos desde el punto de vista metalúrgico, se les considera en un ciclo de histerisis, y al fenómeno asociado al cambio en el esfuerzo de cedencia se le conoce como efecto Bauschinger⁴. Como se dijo

anteriormente este fenómeno es muy difícil de introducirlo en la teoría de la plasticidad. Este efecto ha sido incluido en la presente investigación y al modelo se le ha incorporado la elevación de la placa en el molino, misma que cambia dependiendo del producto, tal como se puede apreciar en la figura 4.8.

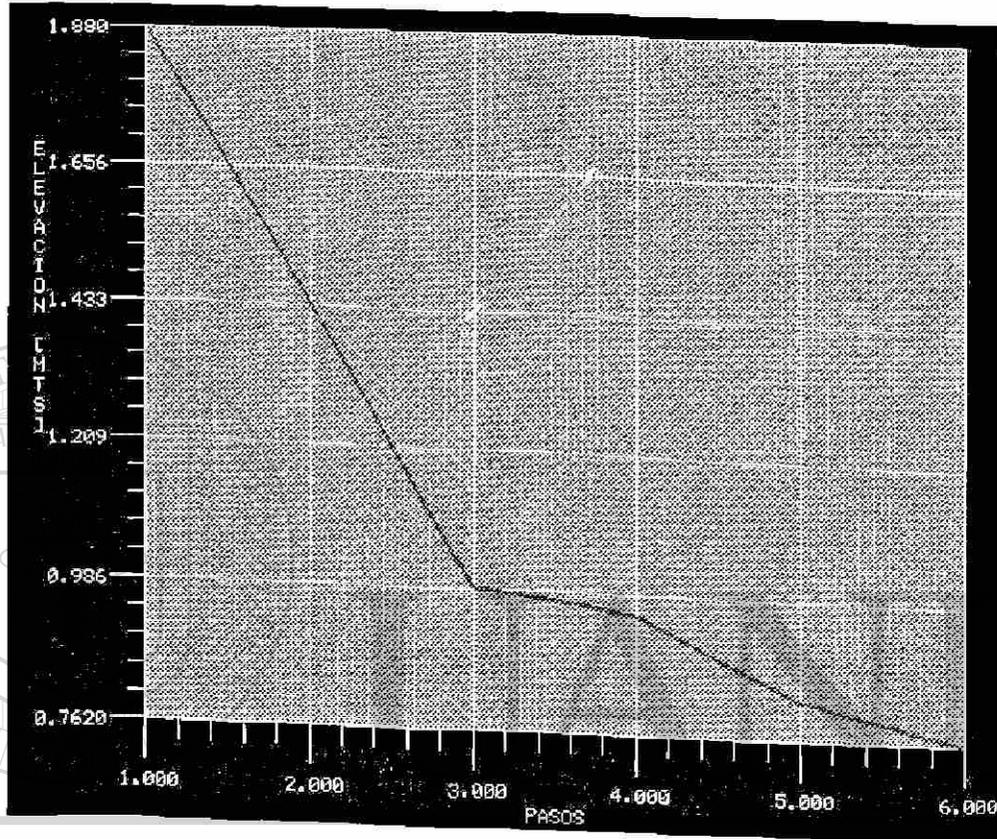


Figura 4.8. Elevación de la placa.

Los valores empleados en la elevación son los mismos que se emplearon en el molino de conformado y se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Elevación de la placa.

Paso	Elevación [mts]
Inicio	1.8796
1er Preforma	1.4351
2do Preforma	0.987293
3er Preforma	0.9525
4to Preforma	0.825246
1er Guías en adelante	0.762

CAPITULO 5

RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 INTRODUCCION

Una vez realizada la modelación y experimentación, se procede, en el presente capítulo, al análisis y discusión de resultados de los datos que surgieron de la parte experimental, así como aquellos que fueron generados a partir del modelo propuesto. Los resultados obtenidos del modelo realizado por el método del elemento finito se validan con estos datos.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como se mencionó anteriormente, se realizaron ensayos de tensión a una serie de muestras, se analizaron dos tubos, a los cuales se les tomaron probetas en diferentes puntos del molino hasta completar 30 muestras por cada uno. Los resultados obtenidos de la maquina de tensión INSTRON fueron almacenados en una base de datos para tener un mejor control de la información, ya que el número de muestras es muy grande y se pudo haber tenido pérdida de la misma. Posteriormente, mediante un programa realizado en Turbo Pascal, se procedió a hacer un análisis de las pruebas, se elaboró la gráfica carga-desplazamiento a cada una de las muestras, para que, a partir de ésta, se pudiera obtener la gráfica esfuerzo-deformación característica de cada paso. Una vez generadas las gráficas para cada una de las muestras, se procedió a caracterizarlas obteniendo sus propiedades mecánicas reales, como es esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo y los parámetros de endurecimiento por deformación n y k (ver ecuación 2.7). Estos resultados, se muestra en las Tablas 5.1 y 5.2.

Tabla 5.1. Propiedades mecánicas de las muestras del tubo 1.

MOTORES				
	σ_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	n	k [MPa]
Placa	428.03	581.3	0.076	669.5
1er Preforma	540.65	637.85	0.294	1133.2
2do Preforma	419	562.61	0.21	808
3er Preforma	418.69	580.06	0.272	889.5
4to Preforma	442.67	580.06	0.298	948.9
3er Guías	453.58	617.13	0.262	957
Soldadora	495.95	495.95	0.37	1169.6
Enderezado 1	493.45	615.57	0.319	1122.2
Enderezado 2	458.56	590.65	0.257	947.6
Final	499.37	621.49	0.225	978.7
CENTRO				
	σ_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	n	k [MPa]
Placa	516.35	617.6	0.257	961.6
1er Preforma	549.53	647.66	0.288	1117.8
2do Preforma	407	560.9	0.234	862.7
3er Preforma	449.53	577.1	0.206	858.9
4to Preforma	483.956	605.45	0.257	937.5
3er Guías	429.28	566.97	0.277	899
Soldadora	504.2	605.45	0.251	971.4
Enderezado 1	492.05	601.4	0.257	989.3
Enderezado 2	459.813	566.35	0.287	964.9
Final	475.38	590.96	0.272	1024.8
OPERADOR				
	σ_o [MPa]	σ_{max} [MPa]	n	k [MPa]
Placa	449.53	597.35	0.257	878.9
1er Preforma	433.33	577.103	0.219	810.1
2do Preforma	433.33	577.103	0.234	842.4
3er Preforma	449.53	589.25	0.306	934.8
4to Preforma	439.4	585.2	0.233	850.6
3er Guías	433.33	575.07	0.272	941.4
Soldadora	504.2	639.87	0.294	1067.8
Enderezado 1	469.78	585.2	0.276	1001.4
Enderezado 2	471.8	591.27	0.33	1027
Final	439.4	558.87	0.265	957.4

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas del tubo 2.

MOTORES				
	σ_0 [MPa]	σ_{max} [MPa]	n	k [MPa]
Placa	471.8	629.75	0.308	966.2
1er Preforma	451.55	609.5	0.283	968.2
2do Preforma	453.58	630.21	0.262	917.8
3er Preforma	466.66	647.66	0.261	978.6
4to Preforma	427.26	683.17	0.286	930.8
3er Guías	439.4	613.55	0.306	1009.2
Soldadora	463.7	601.4	0.286	1065
Enderezado 1	445.48	593.3	0.236	940.7
Enderezado 2	475.38	621.49	0.356	1098.3
Final	502.18	625.7	0.278	1040.3
CENTRO				
	σ_0 [MPa]	σ_{max} [MPa]	n	k [MPa]
Placa	455.6	605.45	0.289	921.2
1er Preforma	443.45	613.55	0.255	914.9
2do Preforma	455.6	611.52	0.266	918.8
3er Preforma	465.73	633.8	0.379	1116.7
4to Preforma	451.55	603.42	0.354	1143.7
3er Guías	492.05	631.77	0.308	1132.9
Soldadora	481.93	621.65	0.441	1297.3
Enderezado 1	488	627.72	0.304	1077.9
Enderezado 2	463.7	613.55	0.274	1046
Final	463.7	601.4	0.325	1099
OPERADOR				
	σ_0 [MPa]	σ_{max} [MPa]	n	k [MPa]
Placa	440.49	604.05	0.139	794.6
1er Preforma	466	656.38	0.428	1117.6
2do Preforma	0		0	0
3er Preforma	409.3	591.27	0.192	828.8
4to Preforma	407	591.27	0.187	813.8
3er Guías	417.13	581.15	0.114	727
Soldadora	455.6	589.25	0.198	883.4
Enderezado 1	449.53	597.35	0.319	1046
Enderezado 2	471.8	617.6	0.318	1065.4
Final	481.931	619.62	0.253	982.7

El comportamiento del esfuerzo de cedencia, σ_0 , se muestran en la figura 5.1 en ella se puede apreciar un leve descenso conforme va avanzando el proceso, a excepción de un par de valores que están en el segundo paso del primer tubo, que pertenecen al centro y al lado de motores del molino, pero esto se debió quizá a un problema de la probeta.

