

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



SIMULACION POR ELEMENTO FINITO DEL
COMPORTAMIENTO PLASTICO DE UN ACERO
DE BAJO CARBONO GALVANIZADO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ADRIANA SALAS ZAMARRIPA

CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE DEL 2001

43

20 FEB 20 1985

SIMULACION POR ELEMENTO FINITO DEL COMPORTAMIENTO PLASTICO DE UN ACERO DE BAJA CARBONO GALVANIZADO.

43

20 FEB 20 1985

43



1020146061



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

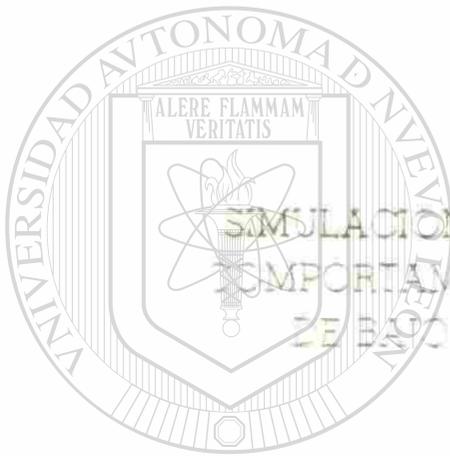


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



SIMULACION POR ELEMENTO FINITO DEL
COMPORTAMIENTO PLASTICO DE UN ACERO
DE BAJO CARBONO GALVANIZADO.

UANL

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO

EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

®

PRESENTA

ADRIANA SALAS ZAMARRIPA

LIBRERIA UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE DEL 2001

0147-30860

TH
Z5853
.M2
FINE
2001
S34



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

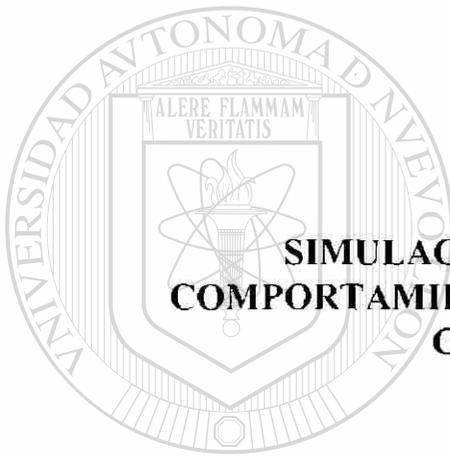
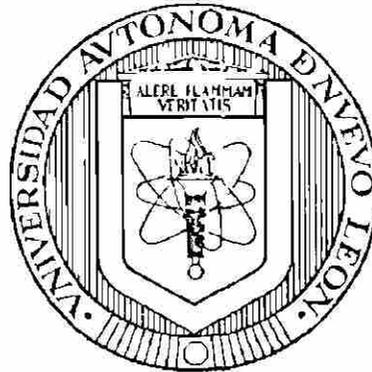


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**SIMULACION POR ELEMENTO FINITO DEL
COMPORTAMIENTO PLASTICO DE UN ACERO DE BAJO
CARBONO GALVANIZADO.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES**

PRESENTA

ADRIANA SALAS ZAMARRIPA

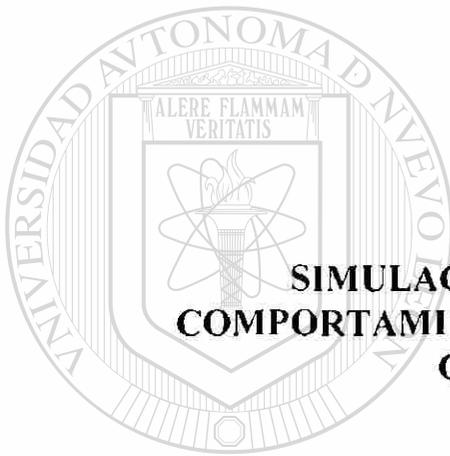
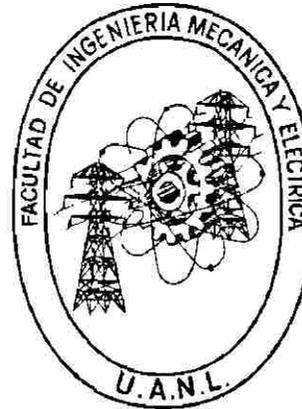
CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE DEL 2001

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**SIMULACION POR ELEMENTO FINITO DEL
COMPORTAMIENTO PLASTICO DE UN ACERO DE BAJO
CARBONO GALVANIZADO.**

TESIS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES**

PRESENTA

ADRIANA SALAS ZAMARRIPA

CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE DEL 2001

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 **“Simulación por elemento finito del comportamiento plástico de un acero de bajo carbono galvanizado”** realizada por la Ing. Adriana Salas Zamarripa, matrícula 714435 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.



Presidente

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata.



Secretario

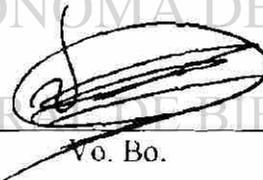


Vocal

Dr. Moisés Hinojosa Rivera.

Dr. Carlos Javier Lizcano Zulaica

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Vo. Bo.

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

San Nicolás de los Garza, N. L.

Septiembre 2001

DEDICATORIA

A Dios

Por cada una de las bendiciones que me ha dado en el transcurso de mi vida.

A mi esposo Omar García Rincón

Por ser la bendición más grande y por todo su amor.

A mis padres Ezequiel y Martha

Quienes con su educación y amor me han hecho lo que soy.

A mis hermanos Rocio Lilian, Ezequiel y Daniel Alejandro

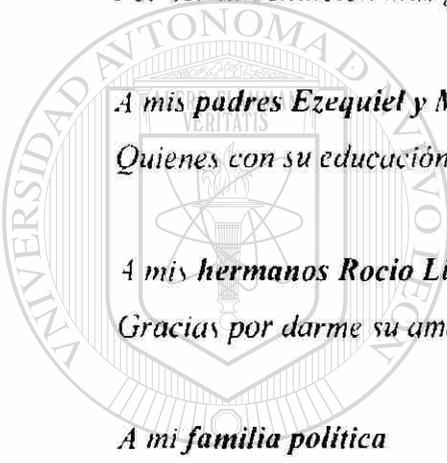
Gracias por darme su amor y estar conmigo en las buenas y en las malas.

A mi familia política

Por su apoyo y cariño.

A mi gran amigo Fernando Chapa (†)

Aunque no estés físicamente conmigo, te sigo llevando en mi corazón.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo brindado para la realización de mis estudios.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, por ser mi alma mater.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, en donde he pasado los mejores años de mi vida. Un agradecimiento especial a nuestro Director M. C. Cástulo Vela Villarreal por todo el apoyo que me ha brindado.

Al Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales por darme la oportunidad de realizar mi maestría y por todas las experiencias que me han hecho crecer como persona y profesional.

Al PAICYT y SIRREYES por el soporte financiero para este proyecto.

A la empresa GALVAK por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A la Dra. Martha Guerrero Mata por creer en mí para la elaboración de esta investigación y sobre todo por ser más que un asesor, una gran amiga.

Al Dr. Moisés Hinojosa y al Dr. Carlos Lizcano por su valiosa colaboración para este trabajo.

Al Dr. Rafael Colas por creer en mí en todo momento y por su amistad, y por supuesto a sus valiosos consejos para esta tesis.

A cada uno de los profesores que componen al PDIM, gracias por todo.

Al personal administrativo del PDIM, por el apoyo brindado.

Al Ing. Jesús Moreno y su hermosa familia, por dejarme ser parte de ustedes, por creer en mí y apoyarme en todo momento. GRACIAS.

A todos mis compañeros y amigos del PDIM, no cabe duda he hecho amistades perdurables.

A mis abuelos, tios y primos que siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas.

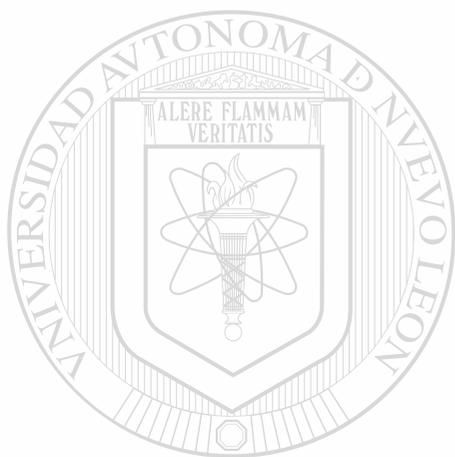
A mis amigos Jakeline, Nancy, Frank, Lupita, Roberto, Hiram, Homero, Verónica y Sergio, por siempre echarme porras.

A mis tres angelitos, Roberto, Abraham y Valeria.

A Jose y Karina por sus palabras de aliento.

A cada persona que me ha ayudado y apoyado en cada paso en mi vida, gracias.

Y recuerden, jamás renuncien a sus sueños.....



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

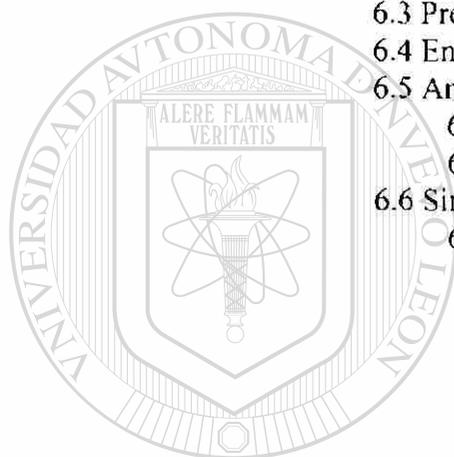


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INDICE

Dedicatoria.		I
Agradecimientos.		II
Resumen.		VI
Capítulo 1.	Introducción.	1
Capítulo 2.	Aceros de bajo carbono.	3
	2.1 Aceros al carbono	3
	2.2 Aceros de bajo carbono	6
Capítulo 3.	Galvanización por inmersión en caliente.	9
	3.1 Introducción.	9
	3.2 Proceso de galvanización por inmersión en caliente.	12
	3.4 Fundamentos de la galvanización en caliente.	21
	3.5 Propiedades mecánicas.	25
	3.6. Capacidad de formado.	26
	3.7 Capacidad de soldado.	26
	3.8 Resistencia a la corrosión.	28
Capítulo 4.	Simulación por el método del elemento finito.	30
	4.1 Metodos numericos.	30
	4.1.1 Aproximaciones y errores.	31
	4.1.2 Modelos matematicos.	32
	4.1.3 Ecuaciones diferenciales.	32
	4.2 Metodo de diferencias finitas.	35
	4.3 Metodo del elemento finito.	36
	4.3.1 Funcionamiento del método del elemento finito.	37
	4.3.2 Aproximación directa.	40
	4.3.2.1 Definir elementos y sus propiedades.	41
	4.3.2.2 Elementos simples de mecanismos estructurales.	69
	4.3.2.3 Ensamblajes de las partes.	44
	4.3.2.4 Introduccion de las condiciones frontera.	45
	4.3.3 Aproximación matematica del elemento finito.	48
	4.3.3.1 Problemas continuos y sus soluciones.	48
	4.3.3.2 La aproximacion variacional.	52
	4.3.3.3 Metodo de Ritz.	53
	4.3.3.4 Método de residuos ponderados.	54
Capítulo 5.	Deformación plastica.	55
	5.1 Introduccion.	55
	5.2 Deformacion plastica en monocristales.	56
	5.2.1 Deformacion por deslizamiento.	56
	5.2.2 Deformacion por maclaje.	59
	5.3 Deformación plastica en materiales policristalinos.	62

	5.4 Frontera de grano y deformación.	65
	5.5 Endurecimiento por deformación..	68
	5.6 Estimación de la deformación equivalente en granos.	68
	5.7 Plasticidad.	69
	5.7.1 Esfuerzo, deformación y velocidad de deformación.	69
	5.7.2 Criterio de cedencia.	72
	5.7.3 Relaciones plásticas de esfuerzo-deformación.	74
	5.7.4 Viscoplasticidad.	76
	5.8 Simulación por elemento finito del comportamiento plástico.	78
Capítulo 6.	Desarrollo experimental.	80
	6.1 Introducción.	80
	6.2 Selección del material.	80
	6.3 Preparación de muestras.	81
	6.4 Ensayo de tensión.	82
	6.5 Análisis de imagen.	84
	6.5.1 Medicion de mallado.	84
	6.5.2 Medición de tamaño de grano.	90
	6.6 Simulación por elemento finito.	92
	6.6.1 Conceptos básicos de ABAQUS/CAE ^{MR} .	92
	6.6.1.1 Módulo Parte (Part).	94
	6.6.1.2 Módulo Propiedades (Property).	97
	6.6.1.3 Módulo Ensamble (Assembly).	97
	6.6.1.4 Módulo Paso (Step).	97
	6.6.1.5 Módulo Interacción (Interaction).	98
	6.6.1.6 Módulo Carga (Load).	98
	6.6.1.7 Módulo Malla (Mesh).	99
	6.6.1.8 Módulo Trabajo (Job).	100
	6.6.1.9 Módulo Visualización (Visualization).	100
	6.6.1.10 Módulo Bosquejo (Sketch).	100
Capítulo 7.	Resultados y Discusión.	101
	7.1 Introducción	101
	7.2 Caracterización del material.	101
	7.3 Propiedades mecánicas.	103
	7.4 Estimación de la deformación.	105
	7.5 Simulación por elemento finito mediante ABAQUS CAE ^{MR}	111
	7.5.1 Modelo MALLA.	112
	7.5.2 Modelo GRANOS.	119
Capítulo 8.	Conclusiones y recomendaciones.	125
	Lista de figuras.	127
	Lista de tablas.	130
	Referencias	
ANEXO 1.	Ensayos de tensión.	
ANEXO 2.	Muestras de ensayo de tensión.	
	Resumen autobiográfico.	



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



RESUMEN

Algunos materiales pueden ser deformados plásticamente en gran extensión sin sufrir fractura, esta es una de las propiedades más útiles para la ingeniería. El uso del método de elemento finito (FEM) para el estudio del comportamiento plástico de metales ha sido una práctica común en los últimos años, debido a que ha probado ser un excelente medio de evaluar parámetros de proceso, eliminando la técnica tradicional de prueba y error. Para este trabajo se empleó un paquete comercial (ABAQUS CAE^{MR}), para crear un modelo bidimensional que simule las pruebas de tensión uniaxial de un acero de bajo carbono galvanizado. El objetivo de este trabajo fue evaluar por la mencionada técnica el comportamiento plástico de un acero de bajo carbono galvanizado, en los campos de deformación y esfuerzo. Se realizaron dos modelos, uno de acuerdo a una malla de 2 mm x 2 mm, la cual fue dibujada en una de las caras de las muestras, y el otro de acuerdo a la forma, tamaño y distribución de los granos del recubrimiento de zinc. Las probetas fueron deformadas a temperatura ambiente y a velocidad de cabezal constante, deteniendo la deformación a diferentes tiempos. Mediante el análisis de imágenes se registraron las mediciones de deformación antes y después de cada paro de tiempo, para así compararlos con la simulación computacional, además de validar el modelo numérico. En el campo de deformación, el modelo que sigue el tamaño y forma de los granos fue el que presentó una mejor aproximación de acuerdo a los datos experimentales. El esfuerzo, de acuerdo a las probetas ensayadas hasta la ruptura presenta una buena aproximación, en cuanto a las pruebas interrumpidas existen diferencias significativas. Los resultados de este estudio pueden extenderse a otras condiciones de prueba, además el modelo puede ser utilizado para obtener las ecuaciones constitutivas del material.

CAPITULO 1

INTRODUCCION.

La capacidad de algunos materiales a ser deformados plásticamente en gran extensión sin sufrir fractura, es una de las propiedades más útiles para la ingeniería [1]. La respuesta plástica de materiales cristalinos es anisotrópica y heterogénea, produciendo texturas de deformación y microestructuras intergranulares, pudiendo ser la causa de localización o pérdida de ductilidad. Por lo que es importante para un mejor entendimiento de cómo un esfuerzo o deformación aplicado macroscópicamente es acomodado en el nivel local de un grano interactuando con sus vecinos inmediatos [2].

Durante los últimos años se ha buscado predecir el comportamiento plástico en materiales policristalinos, en donde la técnica de simulación por elemento finito ha demostrado grandes ventajas para este tipo de aproximaciones [2].

El objetivo de este trabajo es evaluar la técnica de simulación por elemento finito como herramienta en el conocimiento del comportamiento plástico de un acero de bajo carbono galvanizado en los campos de esfuerzo y deformación.

A partir de la hipótesis de que el comportamiento plástico (deformación-esfuerzo) puede ser expresado por ecuaciones diferenciales, las cuales a su vez se pueden someter a un análisis por el método de elemento finito mediante paquetes comerciales, como ABAQUS, se espera obtener una aproximación del comportamiento real registrado en un ensayo de tensión uniaxial con interrupciones a intervalos de tiempo dados y así compararlo con el calculado por ABAQUS.

Las metas a cumplir son: (a) Evaluar la utilidad de la técnica de elemento finito en la simulación del comportamiento plástico de un policristal y (b) realizar la simulación por elemento finito del esfuerzo y deformación en un material policristalino no experimental.

Para llegar al objetivo se siguió la siguiente metodología. Primeramente, se seleccionó el material a estudiar, se eligió un acero de bajo carbono galvanizado por inmersión en caliente, ya que éste cumplía con los requerimientos deseados: visibilidad de los granos en la superficie (recubrimiento de zinc de flor gruesa), espesor no mayor a los 3 mm para asegurar una relación de menor o igual a un 10 % con respecto al ancho y al largo de la probeta, para así poder crear un modelo en 2 dimensiones y por último ser un material comercial. Posteriormente, se realizó una preparación de muestras para el ensayo de tensión uniaxial, las probetas fueron manufacturadas de acuerdo a la norma ASME-E-8, dentro del área entre marcas se dibujó una milimalla cuadrada de $2 \times 2 \text{ mm}^2$, realizada con un navaja tipo bisturí, en un solo lado del espécimen, esto con el fin de poder tener un registro detallado de la deformación en cada nodo.

Los ensayos de tensión fueron realizados en una máquina universal SINTECH 30 D a una velocidad de cabezal constante de 3 mm min.

Mediante el análisis de imagen se hicieron las mediciones, tanto de los desplazamientos de los nodos, como de la deformación equivalente registrada para 15 granos seleccionados de la probeta. Todas las mediciones se realizaron antes y después de cada ensayo.

Una vez obtenidas las deformaciones, tanto de la malla como la deformación equivalente de los granos y los esfuerzos, se procedió a realizar dos modelos. Uno de la malla de $2 \times 2 \text{ mm}^2$ y otro respetando los límites de los granos, para posteriormente efectuar un análisis estático en ABAQUS, y validar el modelo comparando los datos obtenidos experimentalmente y los generados por ABAQUS.

CAPITULO 2

ACEROS DE BAJO CARBONO.

2.1 Acero al carbono.

El Instituto del hierro y el acero considera que un acero es al carbono, cuando: (a) el contenido mínimo de cromo, cobalto, niobio, molibdeno, níquel, titanio, tungsteno, vanadio o zirconio, ó cualquier otro elemento no es requerido para ser añadido con la finalidad de obtener un efecto aleante deseado; (b) el mínimo especificado de cobre no excede el 0.40%; o (c) el máximo contenido para cualquiera de los siguientes elementos no exceden los porcentajes citados: manganeso 1.65, silicio 0.60, cobre 0.60 [3].

Las variaciones del contenido de carbono afectan grandemente las propiedades mecánicas, un incremento en el carbono produce un aumento en la dureza y la resistencia. Los aceros al carbono son generalmente clasificados de acuerdo a su contenido de carbono. Generalmente, los aceros al carbono contienen hasta 2% total de elementos aleantes y pueden ser subdivididos en aceros de bajo carbono, aceros de medio carbono, aceros de alto carbono y aceros de ultra alto carbono [3], siendo el de nuestro interés el acero de bajo carbono ya que es el empleado en este trabajo.

Como grupo, los aceros al carbono son los más frecuentemente utilizados. La Tabla 2.1 indica que más del 85% del acero producido y enviado en los Estados Unidos es el acero al carbono [3].

Aunque existen una gran variedad de composiciones de aceros al carbono y aleados para uso ingenieril, todos presentan variaciones en cuanto a propiedades

mecánicas. Los diferentes contenidos de carbono, aleantes, así como del tratamiento térmico o termomecánico a los cuales se han sometido previamente repercuten directamente en la microestructura del acero [4].

Tabla 2.1 Producción de acero por grado [3].

Producción Total							
Año	Total de todos los grados (toneladas netas $\times 10^3$)				Total de todos los grados, %		
	Acero al Carbono	Aceros Aleados	Aceros Inoxidables	Total	Acero al Carbono	Aceros Aleados	Aceros Inoxidables
1988	86,823	10,902	2,199	99,924	86.9	10.9	2.2
1987	77,976	9,147	2,028	89,151	87.5	10.2	2.3
1986	71,413	8,505	1,689	81,606	87.5	10.4	2.1
1985	76,699	9,877	1,683	88,259	86.9	10.2	1.9
1984	79,918	10,838	1,772	92,528	86.4	11.7	1.9

El contenido de carbono y la microestructura son los que tienen efectos predominantes en la capacidad de deformación, tenacidad, capacidad de soldado, maquinado y resistencia mecánica, entre otras propiedades. En la Figura 2.1 se puede apreciar que entre menor sea el contenido de carbono en el acero, mayor elongación tendrá, por lo tanto el acero alcanzará mayor ductilidad, es decir mayor capacidad de deformación [4].

Las aplicaciones de los aceros al carbono se muestran en la Tabla 2.2, siendo importante destacar que su aplicación va de la mano con el contenido de carbono en el acero.