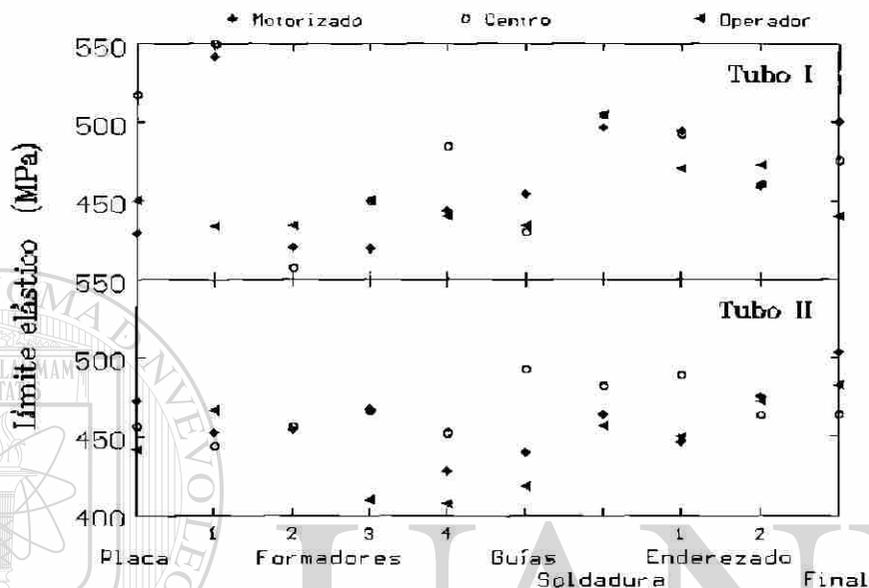


Figura 5.1. Esfuerzo de cedencia en cada paso.

El esfuerzo de cedencia en general, disminuye hasta llegar al principio del cuarto paso de preforma y, posteriormente, éste aumenta bruscamente y después desciende suavemente en los enderezadores y en el paso calibrador (sizer). Aunque se sabe que el esfuerzo de cedencia es característico del material (y en principio se esperaría que el esfuerzo de cedencia fuera aumentando conforme la deformación se incrementa, es decir se esperaría que aumentara en cada paso debido a la deformación), la forma en el cambio del esfuerzo de cedencia se puede deber a muchos factores que van desde las condiciones de formado, el coeficiente de endurecimiento por deformación (n), pero especialmente a cambio de las zonas tensiles a compresibles, también llamado efecto Bauschinger⁴. Otros aspectos que pudieran intervenir en la variación de las propiedades mecánicas, como son el tamaño de grano, la composición química, la historia térmica de la placa, las

condiciones de laminado y mecanismos microestructurales, pudiera ser investigado en el futuro.

La variación de la resistencia máxima tensil se observa en la figura 5.2 y resulta ser muy similar al cambio que se presenta en la figura 5.1. El descenso que presenta también es característico del fenómeno Bauschinger. Se puede afirmar que el valor de la resistencia tensil depende de la cantidad de deformación y de la forma en que ésta se aplique al material. Para las tres diferentes zonas investigadas en ambos tubos la resistencia máxima se comporta de manera muy similar.

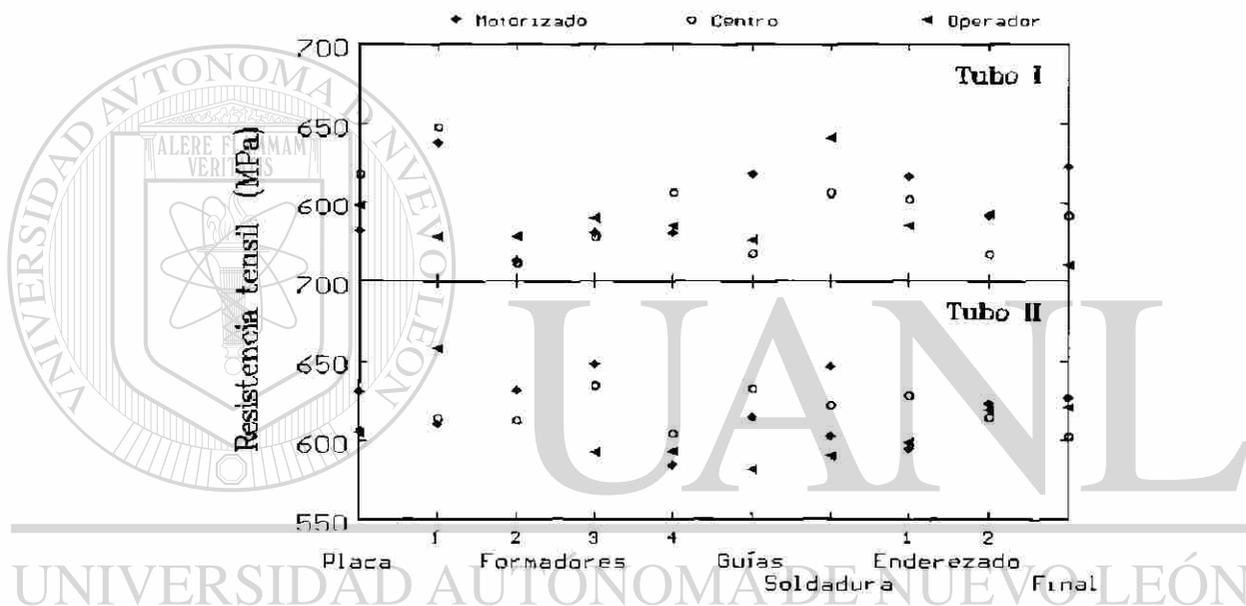


Figura 5.2. Cambio del esfuerzo máximo en cada paso.

Se realizó, de igual manera, el análisis de los coeficientes de endurecimiento n y k , figuras 5.3 y 5.4. El comportamiento de estos parámetros no se puede describir con certeza, ya que el tubo dos no tiene un comportamiento estable, aunque si se observan los valores de n y k en este tubo, se aprecia que cuando en la parte del centro aumentan, en la parte de operadores disminuye y en la de motores se puede decir que se mantiene. En el tubo número uno el comportamiento es más estable, en éste se puede observar como los valores aumentan conforme cambia de paso. Los cambios en el tubo dos se pueden deber a un problema en la medición de este parámetro y no necesariamente a una

dependencia con la deformación, en tanto que en el tubo uno si se puede ver una dependencia con deformación, e incluso su comportamiento tiene semejanza con el del limite elástico.

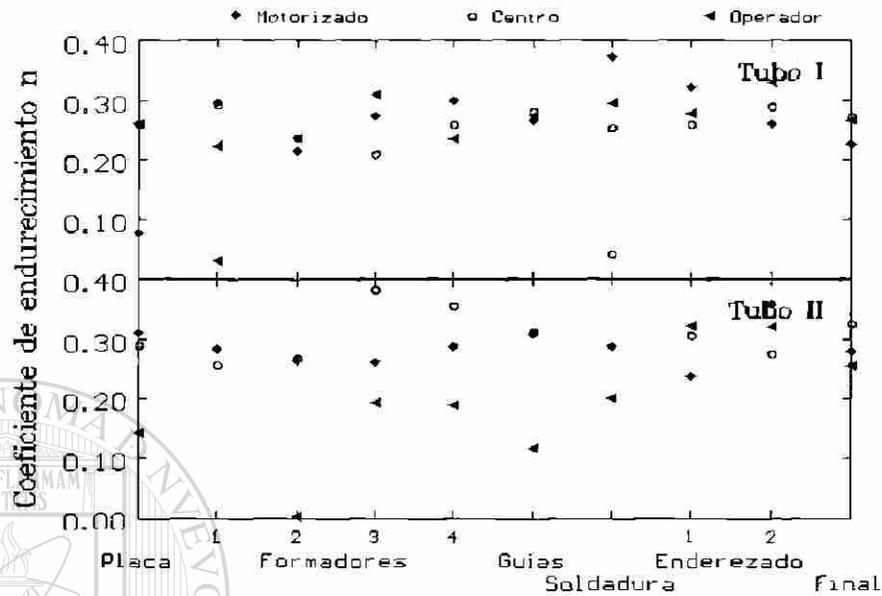


Figura 5.3. Exponente de endurecimiento por deformación (n) en cada paso.

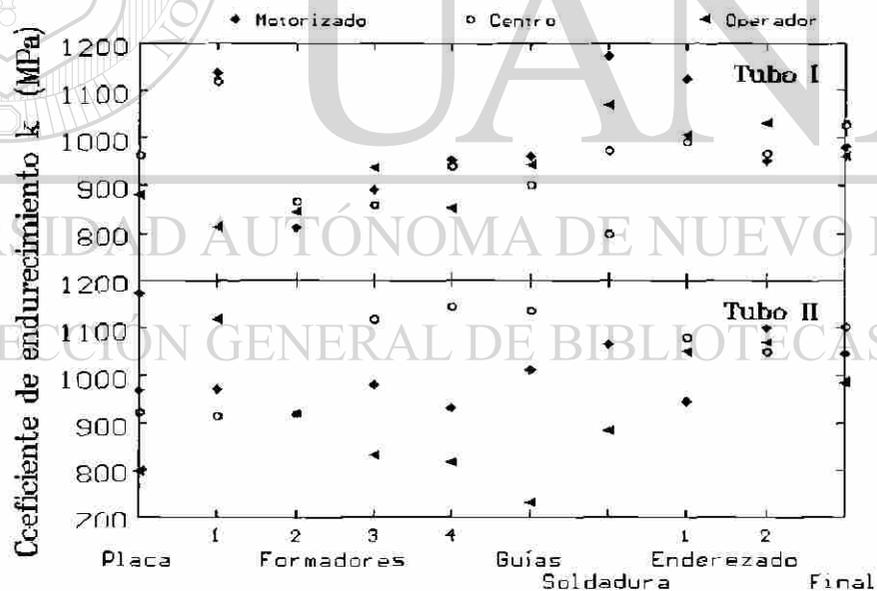


Figura 5.4. Coeficiente de endurecimiento por deformación (k) en cada paso.

Se tomaron los valores de corriente que consumió el motor correspondiente a cada paso en la línea, así como la deformación que se dio a la placa en cada uno de ellos,

esto se llevó a cabo al medir el ancho exterior de la placa. En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran los resultados obtenidos. En la figura 5.6 se aprecia un comportamiento muy similar al de las figuras 5.1 a 5.3, por lo que se presume que las propiedades mecánicas del material se reducen al disminuir la corriente.

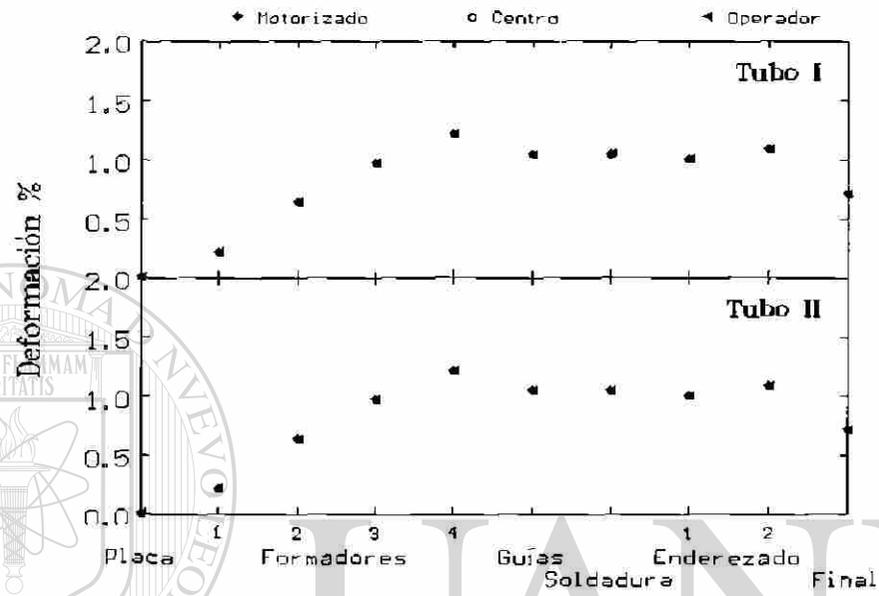


Figura 5.5. Deformación en cada paso.

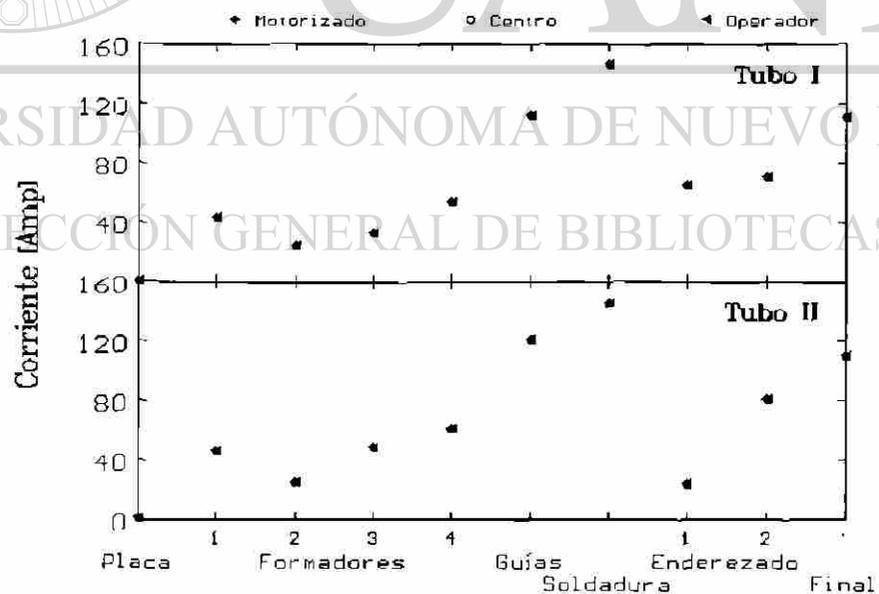


Figura 5.6. Amperaje consumido en los motores de cada paso.

5.3 MODELACION POR FEM

5.3.1 MODELACION DE LA SECCION TRANSVERSAL

Como se mencionó en el capítulo anterior, en la primera parte de esta investigación se genera un modelo en dos dimensiones, para de esta forma conocer el estado de esfuerzos de la placa en su sección transversal. Una vez que ha sido generado este modelo y colocado las diferentes condiciones de frontera, para hacer real el problema, se realizó una serie de corridas con el paquete hasta encontrar el resultado más certero.

El modelo desarrolla lo que se conoce como una flor de deformación. Para generarlo se tomaron en cuenta dos criterios; el primero fue partir de un material isotrópico, el segundo fue el de la no-linealidad de la geometría. Una vista esquemática del proceso que sufre la placa hasta llegar a la soldadura, se muestra en la figura 5.7.