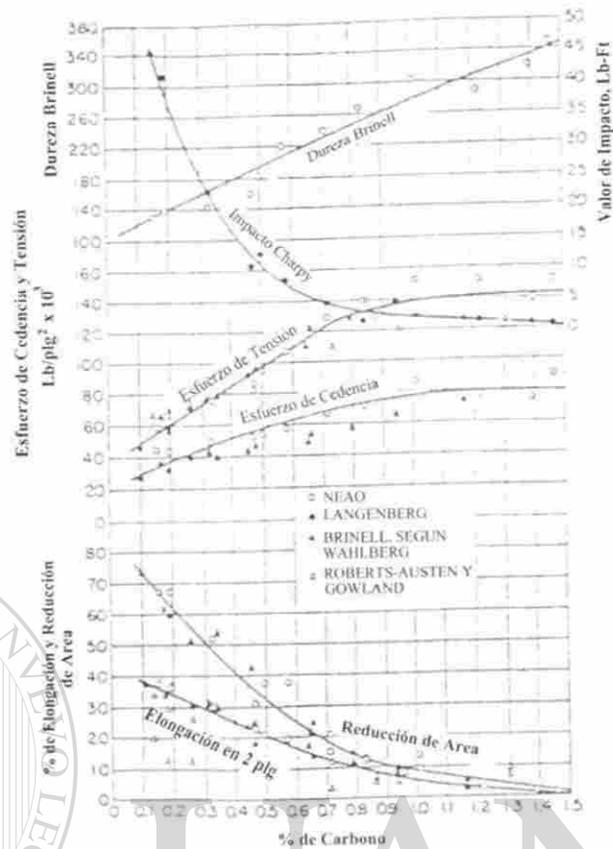


Figura 2.1 Variación de propiedades mecánicas en función del % de carbono [4].

Tabla 2.2 Aplicaciones de los aceros al carbono de acuerdo a su % de carbono [4].

<i>% de Carbono</i>	<i>Aplicaciones</i>
0.05-0.10	Lámina, tiras, tubos, clavos, alambre.
0.10-0.20	Remaches, tornillos, partes para tratamiento superficial.
0.20-0.35	Acero estructural, placa, barra, piezas forjadas.
0.35-0.45	Aceros para partes de maquinaria (árboles, ejes, vástagos, etc.).
0.45-0.55	Piezas grandes de forja (cigüeñales, engranes para trabajo pesado).
0.60-0.70	Matrices para forjado y estampado.
0.70-0.80	Cuchillas para tijeras o cizallas, cortadores, cinceles, martillos.
0.80-0.90	Matrices y punzones de corte para bases de troquelado.
0.90-1.00	Resortes, escariadores, brochadoras y dados.
1.00-1.10	Resortes pequeños, herramientas para torno, cepillos, limas.
1.10-1.20	Machuelos para roscar, tarrajas, cuchillería, herramientas de corte.
1.20-1.30	Limas, asientos o cajas para baleros, mandriles, hojas para afeitar.

2.2 Aceros de bajo carbono.

El acero de bajo contenido de carbono ha conseguido tomar mayor importancia dentro de la industria en cuanto consumo y producción se refiere. Estos aceros se producen en lamina o tira, el bajo contenido de carbono le da propiedades de alta capacidad de formado en frío, lo que hace posible que se utilice, dentro de la industria donde se llevan a cabo procesos de embutido, troquelado, doblado o cizallado [3].

Los aceros de bajo carbono contienen hasta 0.30% de carbono. La más grande categoría de esta clase de acero es productos laminados planos (lámina o cinta) usualmente en la condición de laminado en frío y recocido. El contenido de estos aceros de alta capacidad de formado es muy bajo, menor que 0.10% C, con hasta 0.4% Mn. Los usos típicos son en paneles para la carrocería del automóvil, hojalata y alambre.

Para placas y secciones estructurales de aceros laminados, el contenido de carbono puede ser incrementado aproximadamente a 0.30%, con alto manganeso hasta 1.5%. Estos materiales pueden ser empleados para troquelados, forjas, tubos sin costura, etc [3].

Los aceros de bajo carbono se pueden utilizar si la resistencia y otros requerimientos mecánicos no son demasiados severos. Estos aceros tienen un costo relativamente bajo, pero tienen algunas limitaciones [1].

- Estos aceros no pueden ser reforzados más allá de 690 MPa sin que se produzca una sustancial pérdida de ductilidad y resistencia al impacto.
- Cuando se fabrican productos de gran sección y poco espesor, con este tipo de aceros, no se puede asegurar que la estructura martensítica alcance a todas partes. Es decir, no son completamente templables.
- Tienen poca resistencia a la corrosión y oxidación.
- Tienen poca resistencia a la impacto a bajas temperaturas.

Los aceros de bajo carbono son utilizados principalmente en aplicaciones estructurales. Aceros con contenido menor al 0.15 %C en peso puede endurecerse de 30 a 40 HRC. Los aceros al carbono planos con contenido menor que el 0.30 %C en peso y 0.05 %S en peso pueden ser soldados rápidamente por la mayoría de los métodos con una pequeña necesidad de medidas especiales para prevenir agrietamiento de la soldadura. La soldadura de secciones de más de 25 mm (1 plg) de espesor, particularmente si el contenido de carbono del metal base excede el 0.22% en peso, puede requerir que el acero sea precalentado a aproximadamente 40 °C (100 °F) y el relevado de esfuerzos en aproximadamente 525 a 675 °C (1000 a 1250 °F) [3].

En general los aceros al carbono tienen casi siempre mejor capacidad de maquinado que los aceros aleados con comparable contenido de carbono y dureza. Cuando estos aceros son sometidos a un endurecimiento y revenido para incrementar los niveles de dureza hasta 300 HB, presentan una excepción a esta observación, ya que los aceros aleados presentan una mejor capacidad de maquinado bajo estas condiciones, lo cual se debe en primer lugar a la alta temperatura de revenido que se necesita para revenir un acero aleado para un específico nivel de dureza y segundo, a la falta de uniformidad de la microestructura debido al límite de la capacidad de endurecimiento del los aceros al carbono.

El contenido de carbono tiene un efecto dominante en la capacidad de maquinado de aceros al carbono, principalmente porque éste gobierna la resistencia, la dureza y la ductilidad. Incrementando el contenido de carbono aumenta su resistencia y la unidad de consumo de energía para cortarlo. Los datos de la Figura 2.2 muestran los efectos del incremento en el contenido de carbono y el contenido de manganeso en la unidad de consumo de energía [3].

Los aceros de bajo carbono contienen menos del 0.15 %C y por lo tanto su resistencia en su condición de recocido es baja; estos se maquinan pobremente debido a que son suaves y gomosos y se adhieren a las herramientas de corte. La capacidad de

maquinado de estos grados puede ser mejorada por el endurecimiento por trabajo para aumentar el nivel de esfuerzo y disminuir su ductilidad.

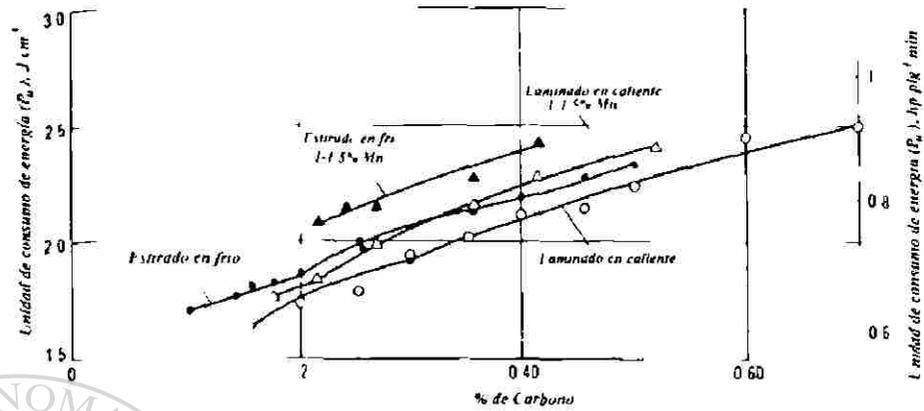
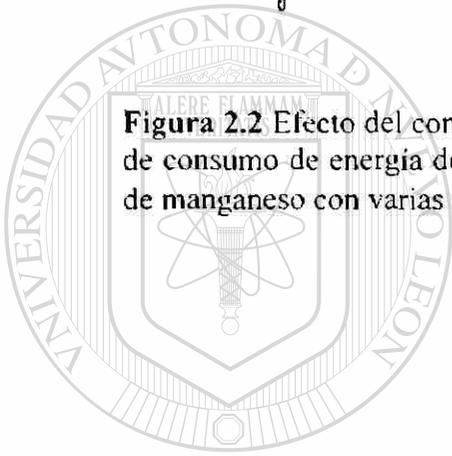


Figura 2.2 Efecto del contenido de carbono en la unidad de consumo de energía. Unidad de consumo de energía de aceros laminados en caliente y estirados en frío a dos niveles de manganeso con varias cantidades de carbono [3].



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 3

GALVANIZACION POR INMERSION EN CALIENTE.

3.1 Introducción.

Aunque existen varios metales utilizados para recubrir metales por inmersión en caliente, estos se ven limitados por su bajo punto de fusión, siendo los más manejados el Zn, Al, Pb y Sn [5]. El recubrimiento con Zn es uno de los más ampliamente utilizados y posee una buena relación costo–efectividad en la protección de aceros contra la corrosión atmosférica. El Zn por sí mismo tiene una buena resistencia a la corrosión debido a la formación de una película protectora de óxidos y carbonatos en la superficie, este recubrimiento protege al acero de dos maneras [6]:

- Por la formación de una barrera física entre el substrato del acero y el medio ambiente.
- Por proporcionar una protección galvánica o de sacrificio, por el hecho de que el Zn es más electronegativo que el Fe en la serie electroquímica. Este efecto es ilustrado esquemáticamente en la Figura 3.1.

Los recubrimientos de Zn se aplican mediante dos procesos: *galvanización por inmersión en caliente* y *electro galvanizado*, siendo el galvanizado por inmersión en caliente el proceso de interés en esta investigación.

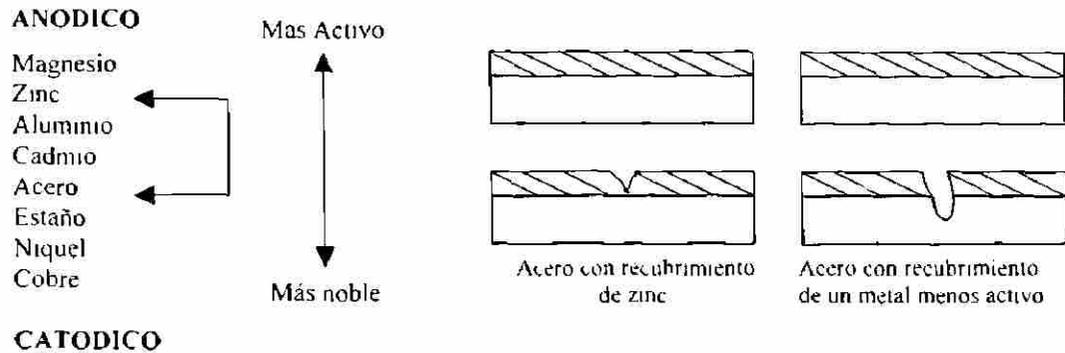


Figura 3.1 Protección galvánica del acero por Zn [6].

La inmersión en caliente es uno de los métodos de protección más antiguos que todavía se utilizan. Consiste en recubrir un metal con otro, sumergiendo el metal base en un baño de otro metal fundido. Este recubrimiento está formado por la capa o capas interiores de aleación y una exterior de metal puro. La capa de aleación se forma mediante difusión dando lugar a diferentes compuestos de metal fundido metal base, constituyendo normalmente una capa de aleación múltiple. La capa externa de metal puro se forma al adherirse el metal fundido a la pieza cuando es extraída del baño [5].

Los recubrimientos obtenidos por inmersión en caliente alcanzan espesores de entre 0.01 a 0.1 mm. El tamaño del espesor depende de varios factores, tales como temperatura del material fundido, composición del material base y del metal fundido, tiempo de contacto substrato - metal fundido, velocidad de inmersión y extracción de la pieza en el baño y velocidad de enfriamiento [5].

La temperatura del baño de Zn oscila entre 445 °C y 465 °C. El tiempo de inmersión varía de unos segundos a minutos hasta que la pieza alcance la temperatura del baño. El proceso se puede realizar de forma continua o discontinua [5].

Las razones por las cuales el acero galvanizado se ha utilizado y se sigue empleando son las siguientes [5]:

- El proceso no es complicado y se controla con exactitud.
- Los defectos se manifiestan con claridad.
- Debido a que es una inmersión total, la pieza en su totalidad obtiene un recubrimiento perfecto y uniforme.
- Sobre el Zn se forma una patina (recubrimiento) de carbonato pasivándose.
- Aunque desaparezcan la patina de carbonato y el Zn metálico, quedan los recubrimientos de aleaciones Fe Zn aun más resistentes que el Zn puro.
- Protección catódica del Zn.

Estas seis razones junto al alto costo de mantenimiento y el aumento de la agresividad atmosférica hacen que la galvanización por inmersión en caliente sea muy empleada.

De acuerdo a la empresa Thyssen Stahl AG que produce 10 millones de toneladas de acero por año, además de ser una de las mayores productoras de acero en Europa, la industria automotriz es el más importante grupo de consumidores. De la producción de lámina por Thyssen, 60% (6 millones de toneladas) se destina para el mercado automotriz mundial, y una porción creciente es de productos tratados superficialmente como se muestra en la Figura 3.2, la galvanización por inmersión en caliente ocupa un 18% de esta producción [7].

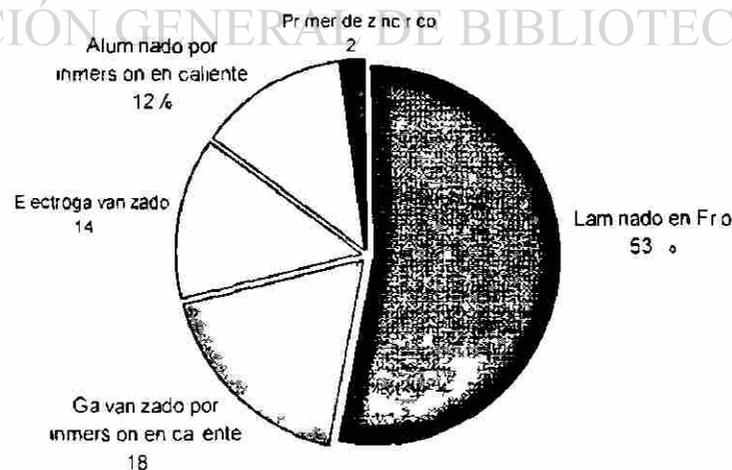


Figura 3.2. Thyssen derivados de lamina de acero 1989 [7].

3.2 Proceso de la galvanización por inmersión en caliente.

Las estaciones de una línea moderna de galvanización por inmersión en caliente se muestran esquemáticamente en la Figura 3.3. Esta se puede dividir en 4 secciones principales: limpieza o preparación superficial, tratamiento térmico, baño de Zn y laminado templado de la lamina, además de que en algunas líneas se cuenta con otra sección de un tratamiento térmico posterior a la zona del baño del Zn denominado Galvanneal. A continuación se definirán estas secciones.

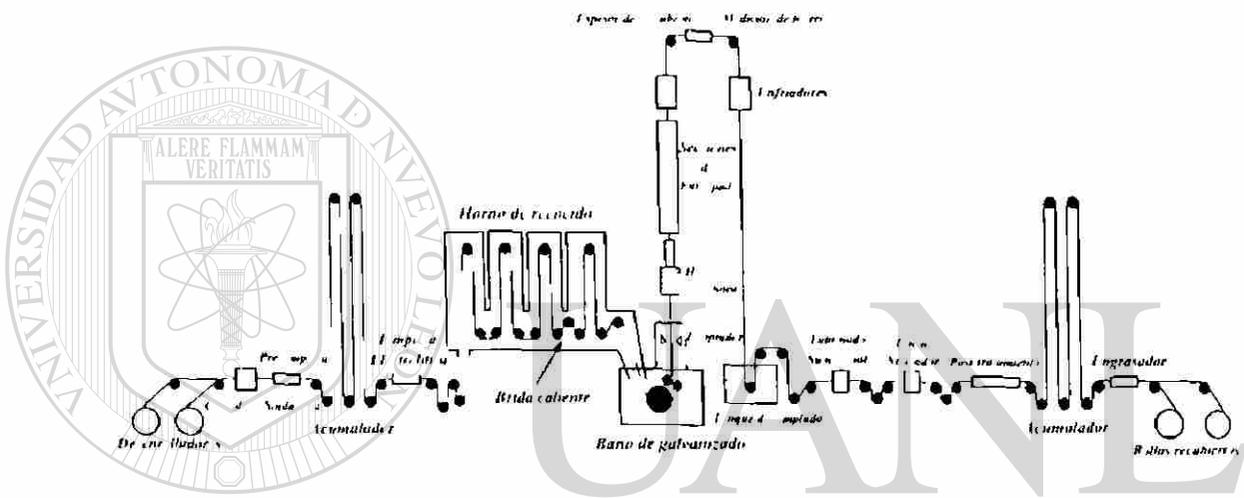


Figura 3.3 Diagrama esquemático de una línea típica de galvanizado por inmersión en caliente [8].

Sección 1: Preparación superficial de la lámina.

Una de las variables que determinan la calidad, estructura y espesor del recubrimiento es el estado inicial superficial de la lámina. Para una correcta galvanización se debe tener una superficie de acero metalúrgicamente limpia, Para ello, se han de eliminar las sustancias contaminantes más comunes: grasas, aceites, jabones, polvo, pintura, residuos de soldadura, óxidos, etc. Por esto se tiene una etapa previa a la galvanización de preparación superficial que consta de dos pasos [5]:

- *Desengrase*: Mediante el desengrase se eliminan impurezas de tipo orgánico. Los métodos más usuales son por pirogenación obteniendo una combustión de los residuos orgánicos, con disolventes orgánicos aprovechando la solubilidad de

algunos productos grasos en disolventes, con medios alcalinos utilizando baños alcalinos para el desengrase por saponificación.

- *Decapado*: Las impurezas inorgánicas se eliminan con el decapado. Se utiliza un decapado mecánico (no hay necesidad de un desengrase previo), químico (mediante la utilización de un medio ácido) y electroquímico (mediante la aplicación de corriente en un medio ácido).

Los desarrollos en la limpieza de la lámina de acero, requiere de sistemas de limpieza que puedan trasladar la lámina sucia a velocidades tan altas como 3 m/s, en líneas modernas de inmersión en caliente [8].

Sección 2: Recocido de la lámina.

La sección de recocido de una línea de inmersión en caliente es similar a una línea moderna de recocido continuo. Este proceso es llevado a cabo en una atmósfera protectora (el proceso de galvanizado en la empresa GALVAK se lleva a cabo por medio de Hidrogeno y Nitrógeno) [8]. Primero, la lámina es rápidamente calentada a una temperatura cercana a los 680 °C para quemar residuos de aceite y después el material entra a la sección de recocido del horno. En esta sección la lámina alcanza una temperatura de hasta 730 °C y la lámina sufre recristalización. Bajo atmósfera protectora, la lámina es enfriada rápidamente por medio de un flujo de gas, antes de entrar al baño de Zn el cual es mantenido a una temperatura de 465 °C [6].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Existen diferentes tipos de hornos para el recocido que pueden ser utilizados en una línea, los cuales incluyen los de fuego directo, tubos radiantes, verticales u horizontales. Los problemas técnicos que ocurren durante el recocido son similares en todos los tipos de horno. La lámina está usualmente pocos minutos durante el proceso continuo y tiene que estar completamente tratada en este periodo. Los factores claves del proceso son la temperatura, el tiempo (el cual es definido por la velocidad de la línea) y la tensión de la lámina en el horno [8].

La tensión en la lamina es mantenida entre los diferentes rollos en el horno, para prever movimientos continuos de esta a través de la línea, y guardar la lámina en el centro de los rodillos. Como la lamina se suaviza durante la recristalización, la tensión en ésta necesita ser ajustada para prevenir un flujo plástico significativo. Si el acero comienza a fluir plásticamente, esto podría resultar en un cambio en la forma de la lámina, lo cual conduciría a una lamina no plana o con variaciones en secciones transversales. En el peor de los casos, esta podría fallar catastróficamente en el horno y subsecuentemente causar pérdidas significativas en producción [8].

Sección 3: Recubrimiento de Zinc.

La sección del recubrimiento de la línea de inmersión en caliente es el corazón de la operación. Esta sección consiste de la olla de recubrimiento, la cual contiene el baño fundido de galvanizado, un sistema de boquillas de limpieza que controlan el espesor del recubrimiento.

A continuación se describirán cada unas de las partes que componen esta sección:

- ***Olla de recubrimiento*** Las ollas de recubrimiento más modernas son fabricadas con recubrimiento cerámico y calentadores por inducción para conservar el Zn fundido. Los canales en los calentadores por inducción, a través de los cuales se funde el metal circulante, experimentan desgaste en el refractario debido a que el metal fluye a gran velocidad. Las capas del refractario de los canales han progresado de refractarios base silica o alumina apisonados a materiales vaciados depositados térmicamente.

Los materiales vaciados depositados térmicamente de baja humedad también han comenzado a desarrollarse para garantizar una larga vida operacional para los inductores. Además, este tipo de refractarios se han probado también en la garganta de inductor y las principales áreas de la olla en un intento por reducir costos mientras se mantiene la misma vida del refractario. Los controladores para el suministro de potencia de la olla son normalmente dispositivos de estado sólido, y han sido

diseñados para facilitar la operación de la olla desde una terminal de computadora única para proveer un registro cronológico del desempeño y posibles problemas.