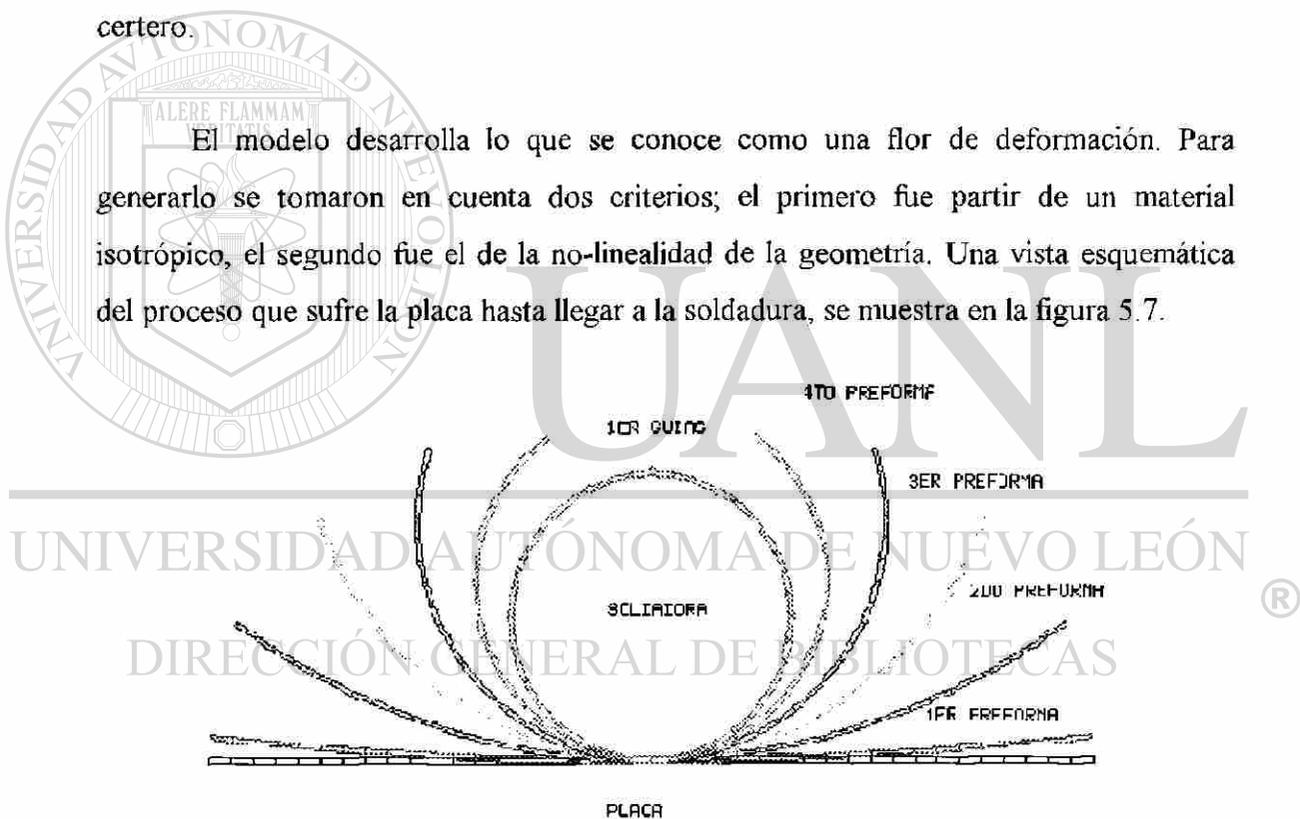


Figura 5.7. Flor de deformación.

La figura 5.7 indica el desplazamiento (vista desde la parte transversal) que tiene la placa de acero en los diferentes pasos de deformación. En esta figura se aprecia como la placa se deforma de manera homogénea evitando que exista una concentración de

esfuerzos. Las deformaciones que van teniendo lugar en la placa en cada paso se pueden visualizar en forma gráfica en la figura 5.8.

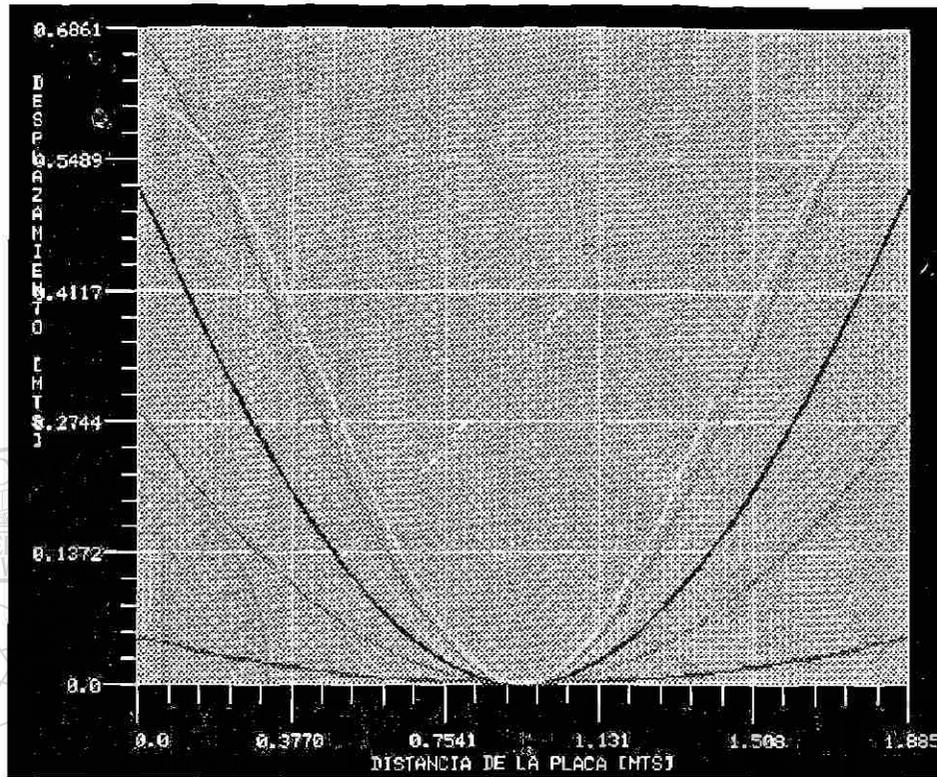


Figura 5.8. Deformaciones obtenidas a partir de la figura 5.7.

La figura 5.8, que se obtuvo con el paquete de elemento finito, muestra la tendencia que tiene la deformación con respecto a la distancia de la placa, y en la figura 5.9 se muestra los mismos resultados pero en tres dimensiones.

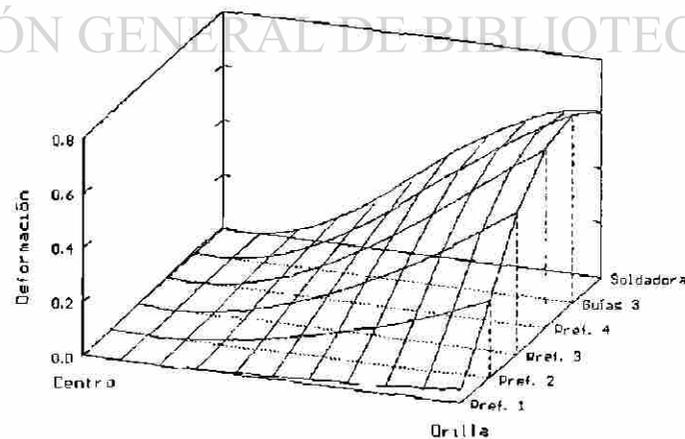


Figura 5.9. Deformación en tres dimensiones.

En la figura 5.10 se comparan las flores de deformación que se tomaron físicamente durante el proceso y la que surge del modelo propuesto.