- *Baño de galvanizado* El baño de galvanizado es usualmente Zn con contenidos de 0.12 a 0.20% en peso de Al. El contenido de Al en el baño de Zn es muy crítico para el producto fabricado (galvanizado ó galvanneal). Como la lámina de acero entra en la fundición, esta reacciona con el Al para formar una capa de aluminato de Fe (FeAl_3 ó Fe_2Al_5), que inhibe la formación de compuestos intermetálicos de Fe-Zn en la lámina durante el galvanizado, lo cual es indeseable porque estos compuestos debilitan la adhesión del recubrimiento.

Sin embargo, durante la producción de la lamina con galvanneal se requiere que la capa formada sea suave para facilitar el desglose de la lámina después del recubrimiento, para posteriormente pasar por el horno de galvanneal a temperatura de 486 a 535 °C. Por consiguiente, los niveles de Al tienen que ser controlados alrededor del 0.13% en peso, durante la producción de lámina galvanneal.

La variación en el contenido de Al en el baño, asimismo de Pb produce la formación excesiva de escoria en la fusión, la cual causa pérdidas significativas de Zn y deterioro en la calidad superficial del producto.

Para producir recubrimientos de Zn uniformes, es necesario el control automático del proceso. Para este propósito, se llevan a cabo las siguientes medidas en la línea de galvanizado por inmersión en caliente usando el procedimiento de Rayos X fluorescentes [7]:

1. Continuamente sobre el baño del Zn en el centro de la lámina por el control directo de las cuchillas de aire.
2. Transversalmente sobre el ancho de la lámina en la salida de la línea.

Como resultado de estas medidas, la alta uniformidad del recubrimiento de Zn es alcanzada sobre el ancho de la lámina.

El crecimiento no restringido de los cristales de Zn durante la solidificación puede ser suprimido por varios métodos para reunir los requerimientos de partes visibles. Uno de los más efectivos es el uso del baño de Zn libre de Pb. Además, el uso de este con altos contenidos de Al en el Zn tiene una importante contribución en las propiedades del producto. La calidad superficial es mejorada porque la escoria no se levanta del fondo y la formación de aleación en el recubrimiento de Zn es eliminada. La Figura 3.4 muestra la comparación entre un galvanizado por inmersión del tipo clásico (flor gruesa) y otro libre de plomo y con alto contenido de Al en el baño.

- Control del espesor del recubrimiento.** La lámina de acero entra al baño de Zn fundido de la salida del horno de recocido y pasa alrededor de un rodillo sumergido en el baño que permite a la lámina esté en el baño durante pocos segundos. Los rodillos de estabilización y corrección en el baño a menudo se utilizan para nivelar la lámina para pasar por los limpiadores. La Figura 3.5 muestra un dibujo esquemático de un posible juego de rodillos en el baño de Zn.

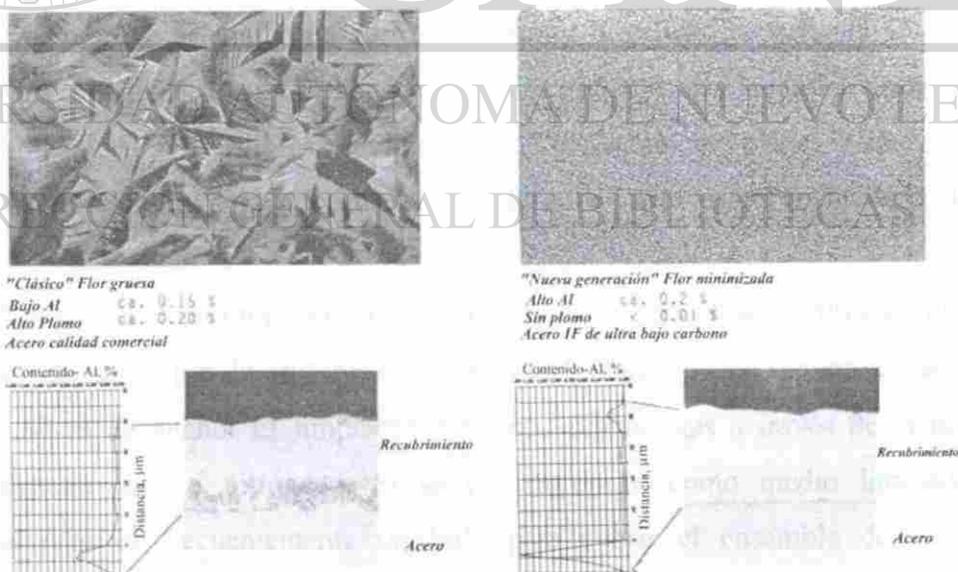


Figura 3.4 Comparación entre un galvanizado por inmersión en caliente clásico y otro con alto Al y libre de Pb [7].

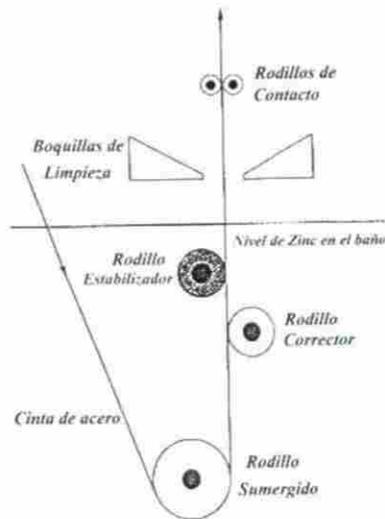


Figura 3.5 El arreglo de los rodillos en el baño de galvanizado para la nivelación y control de espesor de recubrimiento en la lámina [8].

Estos rodillos, además de rodamientos y otros equipos inmersos en la olla, experimentan un medio ambiente agresivo y tienen por lo tanto que estar diseñadas para una operación uniforme y una larga vida con la finalidad de reducir tiempos muertos por el cambio de cualquiera de los ensambles. Las superficies de los rodillos deben ser libres de defectos o de áreas de ataque ya que podrían causar una impresión sobre la lámina de acero y deteriorar la calidad superficial. Cuando son propiamente diseñados y operados, los rodillos aseguran que la lámina pasará por las boquillas de limpieza libres de vibraciones y perfectamente plana, lo que permitirá una buena limpieza del recubrimiento y uniformidad a través del ancho de la lámina.

Las boquillas de limpieza son diseñadas para proveer un recubrimiento uniforme (alrededor de 10 μm de espesor) sobre la lámina, la cual puede ser aproximadamente de 1.80 m de ancho. El limpiador mediano, expulsa gas a través de la boquilla, usualmente aire o nitrógeno. Si se usa nitrógeno como medio limpiador, un envolvente es frecuentemente utilizado para cubrir el ensamble del limpiador completo, y así la lámina se encontrará en una atmósfera libre de oxígeno hasta que el proceso de limpieza se complete. El medio limpiador, la presión y temperatura del medio limpiador en las boquillas, la distancia de la boquilla hacia la superficie de la

lámina y la altura de las boquillas sobre el baño de Zn son algunas variables que pueden afectar el espesor y la uniformidad del recubrimiento.

El espesor determina la vida del recubrimiento y las condiciones de servicio en que estará la pieza es el factor que determine el espesor [5].

Sección 4: Galvanneal

El galvanneal se logra mediante el calentamiento de la lámina galvanizada en un horno galvanneal encendido por gas o inducción (véase Figura 3.6). El objetivo es calentar la lámina de acero galvanizada en un intervalo de 480 a 535 °C y mantenerla a esta temperatura en una sección de espera, donde pueda ocurrir la interdifusión del Fe y el Zn, dando lugar a un recubrimiento consistente de una serie de compuestos intermetálicos de Fe-Zn. Este recubrimiento tiene ciertas ventajas en comparación al recubrimiento de Zn puro en aplicaciones automotrices, pero debido a su naturaleza extremadamente frágil causa un significativo desprendimiento de polvos en las aplicaciones automotrices de formado. Los recubrimientos galvanneal tiene una apariencia gris mate de baja reflectividad y tienen las siguientes características:

- Similar resistencia a la corrosión en comparación a recubrimientos de Zn.
- Buena adherencia de pintura.
- Mejor soldabilidad.

La temperatura y tiempo del galvanneal tienen que ser cuidadosamente controladas para impedir la formación de aleaciones por encima del recubrimiento. La Figura 3.7 muestra el contenido de Fe en el recubrimiento (por interdifusión) como una función del tiempo y temperatura que se lleva a cabo el galvanneal para un contenido específico de Al en el baño de Zn.

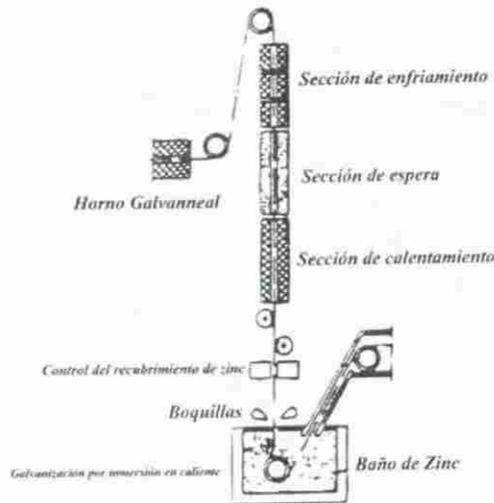


Figura 3.6 Sección de galvanneal en una línea de galvanizado por inmersión en caliente [7].

La interdifusión de Fe y Zn durante el galvanneal da lugar a una serie de intermetálicos Fe-Zn (llamados Γ , Γ_1 , δ y ζ) en el recubrimiento. Este recubrimiento comprende principalmente a la fase δ (7 a 12 % Fe), como es confirmado por investigaciones de Rayos X. Los cristales δ son más finos que los cristales de Zn y están distribuidos muy uniformemente por encima de la superficie [7].

Una distribución más desigual ocurre en aceros con libres cantidades de nitrógeno disuelto en la ferrita, lo cual causa una alto grado de superficie rugosa (véase Figura 3.8). La influencia de esta rugosidad con un número alto de crestas por longitud en el formado, pintado y resistencia a la corrosión es aún investigada; los primeros resultados revelan un efecto positivo [7].

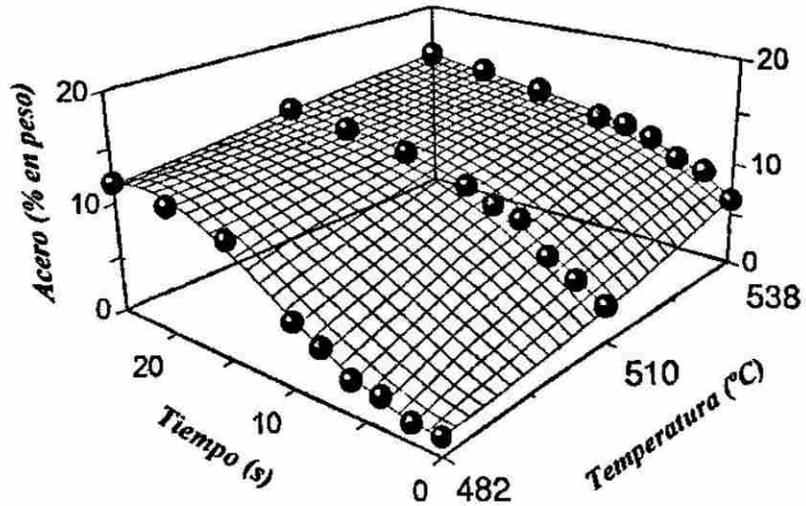


Figura 3.7 Contenido de Fe (% en peso) en el recubrimiento como una función de tiempo y temperatura del proceso de galvanneal de un baño de galvanizado que contiene un 0.13 % Al. El acero base es uno libre de intersticiales. El peso del recubrimiento es 60 g/m^2 [8].

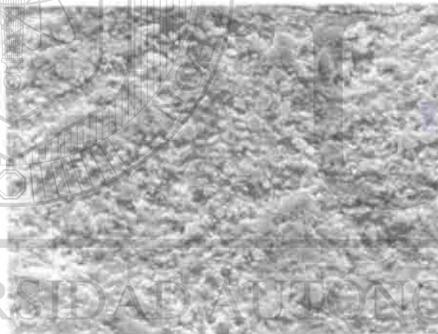


Lámina de acero IF, $R_a = 2.5 \mu\text{m}$

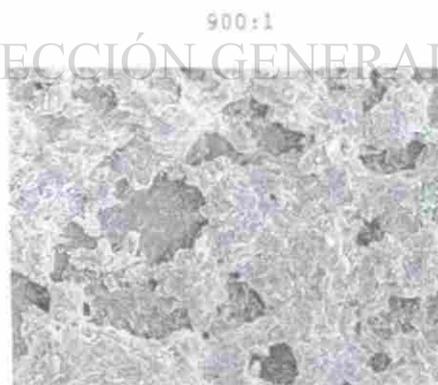


Lámina de acero descarburizada al vacío
 $R_a = 6.3 \mu\text{m}$

Figura 3.8 Micrografías por SEM y gráficas de rugosidad de lámina de acero con tratamiento galvanneal [7].

Sección 5: Post-procesamiento.

El tenso-nivelador y la laminación superficial son dos de las más comunes estaciones de post-procesamiento. La laminación superficial en la lámina de acero con recubrimiento, es llevado a cabo con la finalidad de incrementar la resistencia a la cedencia (para aceros libres de intersticiales) o para remover el indeseable punto de cedencia por elongación (en acero no-desgasificado) y para crear una superficie más lisa. El tenso nivelador es efectuado para mejorar la forma de la lámina.

Otros post-tratamientos son el cromado y el electro plateado con recubrimientos ricos en Fe, el primero resulta en superficies más resistentes a la corrosión y el segundo en un incremento en su facilidad de pintado y otras propiedades [8]. Además, del pintado de la lámina con un “primer” (base de pintura) catódico electro-sumergido.

3.3 Fundamentos de la galvanización por inmersión en caliente.

La reacción química entre el Zn y el Fe base da a lugar a la formación de diferentes capas de aleación según el diagrama binario Zn-Fe mostrado en la Figura 3.9 [9] y en la Tabla 3.1 [11], la cual enumera estas fases, así como su fórmula y estructura cristalina. Como se puede observar en el diagrama de fases, alfa es una solución sólida de Zn en acero. Sin embargo, ésta se forma de varios compuestos intermetálicos que varían con el incremento de Fe a ξ , δ , Γ_1 , y Γ .

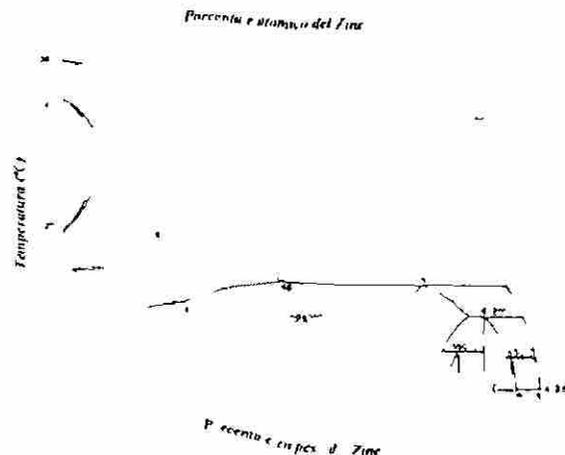


Figura 3.9 Diagrama binario Fe-Zn [9].

Tabla 3.1 Fases Zn-Fe [11].

<i>Fases</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Estructura cristalina</i>
η (eta)	Zn (Fe)	HCP
ξ (zeta)	FeZn ₁₃	Monoclinica
δ (delta)	FeZn ₇	Hexagonal
Γ (gamma ₁)	FeZn ₄	FCC
Γ (gamma)	Fe ₇ Zn ₁₀	BCC
α (alfa)	Fe (Zn)	BCC

El recubrimiento rico en Zn consiste de sub-capas; una delgada capa Γ junto al Fe, seguido por una pequeña capa δ_1 y una capa ξ (véase Figura 3.10). La fase δ_1 es usualmente dividida en dos zonas de diferente morfología. La parte rica en Zn con una apariencia columnar es llamada δ_{1p} y la parte rica en Fe con apariencia compacta se denomina δ_{1k} . Basain y colaboradores [7] han propuesto no dividir la fase δ_1 , ya que sus patrones de difracción de rayos X son idénticos.

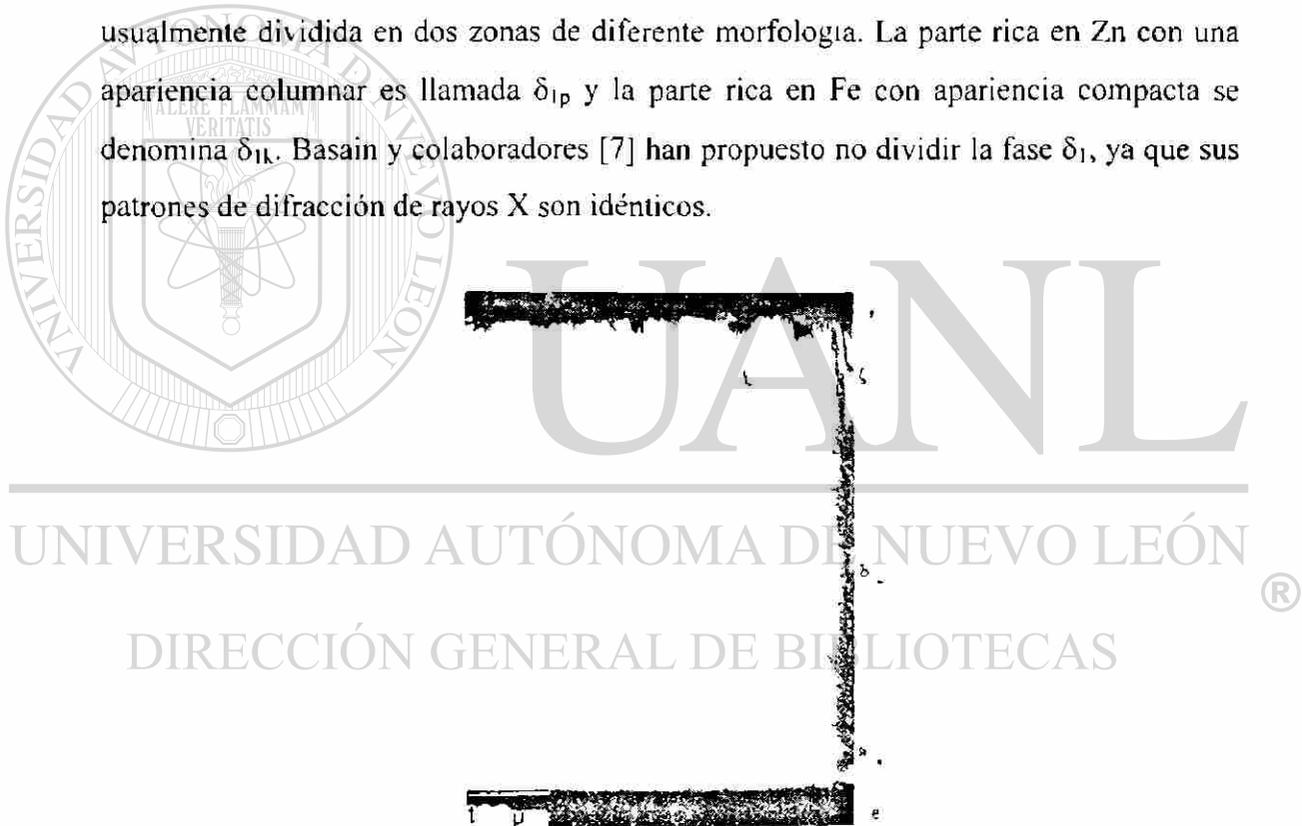


Figura 3.10 Micrográfica del recubrimiento de Zn [11].

En la Figura 3.11 se muestra una representación sistemática de la solidificación del recubrimiento de galvanizado.

El Al es probablemente elemento aleante más importante que se añade al baño de galvanización, en diferentes niveles de contenido, para provocar propiedades específicas

en el producto con recubrimiento. El Al se añade al baño de Zn para mejorar su resistencia a la corrosión introduciendo microestructuras multifase en la superficie del recubrimiento [11]. Además, éste controla la formación de escoria en el baño y las formaciones de las fases de Fe-Zn que perjudican la adhesión en las láminas galvanizadas. Pero el contenido de Al en el baño de Zn, también debe de controlarse rigurosamente, debido a que conforme aumenta el contenido de Al presente en el recubrimiento se incrementa la rapidez del desgaste de los electrodos en la soldadura [12].

La adición del Al en el baño de galvanizado para controlar la microestructura del recubrimiento es una parte integral de la moderna tecnología del galvanizado. El Al puede disolverse en todos los componentes binarios de Zn-Fe. En un baño de galvanizado continuo, el Fe existe en dos formas: en el Zn líquido como soluto o en la lámina de acero sólida. El Al puede combinarse con el Fe en el Zn líquido para formar partículas de la fase η (Fe_2Al_5), las cuales pueden flotar en la superficie del baño formando una capa de escoria, o bien el Al puede reaccionar con el Fe de la lámina depositando la fase η como una capa protectora, comúnmente denominada capa inhibidora, la cual evita el contacto directo entre la lámina y el Zn líquido y por consiguiente deja libre o sin alcar al recubrimiento de Zn. Esta capa inhibidora es deseable porque evita la formación de aleaciones Zn-Fe, mejorando así, la adhesión del recubrimiento y la ductilidad. En cambio en el proceso de galvanneal debe ser evitada porque aparecerán un número de defectos en el recubrimientos, tales como una aleación incompleta y marcas impresas por el rodillo sumergido [10].

En el galvanizado continuo, que es tan bueno como el galvanizado general, los compuestos Zn-Fe se forman frecuentemente en los recubrimientos donde estos componentes son termodinámicamente metaestables. Por ejemplo, Klusalass y colaboradores [10], encontraron que en un baño con 0.16 % de Al y con Fe sobresaturado se cristalizaban continuamente aleaciones Zn-Fe en probetas con un tiempo de inmersión de 3 segundos.

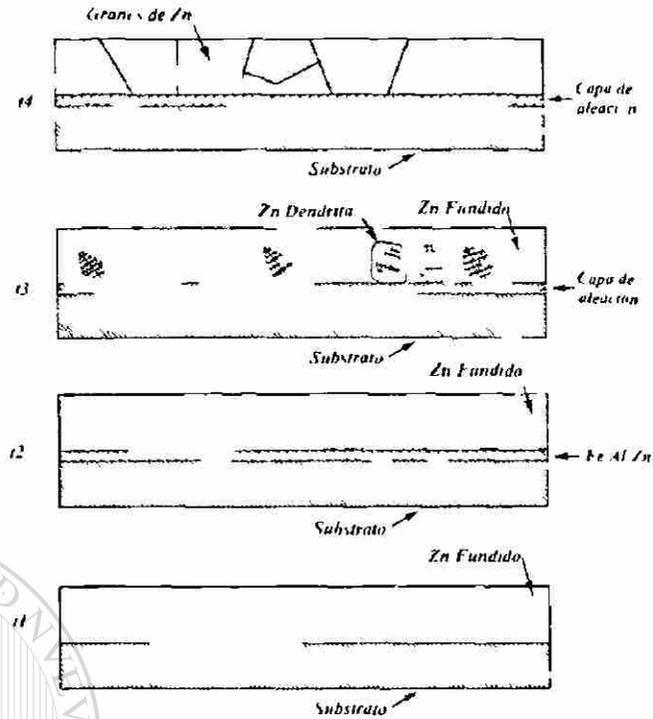


Figura 3.11 Esquema de la solidificación en el galvanizado ($t_4 > t_3 > t_2 > t_1$) [11].

En esencia, un baño de galvanizado es una aleación ternaria de Zn-Fe-Al. Las actividades del Fe y el Al en el Zn fundido son interrelacionadas a través de las propiedades termodinámicas de los compuestos intermetálicos en equilibrio con el líquido.

En la Tabla 3.2 se muestra el resumen de las microestructuras presentes en el recubrimiento en la galvanización continua.

Tabla 3.2 Resumen de las microestructuras del recubrimiento por galvanizado continuo [10, 12].

Contenido de Al (% en peso)	Compuesto en equilibrio	Intermetálicos en el recubrimiento.	Características de la capa de aleación	Velocidad de nucleación s	Velocidad de crecimiento $\mu\text{m s}$
0-100	ζ	δ, Γ, Γ'	Continuo	$\sim 10^8$	Hasta ~ 10
0-10 a 0-135	δ	δ, Γ, Γ'	Existencia de huecos	$\zeta \sim 10^8$	~ 1
0-135 a 0-141	η	Principalmente ζ	Discontinuo	$\zeta \sim 10^8$	$\zeta \sim 0.5, \eta \sim 0.05$
0-140 a 0-145		mas η	Disolución de ζ	$\eta \sim 10$	$\zeta \sim 0.1, \eta \sim 0.05$
0-145 a 0-150		Principalmente η	Disolución de ζ	$\eta \sim 10$	$\zeta \sim 0.1, \eta \sim 0.05$
0-151		η	Intermetálicos	Intermetálicos	$\eta \sim 10$

3.4 Propiedades mecánicas.

La Tabla 3.3 muestra los datos obtenidos de una evaluación a gran escala (>2000 rollos) de laminas de acero galvanizada por inmersión en caliente hechas de acero descarburizado al vacío e IF microaleado al Ti. Los valores confirman la excelente capacidad de formado en frío en ambos tipos de aceros, en particular el del acero enrollado a alta temperatura. En el estado de galvanneal, se obtienen valores inferiores de elongacion y el valor-r (que es la relación deformación-plástica que describe la resistencia del acero al adelgazamiento durante las operaciones de formado), causados por la naturaleza frágil del recubrimiento ZnFe. En aceros de bajo carbono tiende a aumentar el punto de cedencia. Cubriendo así la mínima resistencia a la cedencia entre 220 y 340 N mm², combinado con una buena capacidad de formado y resistencia al envejecimiento [7].

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de grados especiales de galvanización por inmersión en caliente y galvanneal [7].

Datos del ensayo de tension.	A ₈	r ₉₀	n ₉₀
Recubrimiento Acero base	%		
<u>Galvanización por inmersión en caliente</u>			
Acero descarburizado al vacío.	45	1.95	0.216
Acero IF (1)	43	1.99	0.223
Acero IF (2)	44	2.35	0.228
<u>Galvanneal</u>			
Acero descarburizado al vacío.	42	1.70	0.209
Acero IF (1)	40	1.61	0.216
Acero IF (2)	41	1.92	0.218

(1) Temperatura de enrollado baja

(2) Temperatura de enrollado alta

A₈ % de reducción de área aplicando un 80 % de la resistencia.

r₉₀ Es la relación deformación-plástica calculada a 90° de la dirección de la laminación.

n₉₀ Exponente de endurecimiento por deformación a 90° de la dirección de la laminación.

3.5 Capacidad de formado.

La capacidad de formado de las laminas de acero con recubrimiento no está únicamente determinada por las propiedades del material base, sino también por la combinación y comportamiento formada entre el recubrimiento en contacto con los dados. La abrasion severa puede llevar a un crecimiento epitaxial en el juego y a defectos superficiales. En pruebas realizadas por Warnecke et al [7] en un simulador para el comportamiento de abrasión se encontró que el mayor factor que influye en éste comportamiento es el contenido de Fe en el recubrimiento. Como se muestra en la Figura 3.12 la abrasión se incrementa con el contenido de carbono [7].

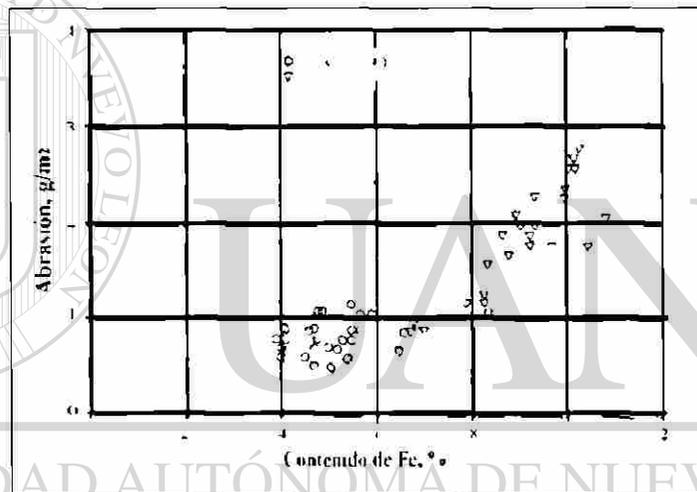


Figura 3.12 Influencia del contenido de Fe en la capa de ZnFe en la abrasión [7].

3.6 Capacidad de soldado.

El más importante proceso de union de los componentes hechos de lámina de acero galvanizada por inmersión en caliente, es la soldadura de resistencia por puntos [7]. Los diseñadores de la industria automotriz han incrementado, en los últimos años, la cantidad de zinc en los aceros recubiertos, principalmente para incrementar la protección contra la corrosion. Durante la soldadura de un acero recubierto galvanizado, el zinc presente en la interfase lámina-lamina se funde y se desplaza radialmente de la zona soldada (Halo). Esta zona de zinc fundido que rodea la soldadura desvía algo de la

corriente alrededor de la zona soldada provocando un decremento de la corriente disponible para formar la soldadura, dando como resultado un incremento de la corriente necesaria para generar la union en un acero recubierto [12].

Otros aspectos a considerar para calificar un material con una buena soldabilidad, consiste en fijar los parámetros de operación de una línea de galvanizado limitando el contenido de Al en el baño a 0.15%, pudiendo así minimizar la cantidad de Al presente en le recubrimiento, por lo tanto mejorando la soldabilidad de la lámina galvanizada [12].

Los criterios importantes son el servicio de la soldadura y la vida de los electrodos. Un buen punto de soldadura depende de los parámetros de la soldadura que satisfacen al material, tales como la corriente de soldadura, la fuerza del electrodo y tiempo de flujo. En la Figura 3.13 se puede observar la diferencia de corriente para soldadura entre una lámina de acero galvanizada por inmersión en caliente y la de una lámina de acero rolada en frío, siendo la galvanizada la que consume más energía. Los niveles obtenidos son aun más altos para una lámina de acero con galvanneal. La aleación del electrodo es reducida por valores de alta dureza y un alto punto de fusión del recubrimiento ZnFe [7].

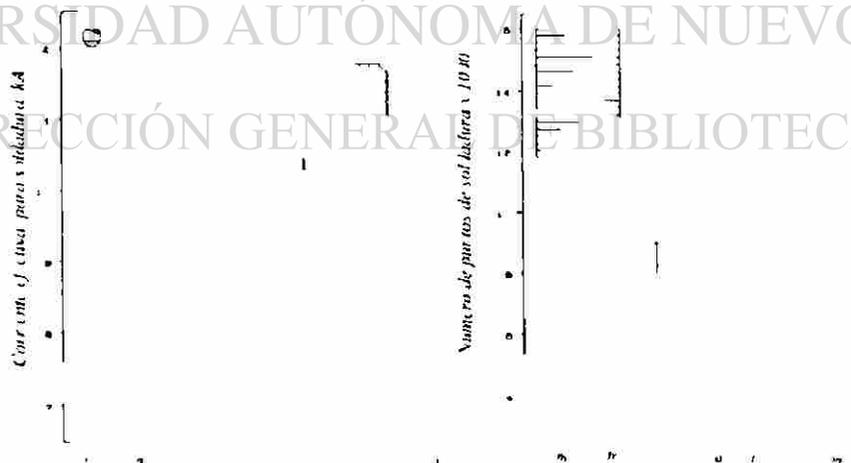


Figura 3.13 Corriente efectiva de la soldadura y tiempo de vida del electrodo de láminas galvanizadas y galvanneal [7].

3.7 Resistencia a la corrosión.

Una de las principales características del galvanizado, es como se ha mencionado anteriormente, su resistencia a la corrosión. La Figura 3.14 muestra una lamina de acero galvanizada y una galvanneal, las cuales fueron sujetas a una exposición al aire libre por 12 meses. En esta prueba las probetas se guardaron en un stand de prueba en Duisburg al aire libre, inclinadas a 5° con respecto a la horizontal. Para intensificar la prueba, las probetas de abajo fueron rociadas una vez por semana con una solución al 3% de NaCl de acuerdo a la prueba VDA 621-414 (esta prueba simula el comportamiento del material a un medio marítimo). Sin rociar esta solución, ninguno espécimen mostró formación de óxido después de este período de la prueba .

Bajo las condiciones intensificadas de la prueba, la formación de óxido puede ser claramente vista después de 10 meses en el caso del galvanizado. En contraste a esto, el óxido no puede ser encontrado aún después de 18 meses con el galvanneal. La formación rápida del óxido es debido al Fe del recubrimiento [7].

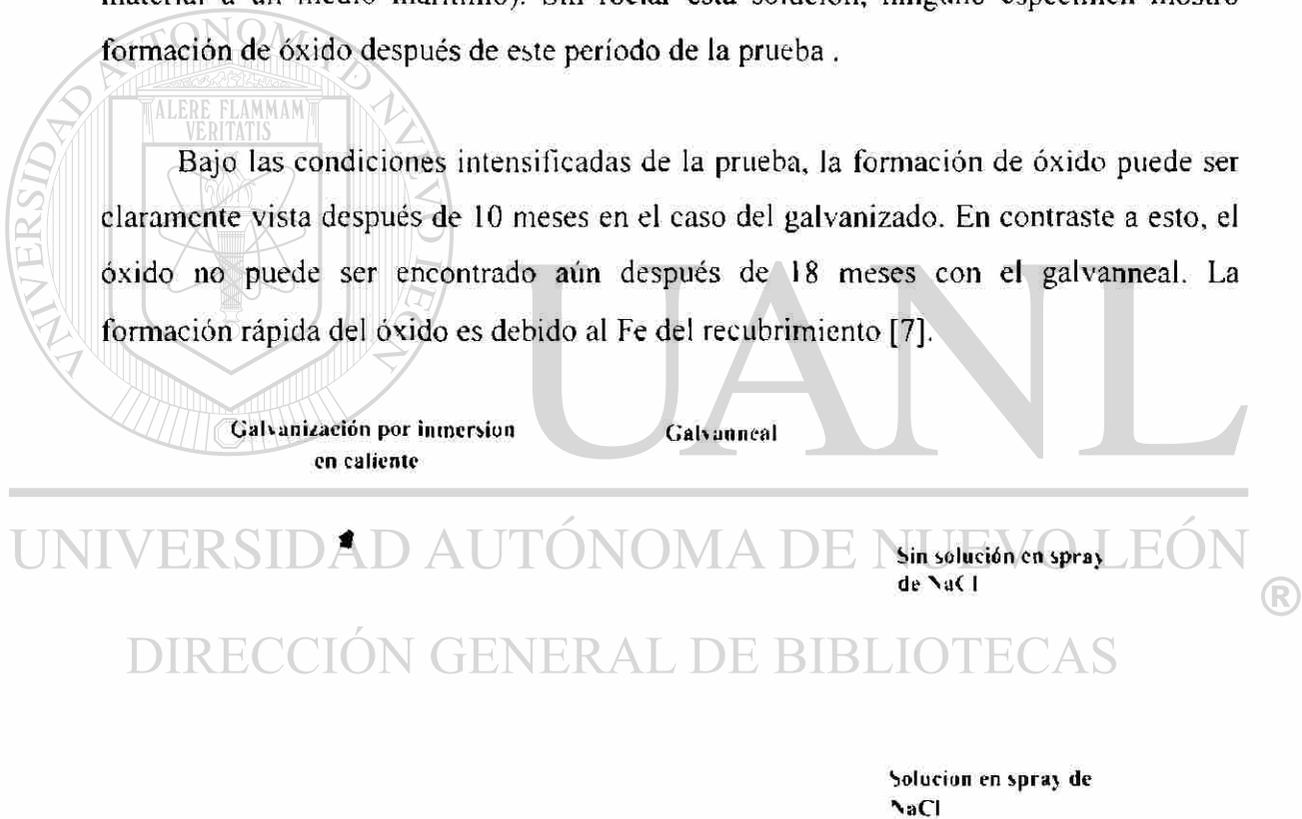


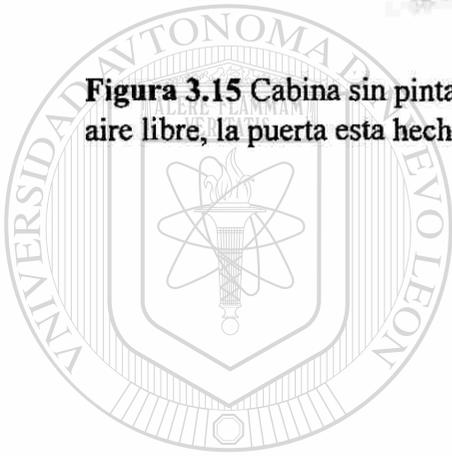
Figura 3.14 Aspecto de la corrosión en probetas sin pintar después de 12 meses de exposición al aire libre de acuerdo a la prueba VDA 621-414 [7].

En la Figura 3.15 se muestra un ejemplo del uso de lámina de acero galvanneal en el cuerpo del automóvil. Aquí fue tomada de la producción una cabina sin pintar y fue

expuesta al aire libre. Después de 18 meses los componentes hechos de galvanneal no presentaban formación de óxido.



Figura 3.15 Cabina sin pintar de una automóvil después de 18 meses de exposición al aire libre, la puerta esta hecha de lámina galvanneal [7].



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 4

SIMULACION POR EL METODO DEL ELEMENTO FINITO.

4.1 Métodos numéricos.

Los métodos numéricos son técnicas mediante las cuales es posible formular problemas de tal manera que puedan resolverse utilizando operaciones aritméticas [13]. Aunque existen muchos tipos de métodos numéricos, todos comparten una característica común, que se llevan a cabo mediante un buen número de cálculos aritméticos. Desde finales de la década de 1940, con la multiplicación y disponibilidad de las computadoras digitales han llevado a un verdadero aumento en el uso y desarrollo de los métodos numéricos [13].

Las razones por las cuales es importante estudiar los métodos numéricos son las siguientes [13]:

- Los métodos numéricos son herramientas poderosas para la solución de problemas. Son capaces de manejar sistemas de ecuaciones grandes, no linealidades y geometrías complicadas que son comunes en la práctica de la ingeniería y que a menudo, son imposibles resolver analíticamente.
- El uso de programas de computadoras disponibles comercialmente que utilicen métodos numéricos.

- Si se está instruyendo en los métodos numéricos y si es adepto de la programación de computadoras, entonces se tiene la capacidad de diseñar programas propios para resolver problemas, sin tener que comprar programas costosos.
- Los métodos numéricos son un vehículo eficiente para aprender a servirse de las computadoras personales.

4.1.1 Aproximaciones y errores.

Aunque las técnicas numéricas obtienen soluciones cercanas a la realidad, hay cierta discrepancia o error, debido a que los métodos numéricos son sólo una aproximación. Los tipos de errores más comunes son los de redondeo y truncamiento.

Exactitud y precisión. Los errores asociados con los cálculos y medidas se pueden caracterizar observando su precisión y exactitud. La precisión se refiere al número de cifras significativas que represente una cantidad o a la extensión en las lecturas repetidas de un instrumento que mide alguna propiedad física. La exactitud se refiere a la aproximación de un número o valor verdadero que se supone representa [13].

Errores. Los errores numéricos se generan con el uso de aproximaciones para representar las operaciones y cantidades matemáticas. Estos incluyen errores de truncamiento, que resultan de representar aproximadamente un procedimiento matemático exacto, y de los errores de redondeo, que resultan de representar aproximadamente números exactos. Para los dos tipos de errores, la relación entre el resultado exacto o verdadero y el aproximado está dada por [13]

$$\text{Valor verdadero} = \text{valor aproximado} + \text{error} \quad (4.1)$$

reordenando la ecuación, se encuentra que el error numérico es igual a la diferencia entre el valor verdadero y el valor aproximado. El *error numérico total* es la suma de los errores de redondeo y de truncamiento.

4.1.2 Modelos matemáticos.

El propósito de un modelo matemático es ayudar a definir un problema ó proceso mediante una ecuación o sistema de ecuaciones y para ilustrar como pueden facilitar la solución de problemas en ingeniería.

Un modelo matemático se puede definir, de una manera general, como una formulación o ecuación que expresa las características fundamentales de un sistema ó proceso físico en términos matemáticos. Los modelos se clasifican desde simples relaciones algebraicas hasta grandes y complicados sistemas de ecuaciones diferenciales [13].

Las características habituales de los modelos matemáticos son, describe un sistema o proceso natural en términos matemáticos, representa una idealización y una simplificación de la realidad (es decir, ignora los detalles insignificantes del proceso natural y se concentra en las manifestaciones elementales), y conduce a resultados predecibles y, en consecuencia, puede emplearse para propósitos de predicción.

4.1.3 Ecuaciones diferenciales.

Las ecuaciones, compuestas de una función incógnita y su derivada, se les conoce como *ecuaciones diferenciales*. A la cantidad que se va a diferenciar se le conoce como variable independiente. Cuando la ecuación incluye sólo una variable independiente se le conoce como *ecuación diferencial ordinaria*, si incluye más de una entonces se le llama *ecuación diferencial parcial*. Además de las ecuaciones se clasifican de acuerdo a su orden, es decir de acuerdo al orden de la derivada mayor. Las ecuaciones que no son de primer orden, se pueden reducir a un sistema de ecuaciones de primer orden.

Una solución de una ecuación diferencial ordinaria es una función específica de la variable independiente y de sus parámetros que satisfacen la ecuación diferencial y pueden ser resueltas analíticamente [13].

Si se tiene una ecuación diferencial ordinaria de la forma

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (4.2)$$

y si

Valor actual = valor anterior + pendiente x tamaño del paso

o, en términos matemáticos

$$y_{i+1} = y_i + \phi h \quad (4.3)$$

De acuerdo a esta ecuación, se usa la aproximación a la pendiente ϕ para extrapolar a partir de un valor anterior y_i a un valor actual y_{i+1} en una distancia h (Figura 4.1). Esta fórmula se aplica paso a paso para calcular una solución futura y, de aquí, trazar la trayectoria de la solución.

Todos los métodos de un paso se pueden expresar de esta forma general, con la única diferencia en el cálculo de la pendiente.

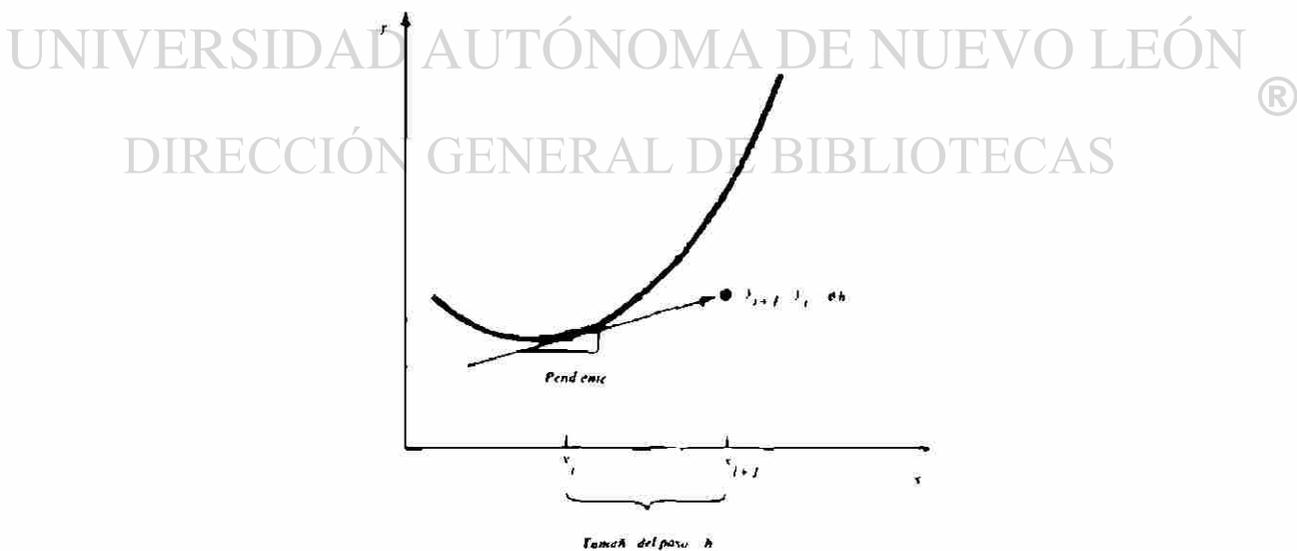


Figura 4.1 Esquema gráfico del método de un paso [13].