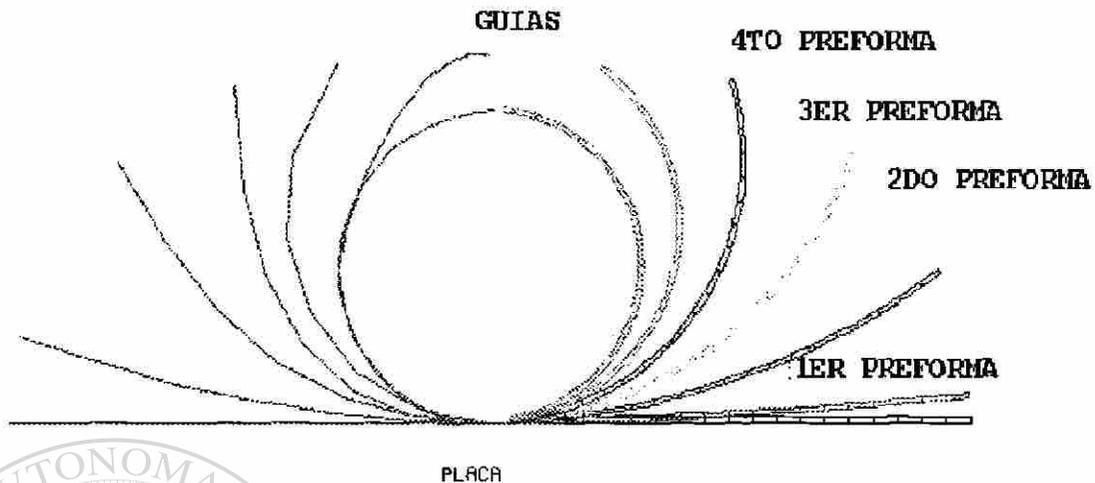


Figura 5.10. Comparación en las deformaciones.

Esta figura muestra como el modelo propuesto se acerca mucho a la realidad, en los primeros pasos el modelo arroja deformaciones más bajas que las que se presentan en la línea pero el modelo se aproxima más en los pasos finales.

El análisis de esfuerzos se determinó en base a los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas. En esta parte se consideró un criterio de fluencia, así como un esfuerzo de cedencia inicial y un coeficiente de endurecimiento por deformación. Se realizó un análisis de las propiedades mecánicas obtenidas por el paquete en cada uno de los pasos hasta la soldadora, Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Propiedades mecánicas a partir del modelo.

Pasos de deformación	σ_0 [MPa]	σ_{max} [Mpa]
Valor inicial promedio de la placa	460.3	605.9167
1er Preforma	507	658.3
2do Preforma	415.8	525.8
3er Preforma	463.2	536.4
4to Preforma	508.9	602.7
3er Guías	452.9	583.7
Soldadora	465.4	610.9

En la figura 5.11 se muestran los esfuerzos calculados en el elemento central de la placa en cada paso. Las mediciones del modelo indican la existencia de un gradiente compresivo, en el interior del tubo (parte superior del diagrama), a tensil en el exterior del tubo. En la figura 5.11 quizás no se aprecie un cambio notorio del estado de esfuerzo, lo que es debido a la escala que se está manejando.

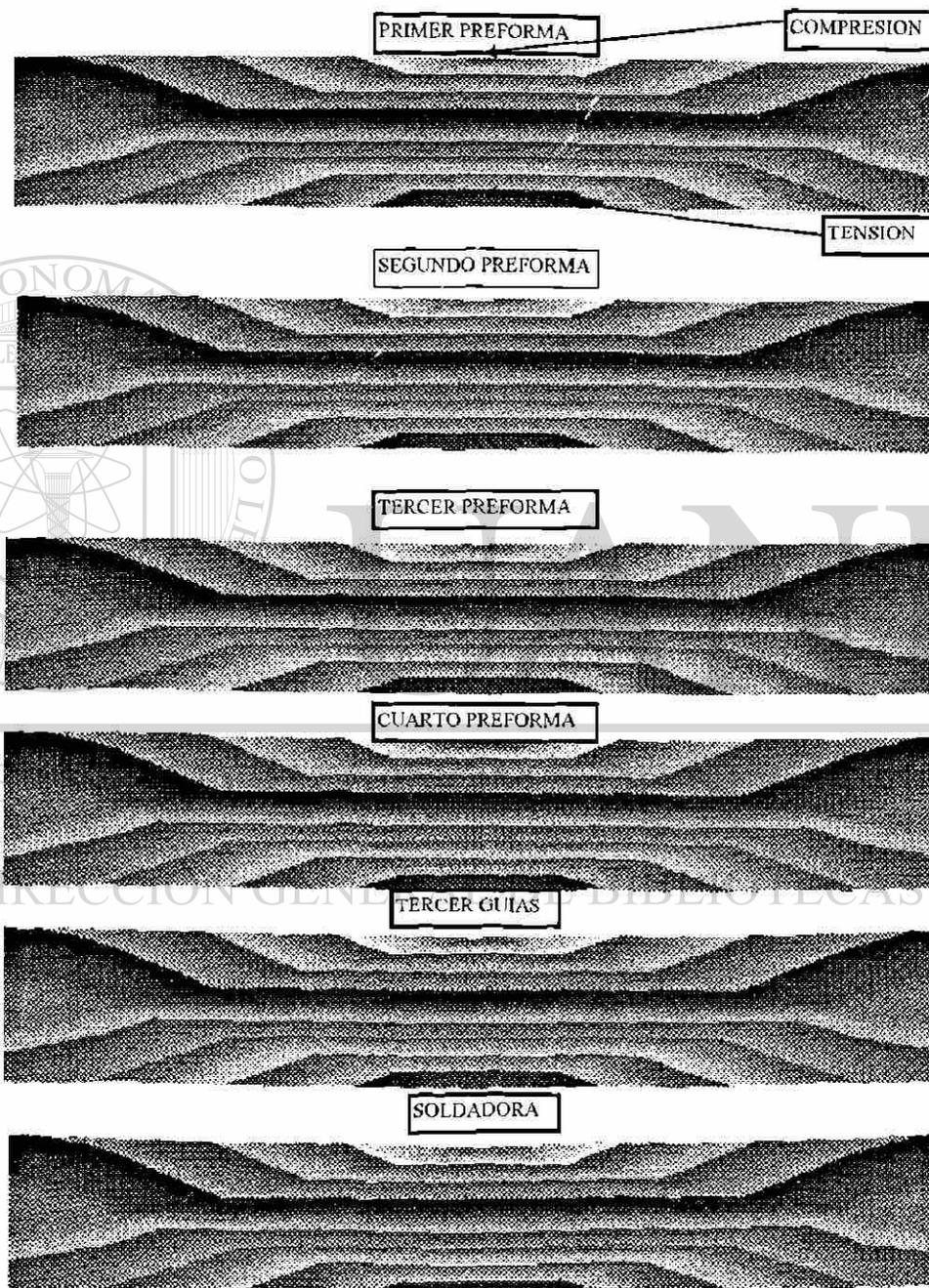


Figura 5.11. Estado de esfuerzos.

5.3.2 MODELACION DE LA SECCION LONGITUDINAL

Como se mencionó con anterioridad, en segunda parte de esta investigación se genera un modelo tridimensional, simulando una placa de acero idealizada que es deformada hasta llegar a la forma circular. Los datos iniciales de las propiedades mecánicas son los mismos que se utilizaron en el modelo anterior.

En este modelo se consideró que existía simetría a lo largo del tubo por lo que solamente se modeló la mitad del tubo. El modelo presenta un estado inicial deformado hasta la parte de la soldadura considerando todos los pasos. La figura 5.12 muestra el modelo.