Los métodos principales de un paso son:

1. *Método de Euler.* La primera derivada proporciona una aproximación directa a la pendiente x_i (Figura 4.2):

$$\phi = f(x_i, y_i) \quad (4.4)$$

donde $f(x_i, y_i)$ es la ecuación evaluada en x y y . Esta aproximación se sustituye en la ecuación 4.4:

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h \quad (4.5)$$

A esta fórmula se le conoce como método de Euler (o método de Euler-Cauchy o de pendiente puntual). Se predice un nuevo valor de y usando la pendiente (igual a la primera derivada en el valor original x) para extrapolar linealmente sobre el tamaño del paso h (ver Figura 4.2).

2. *Método de Runge-Kutta.* Este método tiene la exactitud del esquema de la serie de Taylor sin necesitar del cálculo de derivadas superiores. Existen muchas variaciones pero todas ellas se pueden ajustar a la forma general de la ecuación 4.4:

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i, h)h \quad (4.6)$$

donde a $\phi(x_i, y_i, h)$ se le llama función de incremento y puede interpretarse como el promedio de la pendiente sobre el intervalo.

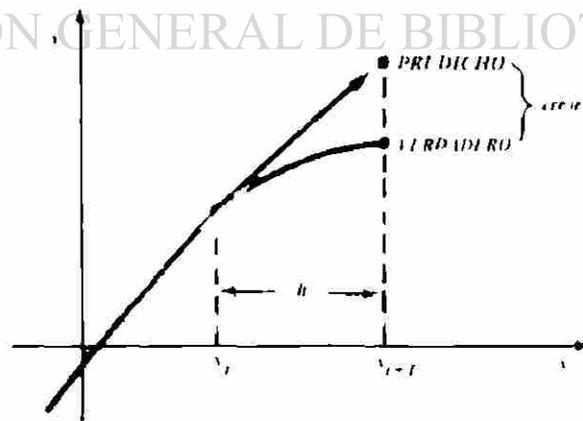


Figura 4.2 Esquema gráfico del método de Euler [13].

4.2 Método de diferencias finitas.

Los métodos de elemento finito y diferencias finitas están relacionados, ya que ambos discretizan ecuaciones diferenciales parciales y se resuelven bajo condiciones iniciales y valores límite apropiados. Sin embargo, el método de diferencias finitas no requiere el uso de funciones de prueba polinomiales ni de una minimización del procedimiento. Los métodos de diferencias finitas fueron originalmente diseñados para resolver problemas de valor inicial, dentro de esta sección se concentran las aproximaciones numéricas de funciones que son descritas por ecuaciones diferenciales las cuales comprenden derivadas con respecto al tiempo [14].

Las técnicas de diferencias finitas están basadas en dos aproximaciones numéricas, es decir, la discretización del tiempo de una medida continua dentro de pequeños intervalos de distancia $h = \Delta t$, y la sustitución de la ecuación diferencial por su correspondiente ecuación por diferencias finitas.

La primera derivada du/dt de una función $u(t)$ se define en t_0 por el límite de un cociente de la diferencia:

$$\frac{du}{dt} \Big|_{t_0} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(t_0 + h) - u(t_0)}{h} \quad (4.7)$$

La transformación de este continuo en su cociente de diferencias finitas.

$$\frac{\Delta u}{h} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{u(t_0 + h) - u(t_0)}{h} \quad (4.8)$$

es un método discreto desde su objetivo restrictivo para satisfacer la ecuación gobernante discretamente en lugar de continuamente.

El modelo de diferencias finitas está constituido por ecuaciones diferenciales para una formación de una cuadrícula de puntos y este es mejorado si el número de puntos es incrementado. Con las técnicas de diferencias finitas se pueden aplicar a problemas difíciles, pero para geometría irregulares o especificaciones inusuales de las condiciones frontera, esta técnica se torna difícil de utilizar [15].

4.3 Método del elemento finito.

El método del elemento finito es una técnica de análisis numérico con el cual se obtienen soluciones aproximadas para una amplia variedad de problemas ingenieriles. Aunque, originalmente se desarrolló para su aplicación en la Ingeniería Civil, éste se ha extendido y aplicado en el amplio campo de los problemas continuos [15].

Mientras que en el método de diferencias finitas la región de solución se define como una formación de una cuadrícula de puntos, en el método del elemento finito se propone la región de solución como una construcción de muchas pequeñas subregiones o elementos interconectados. La deducción básica del método del elemento finito es que la región de solución puede ser modelada analíticamente o aproximada por su reemplazo de un ensamblaje de elementos discretos. Donde estos elementos se pueden juntar en una variedad de maneras, que se pueden usar representado formas extremadamente complejas.

Como un ejemplo del modelo de diferencias finitas y un modelo de elemento finito, pueden ser utilizados para representar una forma geométrica compleja, considere una sección transversal de un alabe de una turbina mostrado en la Figura 4.3. Para esta pieza queremos encontrar la distribución de esfuerzos y desplazamientos para una carga de fuerza dada o la distribución de temperaturas de una carga térmica dada. El pasaje del líquido refrigerante en el interior del alabe, junto con su forma exterior, le da una geometría compleja.

Un mallado uniforme con diferencias finitas cubriría razonablemente el alabe (la región de solución), pero los límites deben ser aproximados por una serie de líneas verticales y horizontales (o paso de escalón). Por el otro lado, el modelo de elemento finito (usando la más simple geometría de elemento en dos dimensiones: el triángulo) da una mejor aproximación de la región y requiere menos nodos. También, una mejor aproximación de la forma del límite, porque el límite curvo es respetado por una serie de líneas rectas. Este ejemplo no intenta sugerir que los modelos de elemento finito son

decididamente mejores que los modelos de diferencias finitas para todos los problemas. El único propósito de éste ejemplo, es demostrar que el método del elemento finito es particularmente bueno para problemas con geometrías complejas.

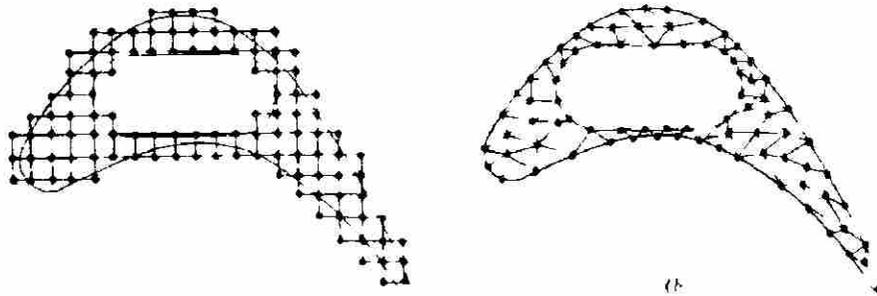


Figura 4.3 (a) Diferencias finitas y (b) discretizaciones del elemento finito de un perfil de un alabe de una turbina [15].

4.3.1 Funcionamiento del método del elemento finito.

En un problema continuo de cualquier dimensión, el campo variable (ya sea si es presión, temperatura, desplazamiento, esfuerzo o cualquier otra cantidad) posee un número infinito de valores, esto se debe en que cada punto del cuerpo o región de solución es una función, es decir se tiene un problema con un número infinito de incógnitas.

El proceso de discretización del método del elemento finito minimiza el problema a un número de incógnitas, ya que divide la región de solución en elementos y expresa la incógnita del campo variable en términos de supuestas funciones aproximadas dentro de cada elemento, estas funciones (algunas veces llamadas funciones de interpolación, forma o de elemento finito) se definen en términos de los valores del campo de variables en puntos específicos denominados *nodos* o *puntos nodales* [15].

Los nodos generalmente simulan los límites del elemento, donde los elementos adyacentes son conectados. Además para nodos límites, un elemento puede tener pocos nodos interiores.

El valor nodal de un campo variable y las funciones de interpolación de los elementos definen completamente la conducta del campo variable dentro de los elementos.

Claramente, la naturaleza de la solución y el grado de aproximación no dependen únicamente del tamaño y número de elementos usado, sino también de la función de interpolación. Un rasgo importante del método del elemento finito es la habilidad de formular soluciones para elementos individuales antes de unirse, para respetar el problema entero. En esencia, un problema complejo se reduce a una serie de problemas simplificados.

Otra de las ventajas del método del elemento finito es la variedad de maneras y técnicas en las cuales se pueden formular las propiedades de los elementos individuales. Son básicamente tres aproximaciones. La primera aproximación para obtener las propiedades del elemento es llamada la *aproximación directa* [15], porque su origen está diseñado para el método de rigidez directa de análisis estructural. Aunque la aproximación directa puede ser utilizada únicamente para problemas relativamente simples, es la más fácil de entender cuando se conoce por primera vez el método del elemento finito. La aproximación directa sugiere la necesidad de una matriz algebraica en el manejo de las ecuaciones del elemento finito.

Las propiedades del elemento obtenidas por aproximación directa pueden también ser determinadas por la *aproximación variacional* [15]. La aproximación variacional cuenta con el cálculo de variaciones e involucra un funcional. El conocimiento de la aproximación variacional es necesario para trabajar más allá del nivel introductorio y para extender el método del elemento finito para una amplia variedad de problemas ingenieriles. La aproximación variacional puede ser empleada en elementos de formas sofisticadas o simples

Una tercera aproximación más versátil para derivar las propiedades del elemento tiene sus bases en las matemáticas y se le conoce como la *aproximación de residuos*

ponderados [15]. La aproximación de residuos ponderados comienza con las ecuaciones gobernantes del problema y procede sin contar con una declaración variacional. Esta aproximación es ventajosa porque es posible extender el método del elemento finito para problemas donde el funcional no está disponible. El método de residuos ponderados es ampliamente usado para derivar las propiedades del elemento de aplicaciones no estructurales, tal como la transferencia de calor y mecánica de fluidos.

Resumiendo en términos generales el cómo trabaja el método del elemento finito, tenemos que [15]:

1. ***Discretizar el continuo.*** El primer paso es dividir el continuo o la región de la solución en elementos. Una variedad de formas del elemento pueden ser utilizadas, y diferentes formas del elemento pueden ser empleadas en la misma región de la solución. Aunque el número y el tipo de elementos en un problema dado son elementos del juicio ingenieril, el analista puede contar con la experiencia de otros.
2. ***Seleccionar las funciones de interpolación.*** El siguiente paso es la asignación de nodos a cada elemento y entonces escoger la función de interpolación que represente la variación del campo variable sobre del elemento. El campo variable puede ser un escalar, en vector, ó un tensor de alto orden. A menudo, los polinomios son seleccionados como funciones de interpolación del campo variable, porque éstas son fáciles de integrar y diferenciar. El grado del polinomio se selecciona, dependiendo del número de nodos asignados al elemento, la naturaleza y el número de las incógnitas de cada nodo, y ciertos requisitos de la continuidad se imponen en los nodos y a lo largo del límite del elemento. La magnitud del campo variable, así como la dimensión sus derivadas pueden ser las incógnitas en los nodos.
3. ***Encontrar las propiedades del elemento.*** Una vez que el modelo de elemento finito ha sido establecido, estamos listos para determinar las ecuaciones de la matriz que expresan las propiedades del elemento individual. Para esta tarea, podemos usar una de las tres aproximaciones antes mencionadas: la aproximación directa, la variacional o la de residuos ponderados.

4. **Ensamblar las propiedades del elemento con el sistema de ecuaciones obtenido.** Para encontrar las propiedades del sistema global modelado por la red de elementos debemos ensamblar todas las propiedades del elemento. En otras palabras, combinamos las ecuaciones de la matriz expresando la conducta de los elementos y forma la ecuación de la matriz expresando la conducta del sistema completo.

Las bases del procedimiento de ensamblaje provienen del hecho de que en un nodo, donde los elementos son conectados, el valor del campo variable es el mismo en cada elemento que comparte este nodo.

5. **Asignar las condiciones frontera.** Antes que el sistema de ecuaciones este listo para la solución, las ecuaciones deben de ser modificadas para considerar las condiciones límite del problema. En esta fase asignamos valores nodales conocidos de las variables dependientes o cargas nodales.

6. **Resolver el sistema de ecuaciones.** El proceso de ensamblaje da una serie de ecuaciones simultáneas que resolvemos para obtener los valores nodales desconocidos del problema. Si el problema describe un comportamiento estable o de equilibrio entonces debemos resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales.

7. **Hacer cálculos adicionales si se desea.** Muchas veces utilizamos la solución del sistema de ecuaciones para calcular otros parámetros importantes. Por ejemplo, en un problema estructural las incógnitas nodales son los componentes de desplazamiento. De estos desplazamientos calculamos elementos de esfuerzo y deformación.

4.3.2 Aproximación directa.

La ventaja de esta aproximación está en el entendimiento de las técnicas y conceptos esenciales obtenidos sin mucha manipulación matemática. En cualquier análisis por elemento finito, el primer paso es remplazar un sistema complejo por un sistema equivalente idealizado consistente de elementos individuales conectados el uno

al otro en puntos específicos o nodos. Implícito en este procedimiento está el problema de definir ó identificar los elementos y también determinar sus propiedades [15].

4.3.2.1 Definir elementos y sus propiedades.

Para definir elementos y sus propiedades, se empleará uno de los más elementales sistemas que se pueden examinar desde el punto de vista de elemento finito, este es sistema de resorte lineal, mostrado en la Figura 4.4. En este sistema se tienen dos resortes conectados en serie en la dirección del eje coordenado x . Un extremo del resorte, el del lado izquierdo, esta empotrado a una pared, mientras que el lado derecho tiene libre movimiento. Ambos resortes, pueden experimentar compresión o tensión. Los únicos parámetros de este sistema son fuerzas, desplazamientos y rigidez de los resortes.

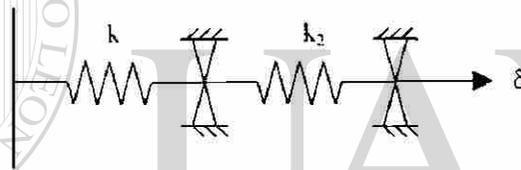


Figura 4.4 Un sistema simple lineal de resorte [15].

El camino para subdividir este sistema en elementos discretos es obvio, si definimos cada resorte como un elemento, este sistema consiste de dos elementos y tres nodos (puntos de conexión donde las fuerzas pueden ser transmitidas y los desplazamientos pueden existir).

Para determinar las propiedades del elemento, en este caso sus ecuaciones de fuerza-desplazamiento, enfocamos nuestra atención en un elemento aislado mostrado en un diagrama de cuerpo libre de la Figura 4.5. Una fuerza y un desplazamiento son definidos para cada nodo, y por conveniencia tomamos estas fuerzas y desplazamientos en la dirección de x positiva. El campo variable de este problema es el desplazamiento. No es necesario escoger una ecuación de interpolación, ya que este campo variable cuenta con una representación exacta: la Ley de Hooke en su forma más simple, la cual

proporciona los medios para relacionar los desplazamientos nodales y la aplicación de fuerzas nodales.

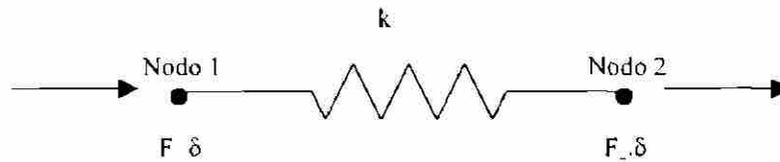


Figura 4.5 Diagrama de cuerpo libre de un sistema simple lineal de resorte [15].

De acuerdo a esta ley, cuando un resorte elástico experimenta una carga axial F , este se desplaza una cantidad δ , dada por:

$$\delta = \frac{1}{k} F = aF \quad (4.9)$$

donde k es la rigidez del resorte (constante del resorte), y a es la flexibilidad del resorte. De la ecuación 4.9 se puede interpretar a k como la fuerza requerida para producir una unidad de desplazamiento y a como el desplazamiento causado por una unidad de fuerza. Usando la ecuación 4.9, se puede escribir la relación entre fuerza-desplazamiento del resorte en términos de fuerza nodal F_1 y desplazamientos nodales,

$$F = -k\delta_1 + k\delta_2 \quad (4.10)$$

y desde equilibrio de fuerzas requiere $F_2 = -F_1$, tenemos que

$$F_1 = k\delta_1 + k\delta_2 \quad (4.11)$$

Si utilizamos la notación matricial, las ecuaciones 4.10 y 4.11 pueden ser escritas como una ecuación expresando las propiedades fuerza-desplazamiento de un elemento:

$$\begin{bmatrix} k & k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (4.12a)$$

ó

$$[K] \{\delta\} = F^1 \quad (4.12b)$$

Los componentes de $[K]$ son usualmente sub-escritos como k_{ij} , para expresar su localización en la fila i y columna j de $[K]$. La matriz cuadrada $[K]$ es conocida como la

matriz de rigidez, el vector columna $\{\delta\}$ es el vector de desplazamiento nodal, y el vector columna $\{F\}$ es el vector de fuerza nodal del elemento.

Aunque la ecuación 4.12 derivada de uno de los mas simples tipos de elementos finitos, es decir, un resorte lineal, el cual posee muchas de las características de las ecuaciones que expresan las propiedades de muchos elementos complejos. Por ejemplo, la forma de la ecuación 4.12 queda igual, sin importar el tipo de problema, la complejidad del elemento, o el camino en el cual las propiedades del elemento fueron derivadas.

Las propiedades del elemento dadas por la ecuación 4.12 aplican a ambos elementos el del lado derecho y al del lado izquierdo, y dependen de que valor de rigidez de resorte se sustituye dentro de $[K]$. Las restricciones son tomadas en cuenta únicamente después de que las ecuaciones del elemento son ensambladas para formar el sistema de ecuaciones.

4.3.2.2 Elementos simples de mecanismos estructurales.

En la ingeniería comúnmente la idea de modelar una estructura como una serie de elementos finitos empezó como una extensión de los métodos tradicionales utilizados para analizar estructuras ideales tales como soportes y puentes. Estas estructuras consisten de barras interconectadas únicamente en ciertos puntos donde las fuerzas son transmitidas. Para sujetar miembros conectados como soportes o vigas de formas rígidas, los ingenieros derivaron hábilmente las relaciones de rigidez por la aproximación física directa. De estas matrices de rigidez, fueron resumidas las características de rigidez de la estructura completa. Esta aproximación es conocida como el *método directo de rigidez*. En los años cincuenta fue desarrollada una extensión de este método por Turner y sus colaboradores para estructuras más complejas de la industria aeroespacial.

La aproximación desarrollada en los cincuenta para derivar matrices de rigidez de elementos estructurales, contiene los pasos básicos que aún son validos. Por supuesto,

en el transcurso de los años, la aproximación ha sido generalizada volviéndose más sofisticada y con un mayor alcance.

Existen seis pasos esenciales en la derivación en la matriz de rigidez de un elemento estructural [15]:

1. Suponer la forma funcional del campo de desplazamiento dentro de un elemento.
2. Expresar el campo desplazamiento en términos de los desplazamientos definidos en los nodos.
3. Introducir las ecuaciones de deformación-desplazamiento y con esto determinar el estado de deformación del elemento correspondiente al campo de desplazamiento adjudicado.
4. Escribir las ecuaciones constitutivas relacionando el esfuerzo y la deformación y con esto introducir la influencia de las propiedades del material del elemento.
5. Escribir las ecuaciones de equilibrio del elemento para establecer las relaciones entre el desplazamiento nodal y las fuerzas nodales.
6. Combinar los resultados de los pasos 1 al 5 y algebraicamente derivar la matriz de rigidez del elemento.

4.3.2.3 Ensamble de las partes.

Al encontrar las ecuaciones algebraicas necesarias que describen las características de cada elemento del sistema, el siguiente paso del método del elemento finito es combinar todas estas ecuaciones para formar un juego completo que gobierne el compuesto de elementos. El procedimiento de la construcción del sistema de ecuaciones de las ecuaciones de los elementos es la misma e indiferente del tipo de problema considerado o la complejidad del sistema de elementos.

El sistema del procedimiento de ensamble esta basado en la insistencia de la compatibilidad de los nodos del elemento. En los nodos donde los elementos son conectados el valor (valores) de la variable nodal desconocida (o variables) es (son) el

mismo de todos los elementos conectados en el nodo. La consecuencia de esta regla es la base del procedimiento de ensamble.

El procedimiento general esta resumido en los siguientes pasos [15]:

1. Establecer las matrices nulas $n \times n$ y $n \times 1$, donde n es el número de variables del sistema nodal.
2. Comenzar con un elemento, transformando las ecuaciones del elemento de coordenadas locales a globales si estos dos sistemas de coordenada no son coincidentes.
3. Llevar a cabo cualquier operación matricial necesaria en la matriz del elemento.
4. Utilizar el establecimiento correspondiente entre esquemas numerados locales y globales, cambiando los índices globales: (a) los subíndices de los coeficientes en la matriz cuadrada y (b) el subíndice de los términos en la matriz columna.
5. Introducir estos términos dentro de las correspondientes matrices maestras $n \times n$ y $n \times 1$ en la localización designada por sus índices. En cada tiempo un término es situado en una locación donde otro término se ha colocado ya, esto se añade para cualquier valor que se encuentre ahí.
6. Volver al paso 2 y repetir este procedimiento de un elemento después de otro hasta que todos los elementos hayan sido tratados. El resultado será una matriz maestra $n \times n$ $[K]$ de coeficientes de rigidez y una matriz columna $n \times 1$ $\{R\}$ del resultado de la acción nodal, el sistema de ecuación completo esta entonces:

$$[K] \{x\} = \{R\} \quad (4.13)$$

donde $\{x\}$ es la matriz columna de las incógnitas nodales para el ensamble.

4.3.2.4 Introducción de las condiciones frontera.

Indiferente al tipo de problema para el cual un sistema de ecuaciones establecido ha sido ensamblado, las ecuaciones finales deben tener la forma de la ecuación 4.13. Estas ecuaciones ya toman en cuenta las condiciones frontera involucrando las acciones

externas específicas o aplicadas en los nodos, debido a que se encuentran incluidas en el vector resultante $\{R\}$ durante el ensamble.

Existen varios modos para aplicar las condiciones frontera a la ecuación 4.13, y cuando estos son aplicados, el número de incógnitas nodales y el número de ecuaciones se resuelve y se reduce efectivamente. Dos formas claras para lograr esto se describen a continuación [15].

Una de las formas de incluir las variables nodales prescritas en la ecuación 4.13 manteniendo el sistema de ecuaciones $n \times n$ es modificando las matrices $[K]$ y $\{R\}$, de la manera siguiente [15]:

- Considerando que i es el subíndice de una variable nodal prescrita, las filas y las columnas i de la matriz $[K]$ se designan igual a cero y el término k_{ii} se establece igual a la unidad.
- El término R_i del vector columna $\{R\}$ es reemplazado por el valor desconocido de x_i .
- Cada uno de los términos restantes $n-1$ de $\{R\}$ es modificado por la substracción del valor de la variables nodal prescrita multiplicado por el término correcto de la columna de la matriz original $[K]$.
- Este proceso se repite para cada x_i , hasta que todas sean abarcadas.

Para ilustrar este proceso de introducir las condiciones frontera, se considera un ejemplo simple con únicamente 4 sistemas de ecuaciones. La ecuación 4.13 se expande de la forma,

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

Suponiendo para este sistema hipotético que las variables nodales x_1 y x_2 son especificadas como

$$x_1 = \beta_1 \quad x_2 = \beta \quad (4.15)$$

Cuando las condiciones frontera son establecidas, las ecuaciones se toman de la forma

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 & k_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & k_{42} & 0 & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ R_2 - k_{21}\beta - k_{23}\beta_1 \\ \beta \\ R_4 - k_{41}\beta - k_{43}\beta_1 \end{Bmatrix} \quad (4.16)$$

Este juego de ecuaciones unilaterales en dimensión, es nuevamente ejecutado para ser resuelta para todas las variables nodales.

La otra forma para implementar las variables nodales dentro del sistema de ecuaciones es modificando los términos del diagonal central de la matriz $[K]$. El término diagonal de $[K]$ asociado con una variable nodal específica es multiplicado por un número grande, como por ejemplo 1×10^{15} , mientras que el término correspondiente en $\{R\}$ es reemplazado por la variable nodal específica, multiplicado por el mismo factor grande con el correspondiente término diagonal. Este proceso se repite hasta que todas las variables nodales prescritas sean comprendidas.

Efectivamente este proceso hace a los términos de la matriz $[K]$ muy pequeños sin modificarlos en comparación a los términos modificados. Antes de modificar, se tiene que hacer un procedimiento con solución de simultáneas del juego completo de las ecuaciones.

Utilizando este procedimiento para modificar las ecuaciones originales del ejemplo de la forma anterior, se obtiene.

$$\begin{bmatrix} k_{11} \times 10^{15} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \times 10^{15} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_1 k_{11} \times 10^{15} \\ R_2 \\ \beta_3 k_{33} \times 10^{15} \\ R_4 \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

Para observar que este procedimiento da el resultado deseado considere la primera ecuación del juego

$$k_1 \times 10^5 x + k_2 x + k_3 x + k_4 x - \beta \times k_1 \times 10^{15} \quad (4.18)$$

Por propósito práctico esta ecuación expresa el hecho de que

$$x = \beta \quad (4.19)$$

desde.

$$k_j \times 10^{15} \gg k_j \quad j = 2, 3, 4 \quad (4.20)$$

Computacionalmente el segundo método es más sencillo que el primero. Pero ambos métodos preservan las propiedades simétricas de la matriz maestra original.

4.3.3 Aproximación matemática del método elemento finito.

Para establecer los pasos de la introducción de los conceptos matemáticos, comenzaremos con una breve explicación de los problemas continuos y se establecerá la terminología y definiciones necesarias para mostrar como problemas variacionales y de elemento finito son relacionados.

Las bases variacionales del método de elemento finito, dictan el criterio para ser satisfechas por las funciones que aproximan la solución dentro del elemento, y permite hacer afirmaciones acerca de la convergencia de los resultados utilizando un número de incrementos más y más pequeño [15].

4.3.3.1 Problemas continuos y sus soluciones.

Los problemas en la ingeniería y en la ciencia caen dentro de dos categorías fundamentales, dependiendo del punto de vista que se adopte. Uno de los puntos de vista señala que toda la materia consta de partículas discretas manteniendo su identidad y naturaleza, así como su movimiento en el espacio. Su posición en cualquier instante está dado por coordenadas en algún sistema de referencia, y estas coordenadas son funciones

del tiempo (la única variable independiente de cualquier proceso). Este punto de vista, conocido como el punto de vista de un *cuerpo rígido* es la base de los mecanismos de partículas Newtonianos.

El otro punto de vista, proviene del continuo en lugar de la discretización molecular ó de partículas. acercándose más a la naturaleza. Bajo el punto de vista continuo se dice que todos los cuerpos de interes son continuos en todos los puntos del espacio, en la magnitud de que todas las cantidades del campo describan el estado del cuerpo, siendo este capaz de diferenciarse en las variables independientes del continuo, espacio y tiempo.

Los problemas continuos son tomados de los fenómenos de la naturaleza, que son caracterizados aproximadamente por ecuaciones diferenciales parciales y sus condiciones frontera.

Los problemas continuos son denominados en la física matemática como problemas de valor frontera, ya que su solución es buscada en un dominio definido por una frontera dada en la cual ciertas condiciones llamadas condiciones frontera están especificadas, a excepción de los problemas de cuerpo libre, donde la forma y localización de la frontera son desconocida.

La frontera puede ser definida por una curva o una superficie en el espacio dimensional n . y el dominio puede ser finito o infinito, dependiendo del extremo de la frontera. La frontera es llamada *cerrada*, si las condiciones que afectan la solución del problema son descritas en cualquier lugar de la frontera, y se le denomina *abierta*, si parte de la frontera se extiende hacia el infinito y las condiciones frontera en esta parte, no son especificadas [15].

Las claves para resolver problemas continuos son usualmente formuladas en términos generales como se muestra a continuación. Considerando algún dominio Ω

limitado por una superficie Γ . Permitiendo a ϕ ser una función escalar en el interior de Ω , tal que la conducta de ϕ en cualquier punto de Ω , es dada por

$$A(\phi) - f = 0 \quad (4.21)$$

donde f es una función escalar conocida de las variables independientes y A es un operador diferencial lineal o no lineal [3].

Asumiendo que los parámetros físicos del operador diferencial son constantes conocidas o funciones conocidas. Un ejemplo de un operador diferencial es

$$A(\phi) = \frac{\partial(\phi)}{\partial x} \quad (4.22)$$

En n dimensiones operadores diferenciales de segundo orden pueden ser abreviadas, por una transformación satisfactoria, de la forma

$$A(\phi) = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial^2(\phi)}{\partial^2 x_i^2} + \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial(\phi)}{\partial x_i} + c(\phi) + d \quad (4.23)$$

donde los coeficientes a_i , b_i , c y el término d pueden ser funciones. El operador dado en la ecuación 4.23 es lineal, si a_i , b_i , c y d son funciones únicas de las variables independientes $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ y casi lineal, si a_i , b_i , c y d son funciones de x_i y el parámetro dependiente. Un operador es lineal si y solo si

$$A(\alpha f + \beta g) = \alpha A(f) + \beta A(g) \quad (4.24)$$

donde, α y β son escalares.

Existen un número de aproximaciones para la solución de problemas de valor frontera lineales y no lineales y van de completamente analíticos a completamente numéricos. De estos, los siguientes son los más importantes [15]:

- I. Integración directa (soluciones exactas).
 - a) Separación de variables.
 - b) Soluciones por similitud.
 - c) Transformadas de Fourier y de Laplace.

II. Soluciones aproximadas (soluciones numéricas).

- a) Perturbación.
- b) Series de potencia.
- c) Esquemas de probabilidad.
- d) Método de residuos ponderados (MWR).
- e) Método de Ritz.
- f) Técnicas de diferencias finitas.
- g) Método del elemento finito.

De pocos problemas es posible obtener una solución por integración directa de la ecuación diferencial, además de que la mayoría de los problemas con solución exacta ya han sido resueltos.

Los métodos de perturbación regular y singular son aplicables principalmente cuando los términos no lineales de la ecuación son pequeños en comparación a los términos lineales, siendo su uso limitado.

El método de series de potencia es robusto y es empleado con éxito, pero debido a que requiere de la generación de un coeficiente para cada término de la serie, este se vuelve realmente tedioso. Aunque el método tenga cierta dificultad, no es imposible demostrar que la serie converge.

Los métodos de Monte Carlo son utilizados para obtener una estimación estática de la cantidad deseada por una muestra aleatoria. Estos métodos funcionan mejor cuando la cantidad deseada es un parámetro estático y la muestra es dada de una población selectiva.

Con la ventaja de las computadoras se ha llegado a un entendimiento correcto de los métodos obtenidos por una solución aproximada de alta precisión, como lo son el método de residuos ponderados, y el método variacional.

4.3.3.2 La aproximación variacional

En la clásica formulación variacional, el problema es encontrar la función desconocida o funciones que exagerasen (minimizan o maximizan) o hacen estacionaria un funcional o un sistema de funcionales sujeto a las mismas condiciones frontera especificadas. Las dos formulaciones son equivalentes porque las funciones y sus condiciones frontera extremas, satisfacen al sistema de ecuaciones diferenciales. Esta equivalencia es aparente del cálculo de variaciones, la cual muestra que los funcionales son extremos o hechos estacionarios cuando uno o más ecuaciones de Euler y sus condiciones frontera son especificadas. Y estas ecuaciones son precisamente las ecuaciones diferenciales gobernantes del problema.

La formulación clásica variacional de problemas continuos tiene algunas ventajas sobre la formulación diferencial [15]:

1. El funcional, la cual puede representar alguna cantidad física en el problema, con derivadas de bajo orden del operador diferencial y consecuentemente una solución aproximada, puede buscarse entre una larga clase de funciones.
2. El problema posee formulaciones variacionales recíprocas, esto es, un funcional es minimizado y otro funcional de forma diferente es maximizado.
3. La formulación variacional conduce a tratar condiciones frontera muy complicadas como condiciones frontera naturales.
4. Desde un punto de vista netamente matemático, la formulación matemática es de gran ayuda, ya que con los cálculos de variaciones, esta puede ser utilizada para probar la existencia de la solución.

Los métodos variacionales son los más antiguos medios de obtención de soluciones de problemas en la física e ingeniería [15].

4.3.3.3 Método de Ritz.

El método de Ritz emplea la formulación variacional, comienza por asumir la forma de una solución desconocida en términos de funciones conocidas (funciones de prueba) con parámetros ajustables desconocidos. De la clase de funciones de prueba se selecciona la función que da el funcional estacionario. El proceso consiste de la sustitución de las funciones de prueba dentro del funcional y de este modo expresando el funcional en parámetros ajustables, los cuales son desconocidos. El funcional es después diferenciado con respecto a cada parámetro y la ecuación resultante es fijada en cero. Si estos son n parámetros desconocidos, entonces estos deberán ser n ecuaciones simultáneas para ser resueltas de acuerdo a los parámetros [15].

El método del elemento finito y el método de Ritz son esencialmente equivalentes, cada uno de estos métodos utiliza funciones de prueba como punto de inicio, para obtener una solución aproximada; ambos métodos adquieren combinaciones lineales de la clase de funciones que hacen una función dada satisfactoria. La mayor diferencia entre estos métodos es que las funciones de prueba en el método del elemento finito no están definidas sobre el campo del dominio de la solución, teniendo unas condiciones de frontera no satisfechas, pero con ciertas condiciones de continuidad.

El método del elemento finito es en esencia el método de Ritz aplicado en discretizar dominios locales, los cuales son realmente sencillos en contraste al los de dominio global. Por imposición, ciertos requerimientos de continuidad en las fronteras del dominio local discreto, pueden ser ensamblados dentro de un dominio global más complejo. Estos dominios discretos son conocidos como elementos, de aquí el nombre del método. Desde un punto de vista matemático, el método del elemento finito es un caso especial del método de Ritz, solo cuando las funciones de prueba de la pieza (piecewise) obedecen a otras condiciones de continuidad y complementarias [15].

4.3.3.4 Método de residuos ponderados.

El método de residuos ponderados (MWR) es una técnica global para obtener soluciones aproximadas para ecuaciones diferenciales parciales lineales y no-lineales. Aplicar este método involucra básicamente dos pasos. El primer paso está en suponer el comportamiento del funcional general del campo variable dependiente, de alguna manera tal que satisfaga la ecuación diferencial dada y las condiciones frontera. La sustitución de esta función aproximada dentro de la ecuación diferencial y las condiciones frontera resulta en un error denominado *residual*. Este residual se requiere para eliminar, en algún sentido, el porcentaje sobre el dominio de la solución entera.

El segundo paso es resolver las ecuación (o ecuaciones) resultantes del primer paso y así dominar el funcional general en una función particular, la cual se convierte en la solución aproximada buscada.

Existen una variedad de técnicas de residuos ponderados debido a las opciones de funciones ponderadas o a los principios de distribución de error que se utilizan. El principio de distribución de error más utilizado para derivar ecuaciones de elemento finito es conocido como el *método Galerkin* [15].

CAPITULO 5

DEFORMACION PLASTICA

5.1 Introducción.

Cuando un material se tensa por debajo de su límite elástico la deformación resultante es temporal, también llamada deformación elástica [16]. La deformación plástica se presenta cuando el material es deformado hasta el extremo de no poder recuperar completamente sus dimensiones originales. Durante la deformación plástica, los átomos del material son desplazados permanentemente de sus posiciones originales y toman nuevas posiciones. La deformación plástica puede tener lugar por deslizamiento, por maclaje o mediante una combinación de ambos procesos [16]. La capacidad de algunos materiales de sufrir deformación plástica en gran extensión sin sufrir fractura, es una de las propiedades más útiles para la ingeniería [1]. Todas las operaciones de formado, como troquelado, prensado, hilado, laminado, forjado, estirado y extrusión, se relacionan con la deformación plástica de los metales. Varias operaciones de maquinado, como fresado, torneado, corte por sierra y punzado, también están relacionadas con ésta. El comportamiento de un metal cuando se deforma plásticamente y el mecanismo mediante el cual ocurre son de interés esencial para perfeccionar la operación de trabajado [16].

Se puede obtener mucha información del mecanismo de deformación plástica al estudiar el comportamiento de un monocristal sujeto a esfuerzo y aplicando más tarde este conocimiento a un material policristalino.

5.2 Deformación plástica en monocristales.

Posteriormente al descubrimiento de la difracción por rayos X de cristales metálicos por Von Laue [17] en 1912 y la obtención de que esos metales se formaban principalmente de átomos arreglados en redes geométricas específicas, se han realizado gran cantidad de investigaciones en las relaciones entre estructura atómica y el comportamiento plástico de los metales. Mucho del trabajo fundamental en la deformación plástica de los metales ha sido llevado a cabo con especímenes monocristalinos, con el fin de eliminar los complejos efectos de las fronteras de grano y la resistencia impuesta por los granos vecinos y partículas de segunda fase [17].

5.2.1 Deformación por deslizamiento.

El método usual de la deformación plástica en los metales es por el deslizamiento de los defectos lineales, llamados dislocaciones, a lo largo de planos cristalográficos definidos, denominados *planos de deslizamiento* [17]. La Figura 5.1 ilustra la idea clásica del deslizamiento. En la Figura 5.1a, un esfuerzo cortante es aplicado a un metal cúbico con la superficie superior pulida. El deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante excede un valor crítico. Los átomos se mueven a lo largo del plano de deslizamiento, y un paso se produce en la superficie pulida (Figura 5.1b). Cuando se observa la superficie pulida en el microscopio, el paso se muestra como una línea, la cual se denomina *línea de deslizamiento*. Si la superficie es vuelta a pulir, el paso es eliminado y la línea de deslizamiento desaparece (Figura 5.1c).

Debido a la simetría translacional de la red cristalina, la estructura cristalina es perfectamente restablecida después del deslizamiento producido, siempre y cuando la deformación sea uniforme. Cada átomo en la parte deslizada del cristal avanza el mismo número integral de espacios de la red. Las líneas de deslizamiento son causadas por cambios en la elevación de la superficie y la superficie debe ser debidamente preparada, para la observación en microscopio posterior a la deformación.

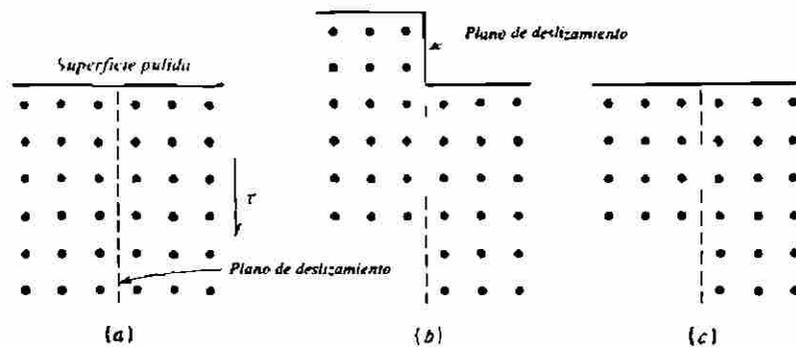


Figura 5.1 Dibujo esquemático de la idea clásica del deslizamiento [17].

El hecho de que un monocristal permanezca siéndolo después de la deformación plástica homogénea impone limitaciones en la forma en la cual la deformación plástica sucede. El deslizamiento se lleva a cabo más prontamente en direcciones específicas en ciertos planos cristalográficos. Generalmente el plano de deslizamiento es el plano de mayor densidad atómica (Tabla 5.1) y la dirección del desplazamiento es la dirección de empaquetamiento dentro del plano de deslizamiento. De los planos de mayor densidad atómica, están también los planos más ampliamente espaciados en la estructura cristalina, la resistencia al desplazamiento es generalmente menor para estos planos, que para cualquier otro juego de planos. El plano de deslizamiento junto con la dirección del desplazamiento establecen el *sistema de deslizamiento* [17].

Tabla 5.1 Densidad atómica de planos de bajo índice [17].

Estructura cristalina	Plano	Densidad atómica (Átomo por unidad de área)	Distancia entre planos
Cúbica centrada en las caras	Octaédrico {111}	$4\sqrt{3}a_0^2$	$a_0\sqrt{3}$
	Cúbico {100}	$2a^2$	$a/2$
	Dodecaédrico {110}	$2\sqrt{2}a^2$	$a/2\sqrt{2}$
Cúbica centrada en el cuerpo	Dodecaédrico {110}	$2\sqrt{2}a^2$	$a/\sqrt{2}$
	Cúbico {100}	$1a^2$	$a/2$
	Octaédrico {111}	$1\sqrt{3}a^2$	$a/2\sqrt{3}$
Hexagonal compacta	Basal {0001}	$2\sqrt{3}a^2$	c

En los materiales f.c.c. (cúbica centrada en la cara) hay cuatro conjuntos de planos $\{111\}$ y tres direcciones de empaquetamiento $\langle 110 \rangle$ en cada plano, que hacen un total de doce sistemas posibles de deslizamiento. Estos sistemas de deslizamiento están bien distribuidos en el espacio; por tanto, es casi imposible deformar un cristal f.c.c. y no tener un plano $\{111\}$ en una posición favorable para el deslizamiento. La componente crítica del esfuerzo cortante necesaria para el deslizamiento sería baja (Tabla 5.2) y los metales con este tipo de estructura (plata, oro, cobre, aluminio) se deforman fácilmente [16].

Los metales h.c.p. (hexagonales compactos) entre los que se encuentran el cadmio, magnesio, zinc, cobalto y titanio, tienen solo un plano de alta población atómica, el (0001) también conocido como *plano basal* y tres direcciones $11\bar{2}0$ de empaquetamiento compacto en ese plano. Esta estructura no tiene tantos planos de deslizamiento como la red f.c.c. y la componente crítica del esfuerzo cortante es mayor que para los materiales f.c.c. En tanto que el número de sistemas de deslizamiento es limitado, la deformación por maclaje ayuda a colocar más sistemas de deslizamiento en posición adecuada, con lo cual se aproxima su plasticidad a la de la estructura f.c.c. y sobrepasa la de los metales con b.c.c. [16].

Como los metales b.c.c. (cúbicos centrados en el cuerpo) tienen menos átomos por celda unitaria, no poseen un sistema de deslizamiento bien definido, ni tienen un plano realmente compacto. La dirección del desplazamiento es la de empaquetamiento compacto $\langle 111 \rangle$. Las líneas de deslizamiento en los metales b.c.c. son onduladas e irregulares, haciendo a menudo extremadamente difícil la identificación de un plano de deslizamiento. Todos los planos $\{110\}$, $\{112\}$ y $\{123\}$ se han identificado como de deslizamiento en cristales b.c.c. Los estudios han indicado que cualquier plano que contiene una dirección de empaquetamiento compacto $\langle 111 \rangle$ puede actuar como plano de deslizamiento. En concordancia con la falta de un plano compacto se tiene relativamente un valor grande de la componente crítica del esfuerzo cortante, necesario para el

deslizamiento. Por tanto, los metales b.c.c. como el molibdeno, hierro alfa, tungsteno, no muestran un alto grado de plasticidad [16].