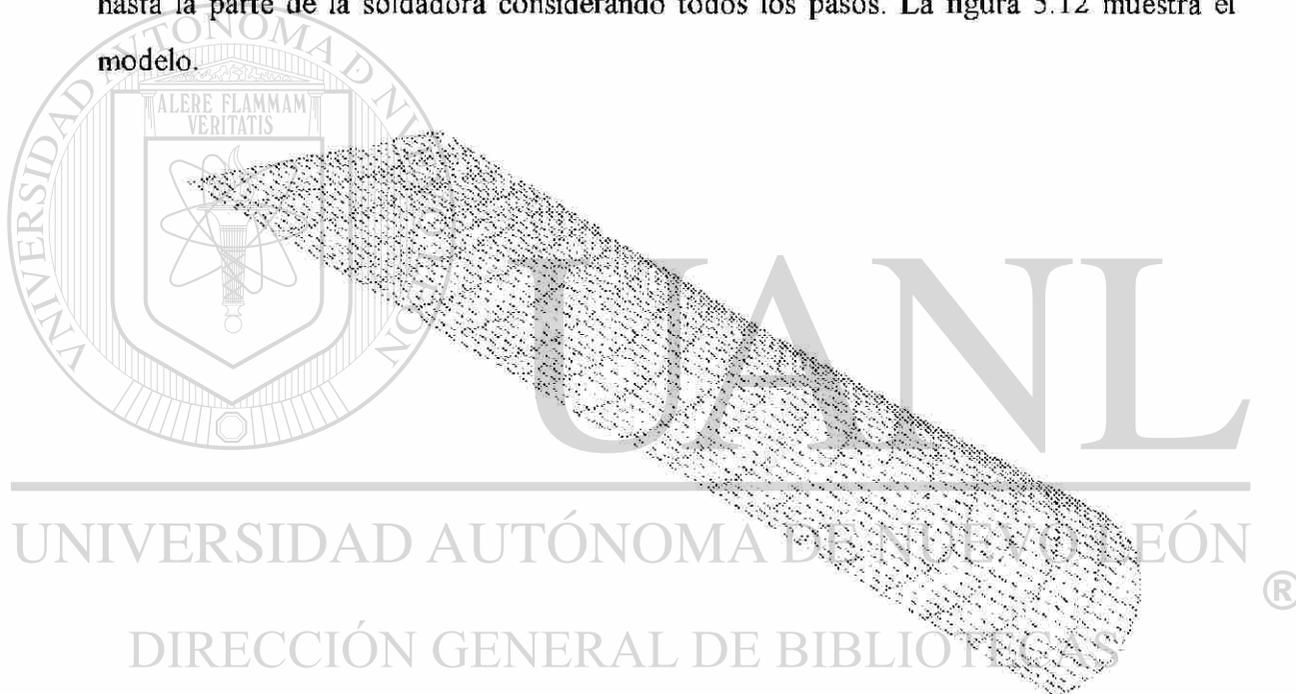


Figura 5.12. Modelo longitudinal, solo se muestra una mitad del tubo.

Se realizaron una serie de corridas del modelo para encontrar la distribución de las deformaciones que se presentaron a lo largo de la placa que es deformada en el molino. En la figura 5.13, se observa la distribución de la deformación que arrojó el modelo. Se obtuvo un promedio de los valores numéricos de este modelo y fueron tabulados en conjunto con los valores reales, dando como resultado la Tabla 5.4. Los datos de

deformaciones obtenidos, son muy similares a los de las deformaciones reales de placa que se obtuvieron en planta, figura 5.14.

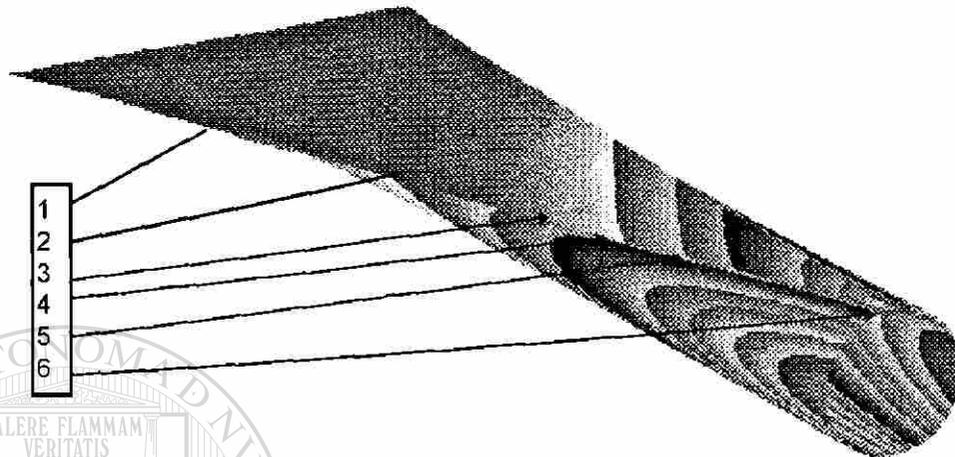


Figura 5.12 Distribución de deformación.

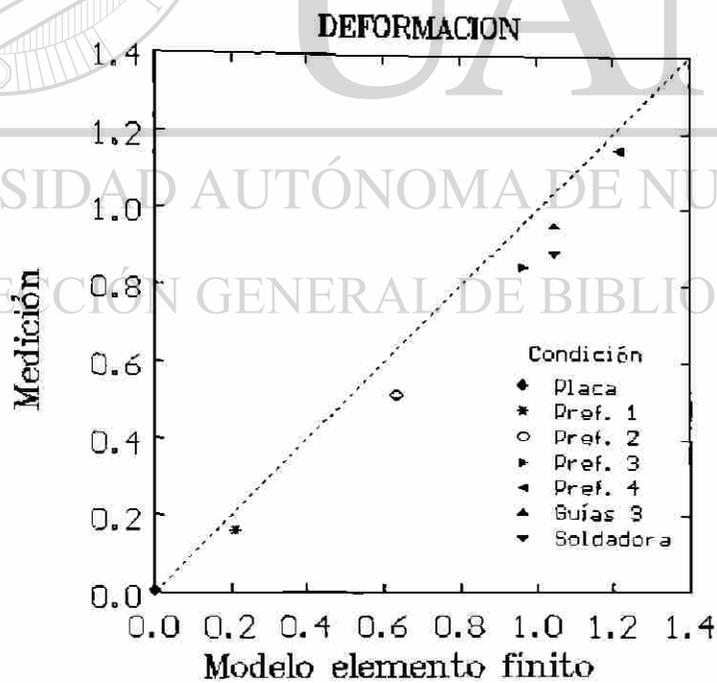


Figura 5.14. Comparación de las deformaciones por ambas técnicas.

Tabla 5.4. Deformación de la placa.

Contorno	Deformación FEM	Deformación REAL
1	0	0
2	0.211	0.156
3	0.629	0.514
4	0.9629	0.853
5	1.2126	1.159
6	1.0462	0.958
7	1.0462	0.889

De igual forma se realizó un análisis para obtener los desplazamientos con respecto al plano de placa. Los contornos de los desplazamientos en la placa se observan en la figura 5.15. Los valores de los contornos de desplazamiento que se observan en la figura 5.15 se presentan en la Tabla 5.5.

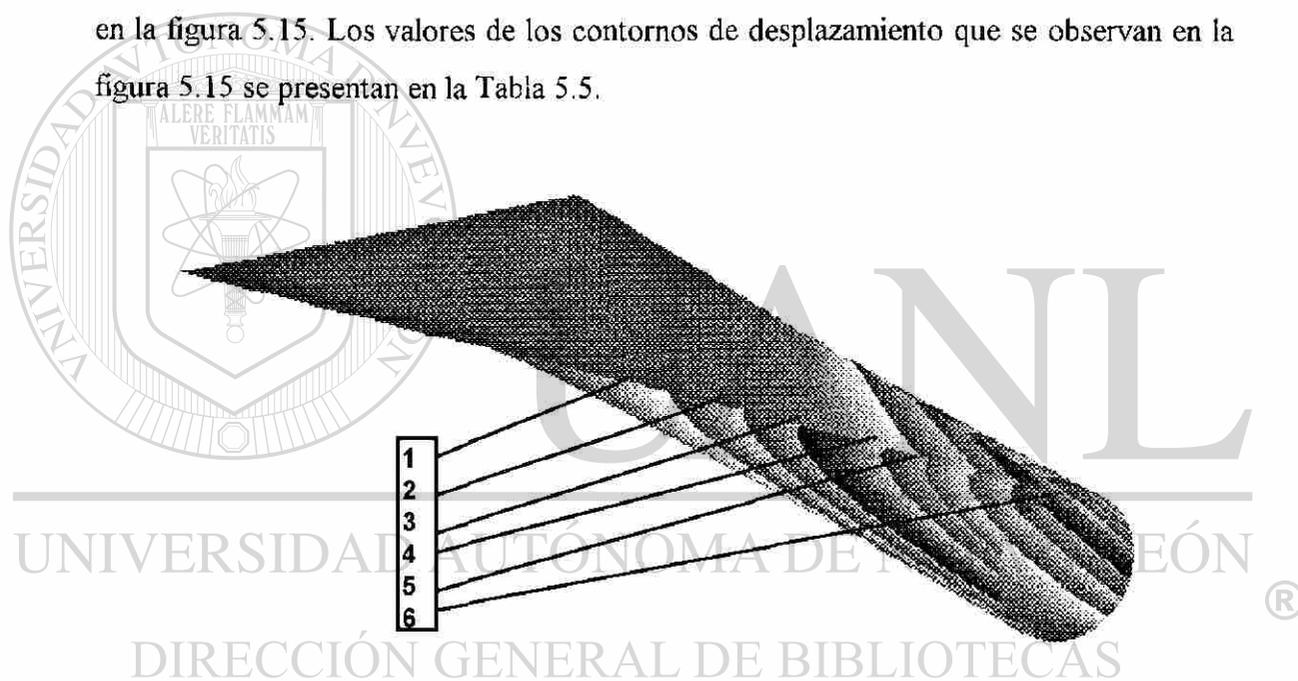


Figura 5.15. Desplazamientos de la placa.