Tabla 5.2 Esfuerzo de corte crítico determinado para diversos metales a temperatura ambiente [16].

Metal	Estructura	Plano de deslizamiento	Dirección de deslizamiento	Componente crítica del esfuerzo cortante (kPa)
Plata	f.c.c.	{111}	110	372.06
Cobre	f.c.c.	{111}	110	489.19
Aluminio	f.c.c.	{111}	110	785.46
Magnesio	h.c.p.	{0001}	1120	440.96
Cobalto	h.c.p.	{0001}	1120	5,614.4
Titanio	h.c.p.	{1010}	1120	13,711.1
Hierro	b.c.c.	{110}	111	27,422.2
Columbio	b.c.c.	{110}	111	33,347.6
Molibdeno	b.c.c.	{110}	111	71,656.0

5.2.2 Deformación por maclaje.

El segundo mecanismo importante, por el cual el metal se deforma es el proceso conocido como *maclaje*. El maclaje resulta cuando una porción del cristal lleva hacia arriba una orientación, que se relaciona con la orientación del resto de la red sin maclaje, en una forma simétrica definida. La porción maclada del cristal es una imagen espejo del cristal principal. El plano de simetría entre las dos porciones es llamado *plano de maclaje* [17].

La Figura 5.2 ilustra la imagen atómica clásica del maclaje. La Figura 5.2a representa una sección perpendicular a la superficie en una red cubica con un plano paralelo de bajo índice al papel y orientado en un ángulo al plano de pulido. El plano de maclaje es perpendicular al papel. Si un esfuerzo cortante es aplicado, el cristal se juntará sobre el plano de maclaje (Figura 5.2b). La región a la derecha del plano de maclaje es la zona sin deformar. A la izquierda de este plano, los planos de átomos sufren corte de tal manera que la red forma una imagen espejo por el plano de maclaje.

En una red simple tal como esta, cada átomo en la region maclada se mueve por un corte homogéneo a una distancia proporcional a su longitud del plano de maclaje. En la Figura 5.2b los círculos huecos representan átomos que no presentan movimiento, los círculos punteados indican los lugares originales de los átomos en la red, la cual cambia de posición, y los círculos sólidos son las posiciones finales de estos átomos en la región maclada.

El maclaje es visible en la superficie pulida por el cambio en la elevación producida por la deformación y por la diferencia en la orientación cristalográfica entre las regiones deformadas y sin deformar [17].

El maclaje difiere del desplazamiento, en algunos aspectos específicos. En el desplazamiento la orientación del cristal sobre y abajo del plano del deslizamiento, es la misma antes y después de la deformación, mientras que en el maclaje resulta en una diferencia de orientación por el plano de maclaje. El deslizamiento usualmente sucede en múltiplos discretos del espacio atómico, durante el maclaje los movimientos atómicos son mucho menos que una distancia atómica. El deslizamiento resulta principalmente en planos relativamente espaciados, pero en la región maclada de un cristal cada plano atómico es involucrado en la deformación [17].

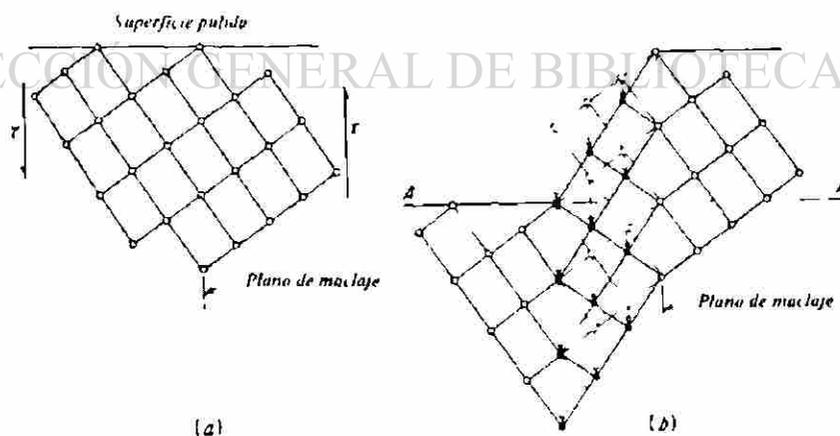


Figura 5.2 Imagen clásica del maclaje [17].

El maclaje puede ser producido por deformación mecánica o como el resultado del temple posterior a la deformación plástica. El primer tipo es conocido como *maclaje mecánico* y el segundo es llamado *maclaje de recocido* [17]. El maclaje mecánico se produce en metales b.c.c. ó h.c.p. bajo condiciones de velocidad alta de carga (carga de choque) y a baja temperatura. Los metales f.c.c. no se deforman por maclaje mecánico, aunque algunas aleaciones oro-plata pueden deformarse fácilmente por este mecanismo a bajas temperaturas. Si el maclaje sucede durante un ensayo de tensión, este produce bordes en la curva esfuerzo-deformación.

El maclaje se lleva a cabo en una aleación definida en un plano cristalográfico específico de cada estructura cristalina. La Tabla 5.3 enlista los planos más comunes de maclaje y sus direcciones. El maclaje no es un mecanismo dominante de deformación, en metales que posean muchos posibles planos de deslizamiento. Mas bien, el maclaje sucede cuando los planos de deslizamiento son restringidos o cuando algunos incrementos del esfuerzo de corte crítico son determinados, así que el esfuerzo de maclaje es mucho menor que el esfuerzo por deslizamiento [17].

Las deformaciones de la red necesarias para producir el maclaje de un cristal son mínimas, de tal forma que la cantidad de deformación acumulada, que se produce por este mecanismo es pequeña. El papel importante del maclaje en la deformación plástica, es el hecho de que la orientación cambia, resultado de que el maclaje puede dar lugar a nuevos sistemas de deslizamiento en una orientación favorable con respecto al eje del esfuerzo, además de que puede dar lugar a desplazamientos adicionales [17]. De esta manera el maclaje es importante en la deformación global de metales con un bajo número de sistemas de deslizamiento, tales como los metales h.c.p. Sin embargo, queda implícito que una fracción pequeña del total del volumen de un cristal es reorientada por maclaje, y por consiguiente, los metales h.c.p. poseen menor ductilidad que los metales con un gran número de sistemas de deslizamiento.

Tabla 5.3 Planos y direcciones de maclaje [17].

Estructura cristalina	Ejemplos típicos	Plano de maclaje	Dirección de maclaje
b.c.c.	Hierro α , Ta	(112)	[111]
h.c.p.	Zn, Cd, Mg, Ti	(1012)	[1011]
f.c.c.	Ag, Au, Cu	(111)	[112]

5.3 Deformación plástica en materiales policristalinos.

En la sección anterior se describió la deformación plástica en monocristales, sin embargo, el material comercial está siempre formado de granos policristalinos cuyos ejes cristalinicos se orientan al azar. Cuando un material policristalino está sujeto a esfuerzo, el deslizamiento empieza primero en aquellos granos en que el sistema de deslizamiento se halla más favorablemente situado con respecto al esfuerzo aplicado [16].

Como se debe mantener un contacto en las fronteras de grano, podría necesitarse la acción de más de un sistema de deslizamiento. La rotación hacia el eje de la tensión coloca a otros granos, al principio menos favorablemente orientados, en una posición donde ahora se puedan deformar. Conforme avanza la deformación y la rotación cada grano tiende a alargarse en la dirección de flujo. Después de cierta cantidad de deformación, la mayoría de los granos tendrán un plano cristalino en particular en la dirección de deformación. El material muestra ahora una *orientación preferente*, lo que resultará en propiedades un poco distintas, dependiendo de la dirección de medición [16].

Un material de grano fino en el que los granos están orientados al azar poseerá propiedades idénticas en todas direcciones, pero un metal con orientación de granos preferente tendrá propiedades direccionales.

No todo el trabajo hecho en la deformación se disipa en forma de calor; más bien, parte de él es almacenado en el cristal como un incremento en energía interna. Como los ejes de granos adyacentes en el cristal están orientados al azar, los planos de

deslizamiento y los de maclaje deben de cambiar de dirección de grano en grano. Esto significa que se realiza más trabajo en las fronteras de grano y que existirá más energía interna en esos puntos.

Cuando un cristal se deforma, hay alguna distorsión de la estructura reticular. La deformación es mayor sobre los planos de deslizamiento y fronteras de grano y aumenta a mayor deformación. Esto se manifiesta con un incremento en resistencia para una deformación posterior. El material sufre endurecimiento por deformación o endurecimiento por trabajo. Uno de los aspectos notorios de la deformación plástica es que el esfuerzo necesario para iniciar el deslizamiento es menor que el requerido para continuar la deformación en planos subsecuentes. Independientemente de la deformación de la estructura reticular, el apilamiento de dislocaciones contra obstáculos (como fronteras de grano y átomos extraños) y la trabazón de dislocaciones en los planos de deslizamiento que se cortan incrementan la resistencia a ulterior deformación.

En realidad, los cristales suelen contener redes complejas de líneas de dislocación interconectadas, al igual que otros defectos e impurezas en la red cristalina. Cuando las dislocaciones se empiezan a mover, sus extremos permanecen ligados a otras partes de la red o a otros defectos. Debido a que los extremos están anclados, los planos de deslizamiento activos nunca pueden librarse de sus dislocaciones de deslizamiento; de hecho, las dislocaciones en el plano se multiplican cuando el plano se desliza. Como la facilidad con que una dislocación se mueve de un lado a otro del plano de deslizamiento es indicación de la ductilidad del material, sugiere que los materiales pueden hacerse más duros si se colocan varios obstáculos en el camino de las dislocaciones. Como las dislocaciones se apilan en las fronteras de grano, los metales pueden, de alguna manera, ser endurecidos, reduciendo el tamaño de los granos.

Una aleación introduce átomos extraños que distorsionan el cristal localmente, alrededor de aquellos, y estas distorsiones locales ofrecen resistencia al movimiento de una dislocación cercana. En el endurecimiento producido por varios procesos de trabajo plástico, como martilleo o laminado, los obstáculos son paradójicamente las propias

dislocaciones. Cuando el número de dislocaciones en el metal trabajado llega a ser suficientemente grande, aquellas que se mueven a lo largo de los planos de deslizamiento que se cortan obstruyen a otras su movimiento, un efecto fácilmente apreciable por quien ha quedado atrapado en un cruce de tráfico denso.

Es importante recordar que siempre que haya distorsión de la estructura reticular, ya sea resultado de deformación plástica, tratamiento térmico o aleación, habrá un incremento en la resistencia y dureza del material [16].

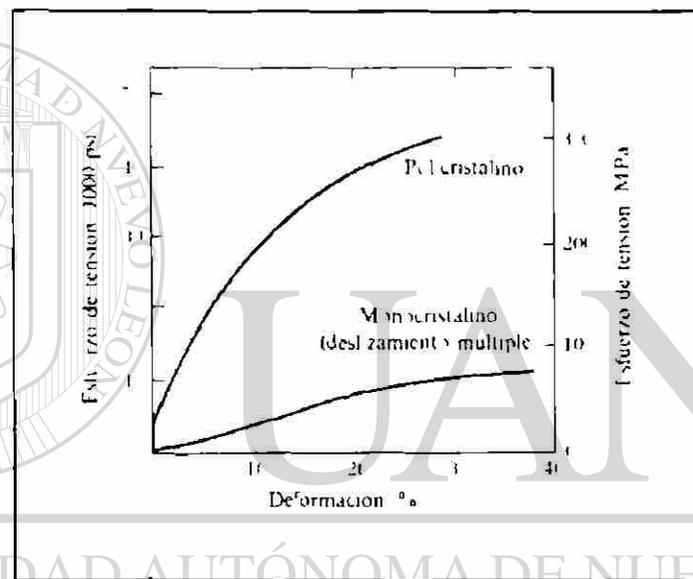


Figura 5.3 Curvas esfuerzo-deformación para cobre monocristalino y policristalino [1].

Los bordes de grano fortalecen a los metales y aleaciones al actuar como barreras contra el movimiento de dislocaciones, excepto a altas temperaturas, donde pasan a ser zonas de debilidad. Para la mayoría de las aplicaciones donde la resistencia es importante, se hace deseable un tamaño de grano fino. La Figura 5.3 compara las curvas esfuerzo deformación para cobre monocristalino y policristalino sin alea a temperatura ambiente. Para todos los esfuerzos, el cobre policristalino es más resistente que el cobre monocristalino [1].

La respuesta plástica de materiales cristalinos es en general anisotrópica y heterogénea, lo cual lleva al desarrollo de texturas de deformación y microestructuras

intergranulares. Pudiendo ser esto la causa de localización o pérdida de ductilidad. Siendo esto importante para el mejor entendimiento de cómo un esfuerzo o deformación aplicado macroscópicamente es acomodado en el nivel local de un grano interactuando con sus vecinos inmediatos [2].

Los granos sencillos son principalmente utilizados para analizar los mecanismos de deformación y los bicristales permiten también el estudio de los efectos de incompatibilidad en los límites de grano, pero para un mejor entendimiento del comportamiento policristalino, esta aproximación es limitada por el hecho de que las condiciones frontera en un volumen macroscópico de un solo cristal puede diferir considerablemente de aquellos impuestos en un grano policristalino. En particular, los efectos de la estructura macroscópica puede aumentar el flujo no uniforme en un solo cristal y bicristales, y por lo tanto el fenómeno de la localización [18].

5.4 Fronteras de grano y deformación.

Las fronteras entre granos en un agregado policristalino son una región de red distorsionada de sólo unos pocos átomos de ancho. En el caso general, la orientación cristalográfica cambia abruptamente al pasar de un grano a otro al deslizarse por la frontera de grano [17].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cuando un monocristal es deformado en tensión, es usualmente libre de deformarse en un solo sistema de deslizamiento para una buena parte de la deformación y de cambiar su orientación por rotación de la red conforme la extensión tiene lugar. Sin embargo, granos individuales en un espécimen policristalino no están sujetos a un sistema de esfuerzo uniaxial único, cuando el espécimen es deformado en tensión. En un policristal, la continuidad debe ser mantenida, de tal forma que las fronteras entre los cristales deformados permanezcan intactos. Si bien cada grano trata de deformarse homogéneamente en conformidad con la deformación del espécimen como un todo, las restricciones impuestas por la continuidad causan considerables diferencia en la deformación entre granos vecinos y dentro de cada grano.

Estudios [17] de la deformación en granos gruesos de aluminio mostraron que la deformación en las vecindades de una frontera de grano usualmente difiere marcadamente de la deformación en el centro del grano. Si bien la deformación es continua a lo largo de las fronteras, habrá un gradiente de deformación en esta región. Conforme el tamaño de grano disminuye y la deformación se incrementa, la deformación se vuelve más homogénea. Debido a las restricciones impuestas por las fronteras de grano el deslizamiento se presenta en varios sistemas, aun a bajas deformaciones. Además, eso provoca que el deslizamiento se presente en planos no compactos en regiones cercanas a las fronteras de grano. El deslizamiento en aluminio policristalino se ha observado en los planos $\{100\}$, $\{110\}$ y $\{113\}$. El hecho de que diferentes sistemas de deslizamiento puedan operar en regiones adyacentes del mismo grano resulta en complejas rotaciones de la red los cuales generan en la formación de bandas de deformación. Debido a que mas sistemas de deslizamiento son usualmente operativos cerca de las fronteras de grano, la dureza usualmente será mayor cerca de la frontera que en el centro del grano. Conforme el diámetro del grano es reducido mas de los efectos de la frontera de grano se experimentaran en el centro del grano. De esta forma, el endurecimiento por deformación de un metal de grano fino será mayor que en un agregado policristalino de grano grueso [17].

Von Mises [17] mostró que para que un cristal presente un cambio general de forma por deslizamiento requiere la operación de cinco sistemas de deslizamiento independientes. Esto resulta del hecho de que una deformación arbitraria es especificada por los seis componentes del tensor de deformación, pero debido al requerimiento de volumen constante ($\Delta V = 0 = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$) hay sólo cinco componentes independientes de deformación. Los cristales que no poseen cinco sistemas independientes de deslizamiento no serán nunca dúctiles en forma policristalina, si bien una pequeña elongación plástica puede ser obtenida si hay maclaje o una orientación preferencial favorable. Los metales cubicos fácilmente satisfacen este requerimiento, lo cual cuenta para su elevada ductilidad general, La estructura hexagonal compacta y otros metales de baja simetría no satisfacen este requerimiento y presentan bajas ductilidades a temperatura ambiente en forma policristalina. El Zn y Mg policristalinos se vuelven

dúctiles a elevada temperatura en las cuales el deslizamiento no basal se vuelve operativo e incrementa el número de sistemas de deslizamiento al menos en cinco.

La inquietud de la continuidad, que llevó modos de deformación más complejas en policristales que para monocristales, condujo a Ashby [17] a sugerir un modelo de dislocaciones para deformación policristalina (Figura 5.4). En el modelo de Ashby, el policristal es deformado desensamblándolo en granos constitutivos y permitiendo que cada uno se deslice de acuerdo a la ley de Schmid (Figura 5.4b). Este proceso genera dislocaciones almacenadas estadísticamente. Sin embargo, esto genera traslapes y huecos entre los granos. Ahora, cada discrepancia es tomada y corregida por la introducción de dislocaciones geométricamente necesarias (Figura 5.4c) hasta que los granos se vuelven a ajustar. El cristal reensamblado se observa en la Figura 5.4d [17].

El deslizamiento de las fronteras de grano se hace más prominente cuando se incrementa la temperatura y se disminuye la velocidad de deformación, como en la termofluencia. La restricción de la deformación a la región de la frontera de grano es una de las fuentes primarias para la fractura a elevada temperatura. Debido a que las impurezas tienden a segregarse en las fronteras de grano, la fractura intergranular es fuertemente influenciada por la composición química [17].

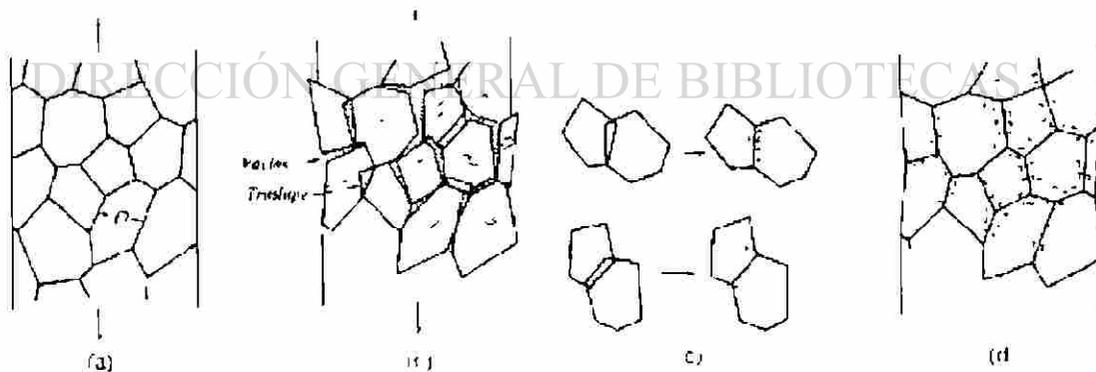


Figura 5.4 Modelo Ashby para deformación de un policristal. (a) El policristal se deforma de una manera macroscópica uniforme, produciendo traslapes, y vacíos en las fronteras (b). Esto puede ser modificado por la introducción de dislocaciones geométricamente necesarias en (c) y (d). Las dislocaciones estáticas no son mostradas [17].

5.5 Endurecimiento por deformación.

La deformación plástica cambia la estructura interna del material, así que es de esperarse que también cambien sus propiedades. Al deformar, el movimiento de las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento y la distorsión de los planos producida por las constricciones adyacentes, modifican la regularidad del patrón cristalino inicialmente presente. Es por esto que con más dificultad ocurre un mayor deslizamiento y la dureza del metal se ve incrementada.

El incremento en dureza que resulta de la deformación plástica se llama *endurecimiento por deformación*. Este incremento de dureza es acompañado de un incremento en la resistencia a la tensión y en la resistencia a la cedencia. Por otro lado, el endurecimiento por deformación reduce la ductilidad de los metales [29].

5.6 Estimación de la deformación equivalente en granos.

Las consideraciones geométricas indican que la deformación de un agregado cristalino se deben a dos factores, al cambio en la forma de grano individual y al movimiento relativo de cada grano como un conjunto anterior de sus vecinos [19].

Rachinger [19] originalmente propuso el método de medición de la deformación de los granos interiores del cambio significativo de la forma del grano, para una aleación de aluminio [19]. El midió el alto (H) de los granos paralelos al eje del esfuerzo y el ancho (W) perpendicular promedio del método de intercepción-lineal y mostró que suponiendo granos equiaxiales (por ejemplo, $H = W$, donde H y W son el alto y el ancho significativo, respectivamente). entonces la deformación convencional (e) de los granos es [20]:

$$e = \frac{H}{W} - 1 \quad (5.1)$$

5.5 Endurecimiento por deformación.

La deformación plástica cambia la estructura interna del material, así que es de esperarse que también cambien sus propiedades. Al deformar, el movimiento de las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento y la distorsión de los planos producida por las constricciones adyacentes, modifican la regularidad del patrón cristalino inicialmente presente. Es por esto que con más dificultad ocurre un mayor deslizamiento y la dureza del metal se ve incrementada.

El incremento en dureza que resulta de la deformación plástica se llama *endurecimiento por deformación*. Este incremento de dureza es acompañado de un incremento en la resistencia a la tensión y en la resistencia a la cedencia. Por otro lado, el endurecimiento por deformación reduce la ductilidad de los metales [29].