Tabla 5.5. Desplazamientos.

Contorno	Desplazamiento
1	3.66184
2	7.4896
3	10.5968
4	14.2657
5	16.5965
6	21.8915

Como parte de la validación de los modelos generados por FEM, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por la técnicas experimental y por el método del elemento finito. Se obtuvo el promedio del valor de las propiedades mecánicas en las muestras ensayadas, independientemente que fueron dos tubos ensayados. La Tabla 5.6. muestra los datos que se obtuvieron con ambas técnicas.

Tabla 5.6. Propiedades mecánicas de ambas técnicas.

Pasos de deformación	σ_e [MPa]	σ_e [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	σ_{max} [Mpa]
	REAL	FEM	REAL	FEM
Placa	460.34	460.34	605.91	605.91
1er Preforma	480.75	507.12	623.67	658.32
2do Preforma	433.70	415.86	588.46	525.84
3er Preforma	443.24	463.28	603.19	536.46
4to Preforma	441.97	508.99	591.42	602.78
3er Guías	444.12	452.90	597.60	583.73
Soldadora	484.26	465.44	592.26	610.90

La figura 5.16 muestra una relación entre los esfuerzos de cedencia obtenidos mediante los ensayos de tensión y los obtenidos por el modelo propuesto por FEM y se aprecia claramente la similitud entre ambos valores.

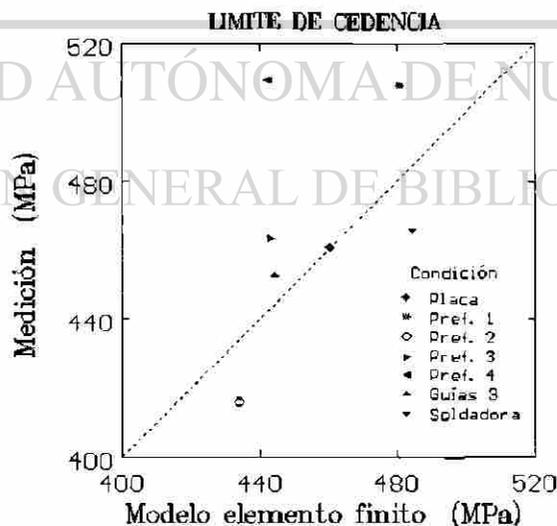


Figura 5.16. Esfuerzos de cedencia en ambas técnicas.

En la figura 5.17 se muestra la comparación entre los esfuerzos máximos por ambas técnicas y, como se aprecia, el comportamiento es muy similar al anterior.

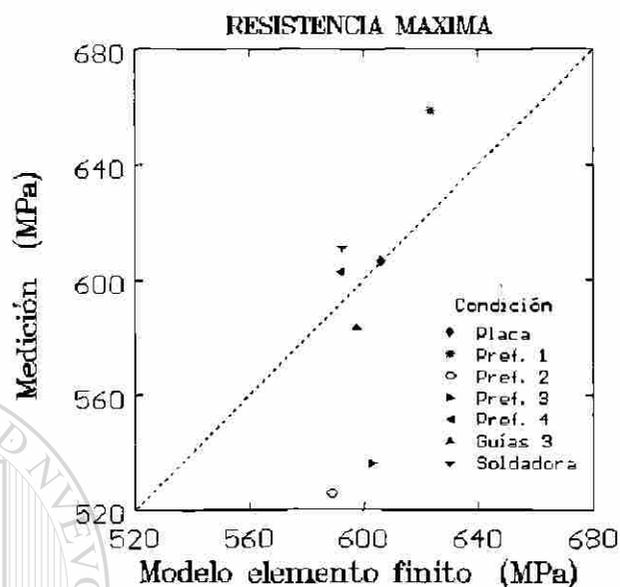
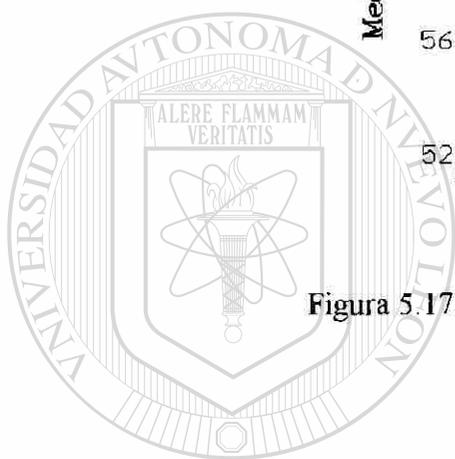


Figura 5.17. Esfuerzos máximos calculados por ambas técnicas.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Los ensayos de tensión realizados en las diferentes muestras permitieron obtener las características del material.
- La modelación realizada por el método del elemento finito permitió determinar el estado de esfuerzos y deformaciones presentes durante la fabricación de la tubería.
- Las predicciones de esfuerzos y deformaciones se comparan favorablemente con los resultados experimentales.
- La forma del proceso de conformado puede ser analizada de una forma experimental y numérica con la finalidad de optimizar el proceso.
- El método de elemento finito es una herramienta muy eficiente para el análisis de procesos de conformado.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

RECOMENDACIONES

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

- Se debe considerar la influencia de los esfuerzos de la placa hacia los rodillos formadores del molino.
- Es conveniente realizar una modelación que considere aspectos como microestructura y variación del coeficiente de fricción entre la placa y el rodillo de trabajo.
- Se debe incluir en el diseño del producto al efecto Bauschinger para predecir con mayor precisión las propiedades mecánicas finales.

REFERENCIAS

1.- B. H. Amstead, Phillip F. Ostwald, Myron L. Begeman, Manufacturing Processes, Ed. Wiley & Sons, 1984.

2.- E. Paul Degormo, J.T. Black, Ronald A Kohser, Materials and Processes in Manufacturing, Ed. Prentice-Hall, 1997.

3.-Robert K. Nichols, High Frequency Pipe and Tube Welding, Ed. Thermatool Corp., 1994.

4.- Koe Nakajima, Wataru Mizutani, Toshio Kikuma and Hiromi Matumoto, The Bauschinger Effect in Pipe Forming, Seitetsu Kenkyu No. 277, 1973.

5.- George E. Dieter, Mechanical Matallurgy, Ed. McGraw-Hill, 1998.

6.- Geoffrey W. Rowe, Conformado de los Metales, Ed. Urmo, 1972.

7.- Serope Kalpakjian, Mechanical Processing of Materials, Ed. D. Van Nostrand, 1967.

8.- Jhon G. Lenard, M. Pietrzyk, Thermal Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process, Materials Research and Engineering, University of Waterloo, Springer Verlag, 1996.

9.- R. Colás, Laminación de Productos Planos, Universidad Autonoma de Nuevo León, 1995.

10.- Martha P. Guerrero, Finite Element Modelling of Hot Plane Strain Compression Testing, University of Sheffield, 1996.

11.- Philip Sargent and Hugh Shercliff of Cambridge University, Bob Wood of Manufacturing Engineering Dept., Modelling Materials Processing, 1993.

12.- O. C. Zienkiewicz, The Finite Element Method, McGraw-Hill, 1977.

13.- Shiro Kobayashi, Soo-Ik Oh, Taylan Altan, Metal Forming and The Finite Element Method, Oxford University, 1989.

14.- Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

15.- Engineering Mechanics Research Corporation, NISA II Use's Manual Numerical Integrated Elements for System Analysis, 1994.

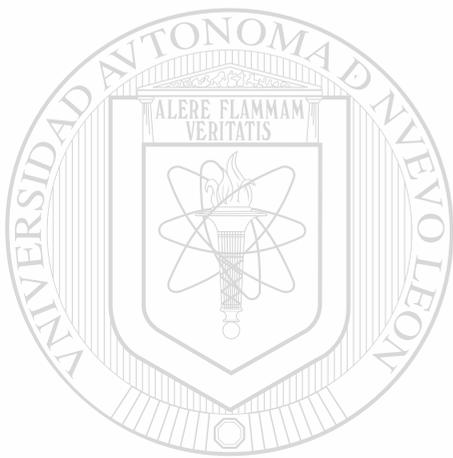
16.- Baicheng Wen and Roy J. Pick, Modelling of Skelp Edge Instabilities in the Roll Forming of ERW Pipe, Publication in Journal of Materials Technology, 1995.

17.-Robert Schilling, Sheet Bending and Determination of Residual Stresses by Means of FEM, Steel Research 64 No. 65, 1993.

18.- Manabu Kiuchi, Toshio Koudabashi and Tadayuki Sato, Automated Design System of Optimal Roll Profiles for Roll-Forming of Welded Pipe and Tube, The Third International Conference on Steel Rolling Technology of Pipe and Tube and Their Application, 1985.

19.- M. Akiyama, C. Hayashi and J. M. Alexander, An Experimental Study and Three Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analyses on Tube Rolling, The Third International Conference on Steel Rolling Technology of Pipe and Tube and Their Application, 1985.

20.- K. Mori, K. Nakadoi, Y. Mihara, T. Hirakawa, K. Osakada and M. Fukuda, Finite Element Simulation of Three Dimensional Deformation in Rolling of Seamless Pipe, The Third International Conference on Steel Rolling Technology of Pipe and Tube and Their Application, 1985.



UANL

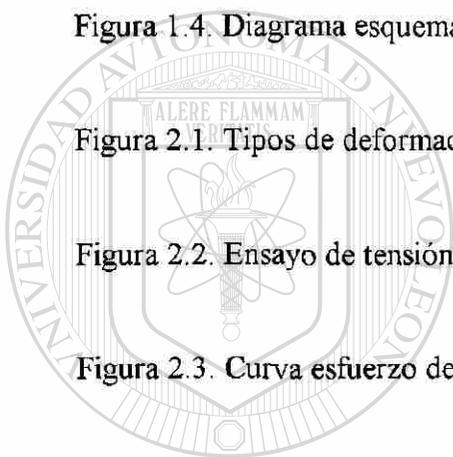
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Placa conformada en un molino de laminación.	3
Figura 1.2. Soldadura continua de tubos de acero, a tope por el proceso de alta frecuencia (ERW) resistencia.	4
Figura 1.3. Flujo de Corriente.	5
Figura 1.4. Diagrama esquemático de soldadura de arco sumergido.	8
Figura 2.1. Tipos de deformaciones que puede experimentar un cuerpo.	10
Figura 2.2. Ensayo de tensión.	12
Figura 2.3. Curva esfuerzo deformación para un material dúctil.	13
Figura 2.4. Efecto Bauschinger.	14
Figura 2.5. Curva esfuerzo-deformación, propuesta por Ludwick.	15
Figura 2.6. Formas aproximadas de la curva esfuerzo-deformación.	16
Figura 2.7. Distribución de esfuerzos en un cubo unitario.	17
Figura 2.8. Esfuerzos cortantes (a) positivos, (b) negativos.	18
Figura 2.9. Esfuerzos principales .	18



UANL

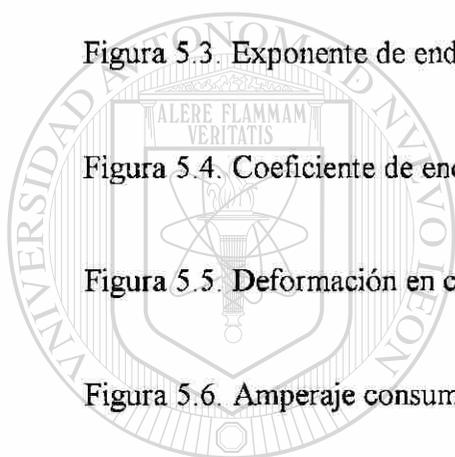
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Figura 2.10. Planos de los esfuerzos cortantes principales.	21
Figura 2.11. Desplazamiento del punto Q.	21
Figura 2.12. Deformación Unidimensional.	22
Figura 2.13. Distorsión angular de un elemento.	23
Figura 2.14. Desplazamientos producidos por deformación y rotación: (a)corte puro, (b)rotación, y (c)corte simple.	24
Figura 2.15. Forma geométrica de los criterios de fluencia.	27
Figura 3.1. Elemento unidimensional.	31
Figura 3.2. Dos elementos unidimensionales.	32
Figura 3.3. Formas de elementos mas comunes usados en FEM.	33
Figura 3.4. Descripción de movimiento.	34
Figura 4.1. Esquema de trabajo.	42
Figura 4.2. Posición de toma de muestras.	44
Figura 4.3. Dimensiones de la probeta de tensión.	46
Figura 4.4. Molino de conformado.	48
Figura 4.5. Modelo de una placa de acero.	49

Figura 4.6. Representación idealizada de la placa transversal.	50
Figura 4.7. Representación idealizada de la placa longitudinal.	51
Figura 4.8. Elevación de la placa.	52
Figura 5.1. Esfuerzo de cedencia en cada paso.	56
Figura 5.2. Cambio del esfuerzo máximo en cada paso.	57
Figura 5.3. Exponente de endurecimiento por deformación (n) en cada paso.	58
Figura 5.4. Coeficiente de endurecimiento por deformación (k) en cada paso.	58
Figura 5.5. Deformación en cada paso.	59
Figura 5.6. Amperaje consumido en los motores de cada paso.	59
Figura 5.7. Flor de deformación.	60
Figura 5.8. Deformaciones obtenidas a partir de la figura 5.7.	61
Figura 5.9. Deformación en tres dimensiones.	61
Figura 5.10. Comparación en las deformaciones.	62
Figura 5.11. Estado de esfuerzos.	63
Figura 5.12. Modelo longitudinal, solo se muestra una mitad del tubo.	64

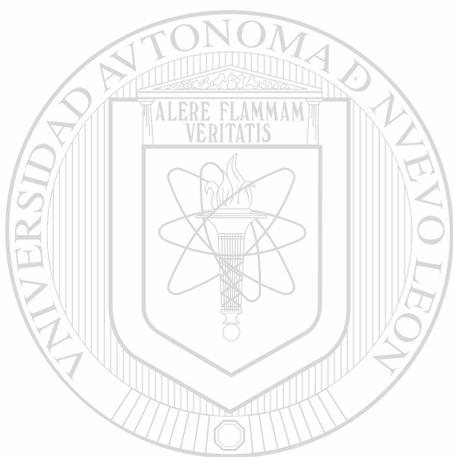


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Figura 5.13 Distribución de deformación.	65
Figura 5.13. Comparación de las deformaciones por ambas técnicas.	65
Figura 5.14. Desplazamientos de la placa.	66
Figura 5.15. Esfuerzos de cedencia en ambas técnicas.	67
Figura 5.16. Esfuerzos máximos calculados por ambas técnicas.	68



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas de las muestras	45
Tabla 4.2. Composición química de las muestras.	45
Tabla 4.3. Deformaciones y amperajes del tubo I.	45
Tabla 4.4. Deformaciones y amperajes del tubo II.	46
Tabla 4.5. Elevación de la placa.,	52
Tabla 5.1. Propiedades mecánicas de las muestras del tubo 1.	54
Tabla 5.2. Propiedades mecánicas del tubo 2.	55
Tabla 5.3. Propiedades mecánicas a partir del modelo.	62
<hr/>	
Tabla 5.4. Deformación de la placa.	66
Tabla 5.5. Desplazamientos.	66
Tabla 5.6. Propiedades mecánicas de ambas técnicas.	67