5.6 Estimación de la deformación equivalente en granos.

Las consideraciones geométricas indican que la deformación de un agregado cristalino se deben a dos factores, al cambio en la forma de grano individual y al movimiento relativo de cada grano como un conjunto anterior de sus vecinos [19].

Rachinger [19] originalmente propuso el método de medición de la deformación de los granos interiores del cambio significativo de la forma del grano, para una aleación de aluminio [19]. El midió el alto (H) de los granos paralelos al eje del esfuerzo y el ancho (W) perpendicular promedio del método de intercepción-lineal y mostró que suponiendo granos equiaxiales (por ejemplo, $H = W$, donde H y W son el alto y el ancho significativo, respectivamente), entonces la deformación convencional (e) de los granos es [20]:

$$e = \frac{H}{W} - 1 \quad (5.1)$$

Posteriormente, Hensler y Gifkins [21], modificaron esta técnica durante un trabajo en aleaciones de magnesio comerciales donde el método lineal-transversal, no podía ser aplicado debido a la gran variedad de tamaño de grano de sus probetas. El método adoptado fue fotografiar áreas ejemplo en el preparado, probetas seccionadas, y medir granos individuales. Fue conveniente el considerar cada grano, para así medir su máxima longitud y ancho de cada uno, y para derivar una medida individual H/W de cada uno [21]. El valor promedio de H/W fue entonces determinado por métodos estáticos normales y, así, e fue evaluada como sigue [20]:

$$e = \frac{H}{W} - 1 \quad (5.2)$$

Ghomashchi [20], utilizó los principios de las técnicas anteriores para obtener la distribución de la deformación de los granos en un espécimen forjado. Además, Colás [22], también se basó en dichas técnicas para el análisis visioplástico del proceso de trabajado de metales.

5.7 Plasticidad.

La teoría de la plasticidad describe los mecanismos de la deformación en sólidos deformados plásticamente, y cómo se aplica en metales y aleaciones, ésta se basa en estudios experimentales de las relaciones esfuerzo-deformación bajo simples condiciones de carga. La teoría descrita aquí, supone al cuerpo plástico ideal, en el cual el efecto Bauschinger y efectos de tamaño son despreciados. Esta teoría es válida únicamente a temperaturas en las cuales la recuperación, la termofluencia y el fenómeno térmico pueden ser omitidos [23].

5.7.1 Esfuerzo, deformación y velocidad de deformación.

Las cantidades básicas que se pueden utilizar para describir los mecanismos de deformación cuando un cuerpo es sometido a ésta de una proporción a otra bajo una carga externa, son el esfuerzo, la deformación y la velocidad de deformación.

Considerando el ensayo de tensión uniaxial de una probeta circular de longitud inicial l y sección transversal de área A , el espécimen es estirado en la dirección axial por la fuerza P a una longitud l y a una área de la sección transversal A en un tiempo t , como se muestra en la Figura 5.5. La respuesta del material es conocida como curva carga-desplazamiento y posteriormente se convierte en la curva esfuerzo-deformación como se muestra en la Figura 5.5. La deformación se supone homogénea hasta que comienza el encuellamiento.

Existe dos modos para describir la deformación de un medio continuo. Lagrange y Euler, la descripción de Lagrange emplea las coordenadas X_i de una partícula típica en el estado de referencia (o sin deformar) como variables independientes, mientras que la descripción de Euler, las variables independientes son las coordenadas x de un punto del material en el estado deformado. Cuando la deformación es infinitesimal, donde los productos de las derivadas del desplazamiento pueden ser omitidas, no se necesita hacer distinción entre las dos [23]

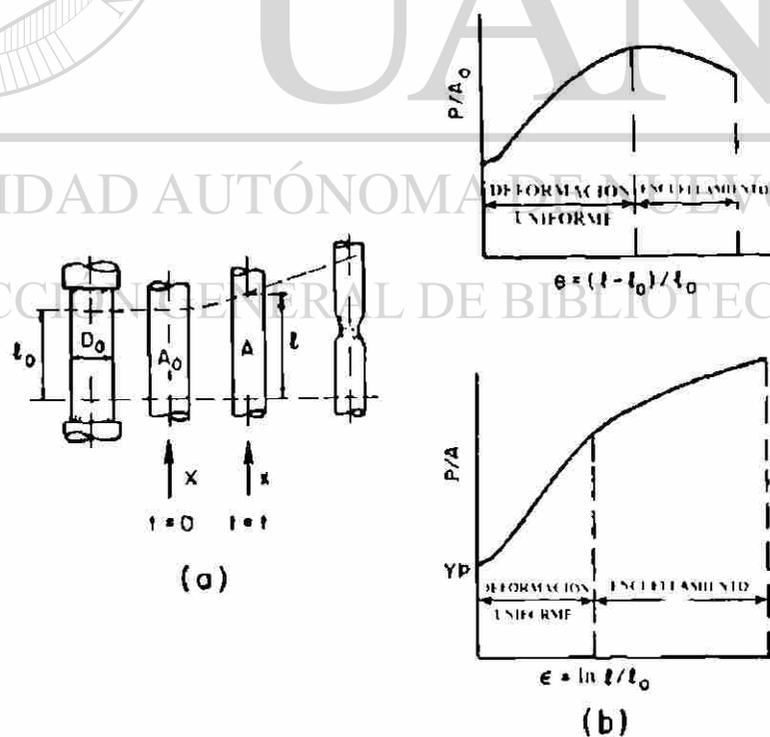


Figura 5.5 Tensión uniaxial. (a) espécimen a tensión y (b) curvas esfuerzo-deformación [23].

En la teoría de la deformación infinitesimal, los esfuerzos y las velocidades de deformación (o deformación infinitesimales) son expresadas con respecto a un sistema coordinado fijo en la porción del material en un tiempo bajo consideración.

En la tensión uniaxial esto está definido por [23],

$$\begin{aligned} \text{esfuerzo } \sigma &= \frac{P}{A} \\ \text{velocidad de deformación } \dot{\varepsilon} &= \frac{\dot{l}}{l} \\ \text{deformación infinitesimal } d\varepsilon &= \frac{dl}{l} \end{aligned} \quad (5.3)$$

donde el punto expresa la derivación del tiempo. El esfuerzo definido en la ecuación 5.3 es llamado esfuerzo real o esfuerzo Cauchy. La cantidad total de la deformación es medida por la integración infinitesimal de la deformación, como [23]

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (5.4)$$

y es llamado deformación logarítmica o natural.

En la relación de Lagrange de deformación finita, las medidas de esfuerzo, deformación y velocidad de deformación son expresadas como sigue,

$$x = \chi(X, t) \quad (5.5)$$

donde X es una posición de referencia de una partícula y t es el tiempo. En tensión uniaxial permite que X se dirija a lo largo del eje longitudinal de la probeta, así

$$x = X + \frac{l - l_0}{l_0} X \quad (5.6)$$

La extensión es definida como el gradiente relativo del desplazamiento para la posición de referencia y es expresada por

$$\frac{\partial(x - X)}{\partial X} = \frac{l - l_0}{l_0} = e \quad (5.7)$$

esto es conocido como la deformación ingenieril.

El componente de la deformación Lagrange E_{11} es definido por

$$E_{11} = \frac{1}{2} \frac{\partial x}{\partial X} \frac{\partial x}{\partial X} - 1 = \frac{1}{2} [(1+e) - 1] = e + \frac{1}{2} e^2 \quad (5.8)$$

Los componentes de la velocidad de deformación son derivados del tiempo de los componentes de deformación dado por las ecuaciones 5.7 y 5.8. Estos son:

$$\dot{e} = \frac{\dot{l}}{l}$$

y

$$E_{11} = \frac{\partial x}{\partial X} \frac{\partial \dot{x}}{\partial X} = (1+e) \dot{e} \quad (5.9)$$

ya que

$$\dot{e} = \frac{\dot{l}}{l} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial t}$$

5.7.2 Criterio de cedencia.

Un criterio de cedencia es una norma para definir el límite de elasticidad bajo cualquier posible combinación de esfuerzos. Esto es expresado por,

$$f(\sigma) = C(\text{constante}) \quad (5.10)$$

donde, la función de esfuerzo $f(\sigma)$ es llamada función de cedencia.

Para materiales isotrópicos, la cedencia plástica depende únicamente de la magnitud de tres esfuerzos principales y no de sus direcciones. Así cualquier criterio de cedencia es expresado de la forma,

$$f(I_1, I_2, I_3) = C \quad (5.11)$$

Del hecho experimental, de que la cedencia del material es, para una primera aproximación, inafectada por una moderada presión hidrostática o tensión, esto nos lleva

a que la cedencia depende únicamente de los principales componentes $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ del tensor de esfuerzos deviatorico

$$\sigma' = \sigma - \delta_m \sigma \quad (5.12)$$

donde, $\delta_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ es el componente hidrostático del esfuerzo y δ_i es la delta de Kronecker. Los componentes principales del tensor deviatorico de esfuerzos no son independientes, así $\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' = 0$ es exactamente cero.

El criterio de cedencia se reduce a la forma,

$$f(J_2, J_3) = C \quad (5.13)$$

donde,

$$J_2 = -(\sigma_1' \sigma_2' + \sigma_2' \sigma_3' + \sigma_3' \sigma_1')$$

$$J_3 = \sigma_1' \sigma_2' \sigma_3'$$

Existen dos criterios que han sido utilizados extensivamente en el análisis de la deformación en metales. El criterio de Tresca [10] (criterio de esfuerzo cortante) dado en 1864.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \text{Constante} \quad (5.14)$$

para $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El otro criterio fue propuesto por Heuber (1904), por Von Mises (1913) y por J. C. Maxwell (1856). Es tradicionalmente llamado criterio de Von Mises o criterio de energía de distorsión [23], este expresa que la cedencia ocurre cuando J_2 alcance un valor crítico, o en otras palabras, que la función de cedencia de la ecuación 5.13 no involucre a J_3 . Este puede ser escrito en diferentes formas

$$J_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2 + \sigma_3'^2) - \frac{1}{2}(\sigma_1' \sigma_2' + \sigma_2' \sigma_3' + \sigma_3' \sigma_1') = k^2 \quad (5.15)$$

o

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \quad (5.16)$$

ó

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2) = 6k^2 \quad (5.17)$$

donde k es un parametro que regula la escala de esfuerzos y depende de las propiedades del material [23].

5.7.3 Relaciones plásticas de esfuerzo-deformación.

Existen dos categorías generales de relaciones plásticas de esfuerzo-deformación. La teoría incremental o de flujo que relaciona los esfuerzos para los incrementos de la deformación plástica y la teoría de deformación o de deformación total que relaciona los esfuerzos a la deformación plástica total. La teoría de deformación simplifica la solución de los problemas de plasticidad, pero las deformaciones plásticas en general, no pueden ser consideradas independientes de la historia de la carga. A continuación se describirán estas dos teorías [17].

Ecuaciones Levy-Mises (Sólido plástico ideal) [17].

Las relaciones entre esfuerzo y deformación de un sólido plástico ideal, donde las deformaciones elásticas son despreciadas, son llamadas reglas de flujo o las ecuaciones Levy-Mises. Si se considera la cedencia bajo tensión uniaxial, entonces $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, y $\sigma_m = \sigma_1/3$. Ya que únicamente el esfuerzo deviatorico causa cedencia

$$\sigma_1' = \sigma - \sigma_m = \frac{2\sigma}{3}; \sigma_2' = \sigma_3' = -\frac{\sigma}{3} \quad (5.18)$$

del cual se obtiene

$$\sigma_1' = 2\sigma_2' = -2\sigma_3' \quad (5.19)$$

De la condición de volumen constante en la deformación plástica

$$d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_2 = -2d\varepsilon_3 \quad (5.20)$$

de manera que

$$\frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon} = -2 \frac{\sigma_2'}{\sigma_1'} \quad (5.21)$$

Esta puede ser la ecuación Levy-Mises generalizada

$$\frac{d\varepsilon}{\sigma} = \frac{d\varepsilon_p}{\sigma_p} = \frac{d\varepsilon_s}{\sigma_s} = d\lambda \quad (5.22)$$

Estas ecuaciones expresan el hecho que en cualquier instante de deformación, la razón de incrementos de la deformación plástica es constante para los esfuerzos activos deviatoricos.

Ecuaciones Prandtl-Reuss (Sólido elástico-plástico) [17].

Las ecuaciones Levy-Mises pueden ser únicamente aplicadas a problemas para grandes deformaciones plásticas, porque ésta desprecia las deformaciones elásticas. Para tratar problema más difíciles en la región elástica-plástica, es necesario considerar ambos componentes de la deformación. Estas ecuaciones fueron propuestas por Prandtl (1925) y Reuss (1930).

El incremento total de la deformación es la suma del aumento de la deformación elástica de^e y del incremento de la deformación plástica $d\varepsilon^p$.

$$d\varepsilon = de^e + d\varepsilon^p \quad (5.23)$$

y el incremento de la deformación elástica esta dado por,

$$de = de = \frac{d\varepsilon_{kk}}{3} \delta + \frac{d\varepsilon_{kk}}{3} \frac{1+\nu}{E} d\sigma + \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta$$

ó

$$de = \frac{1+\nu}{E} d\sigma + \frac{1-2\nu}{E} \frac{d\sigma_{kk}}{3} \delta \quad (5.24)$$

El incremento de la deformación plástica esta dado por las ecuaciones Levy-Mises, las cuales pueden ser escritas como

$$d\varepsilon = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon}{\sigma} \sigma \quad (5.25)$$

Así, las relaciones esfuerzo-deformación de un sólido elástico-plástico son dadas por

$$d\varepsilon = \frac{1+\nu}{E} d\sigma + \frac{1-2\nu}{E} \frac{d\sigma}{3} \delta + \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon}{\sigma} \sigma \quad (5.26)$$

Las ecuaciones Levy-Mises y Prandtl-Reuss proveen relaciones entre los incrementos de la deformación plástica y el esfuerzo. El problema básico es calcular el siguiente incremento de la deformación plástica de un estado dado de esfuerzos cuando las cargas son aumentadas. Si todos los incrementos de deformación son conocidos, entonces la deformación plástica total es simplemente determinada por la sumatoria. Aunque la naturaleza incremental de las soluciones para plasticidad en el pasado, ha resultado en mucho trabajo y aplicación poco frecuente de técnicas disponibles, el extenso uso correcto de las computadoras digitales y el análisis de elemento finito pueden hacer el análisis de plasticidad de problemas ingenieriles más frecuente [17].

5.7.4 Viscoplasticidad.

La teoría matemática de la plasticidad describe adecuadamente el aspecto independiente del tiempo en el comportamiento de los materiales, pero no es adecuada para el análisis del comportamiento dependiente del tiempo. Una aproximación para alcanzar una formulación satisfactoria tiempo-dependiente ha sido generalizar la plasticidad para casos sin el intervalo velocidad de deformación-sensitividad. Una generalización ha sido proporcionada por la teoría de la viscoplasticidad. La historia de esta teoría comienza cerca de 1922. Desde entonces, generalizaciones de versiones anteriores han sido obtenidas y varias formas de la teoría de la viscoplasticidad han sido dadas (Perzyna y Cristescu). En esta sección, se describe una aproximación para la construcción de ecuaciones para materiales rígidos viscoplásticos [23].

Estas están basadas en el trabajo de Perzyna [23]. Se considera un material rígido viscoplástico y aplicando la teoría infinitesimal a cada incremento de deformación. Perzyna introduce una función $F(\sigma)$, tal que

$$F(\sigma) = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{2} \right) \{ \sigma \sigma \} \quad (5.27)$$

donde k es el esfuerzo de cedencia estatico de corte. Considerando $F(\sigma)$, como la función similar para el potencial plástico en la teoría de la plasticidad, la ecuación constitutiva es expresada como,

$$\dot{\varepsilon} = \gamma'' \phi(F) \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (5.28)$$

donde γ'' es una constante de viscosidad del material, y $\phi(F)$ es una función de F , tal que

$$\phi(F) = \begin{cases} 0 & \text{para } F \leq 0 \\ \phi(F), & \text{para } F > 0 \end{cases}$$

Entonces

$$\dot{\varepsilon} = \gamma'' \phi \left(\frac{\delta}{Y} \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma} \right) \right) \quad (5.29)$$

donde, $\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)^2}$, así que σ es igual a el esfuerzo de cedencia en tensión uniaxial, $Y = 3k$ es el esfuerzo de cedencia estático en tensión.

Elevando ambos lados de la ecuación 5.29,

$$\dot{\varepsilon} = \gamma'' \left(\frac{\delta}{Y} \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma} \right) \right)^2 \frac{\sigma}{\sigma}$$

y usando $\dot{\varepsilon} = \frac{2}{3} \left(\frac{\dot{\sigma}_1}{\sigma} \right)$, se obtiene

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2}{3} \gamma'' \left(\frac{\delta}{Y} - 1 \right) \quad (5.30)$$

De las ecuaciones 5.29 y 5.30, la ecuación constitutiva se vuelve

$$\dot{\varepsilon} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \sigma \quad (5.31)$$

con $\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)^2}$ y $\dot{\varepsilon} = \frac{2}{3} \left(\frac{\dot{\sigma}_1}{\sigma} \right)$.

La ecuación 5.31 es idéntica a la ecuación Levy-Mises. El esfuerzo real σ en la ecuación 5.31, sin embargo, depende de la velocidad de deformación sujeta a la función ϕ , la cual es determinada por las propiedades del material bajo consideración. Si se escoge la función $\phi = ((\sigma / Y) - 1)^m$, entonces

$$\sigma = Y \left[1 + \dot{\epsilon} \gamma \right] \quad (5.32)$$

de la ecuación 5.31. La ecuación 5.32 está relacionada con la ley de velocidad-dependencia y el exponente m es el índice de sensibilidad deformación-velocidad.

5.8 Simulación por elemento finito del comportamiento plástico.

El uso del elemento finito en la plasticidad cristalina ha ido en aumento con el crecimiento del poder computacional del promedio de estaciones de trabajo. Anteriormente, los modelos de plasticidad cristalina no se dirigían hacia la interacción entre granos y esta era tomada como un promedio. Los modelos de Taylor utilizan argumentos basados en la forma del grano y en sus esquemas consistentes colocando el grano en interacción con un continuo, el equivalente a un medio homogéneo. Esta aproximación es justificada ya que la propuesta de estos modelos es la predicción de propiedades macroscópicas tales como la textura de la deformación y la respuesta mecánica global [2].

En un inicio Ohashi y Havlicek et. al. emplearon las técnicas de elemento finito para evaluar el estado de esfuerzos y deformación en bi y tricristales [2].

Meric y colaboradores en 1994 [18] emplearon el MEF en un modelo basado en la teoría del desplazamiento para el comportamiento cíclico de bicristales de cobre. Este modelo se aplicó en dos bicristales sujetos a ensayos tensión-compresión uniaxial, para predecir la distribución espacial del esfuerzo y deformación y la correspondiente

actividad de los sistemas de deslizamiento favorables, obteniendo buena representación del comportamiento de un bicristal de cobre.

Becker y Panchanadeswaran en 1995 [24] compararon las predicciones de las simulaciones detalladas de deformación en policristal con la experimentación. La simulación modela una pequeña región de una muestra de un aluminio comercialmente puro en condición de vaciado con un contenido aproximado de 0.08% Si y 0.15% Fe con granos equiaxiales de un tamaño promedio de 300 μm examinada experimentalmente por Panchanadeswaran et. al., la pieza fue caracterizada cuidadosamente antes y después de pruebas de compresión en deformación plana. La forma inicial y la orientación de la red de los granos en una de las caras del dado fueron utilizadas en el modelo. Las mediciones de deformación en esta región fueron empleadas en la simulación. Los resultados de este estudio fueron útiles en la evaluación de la importancia relativa del cumplimiento de la compatibilidad y las restricciones de equilibrio en modelos policristalinos y en la comprensión de cómo la interacción de granos afecta la evolución de la textura.

Delaire y colaboradores en el 2000 [2], presentaron un artículo en cual intentaron calcular mediante técnicas de EF los campos completos de esfuerzo y deformación en agregados con un número pequeño de granos y aplicar la simulación numérica al caso de un multicristal de cobre. La originalidad de la aproximación presentada, fue desarrollar la simulación de un agregado hecho de una sola capa de granos y la realización de la fase experimental en la misma muestra. Aun más, la modelación utiliza el marco de trabajo de grandes deformaciones y considera la reorientación del material cristalino paso a paso con una regla de endurecimiento físicamente motivada basada en la evolución de la densidad de dislocaciones, de tal forma que la matriz de endurecimiento no es constante pero es recalculada y actualizada en cada paso.

CAPITULO 6

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

6.1 Introducción.

Como se mencionó anteriormente, la finalidad de este trabajo es evaluar la técnica de simulación por elemento finito como herramienta en el conocimiento del comportamiento plástico, aunque en este trabajo solo se refiere a la deformación y al esfuerzo, se sentará un precedente para posteriores investigaciones. Para lograr esto, se desarrolló una metodología la cual se describe en las secciones subsecuentes.

6.2 Selección de material.

La selección de material se llevo a cabo considerando dos parámetros importantes:

- a) El espesor debía de ser lo suficientemente pequeño (algunos autores manejan espesores menores o iguales a 3 mm) [2, 18], para asegurar una relación con respecto al ancho y al largo de la probeta menor o igual a un 10 %, para poder considerar al modelo solamente en dos dimensiones.
- b) Los granos de la superficie del material tenían que ser un tamaño tal que se observaran a simple vista, para facilitar la medición de la deformación equivalente y crear la geometría a simular.

De acuerdo a lo anterior se decidió analizar un acero de bajo carbono galvanizado, el cual fue proporcionado por la empresa GALVAK S.A. de C.V. Este material cumplía

con los 2 requisitos: espesor pequeño de 0.55 mm que comparado con el ancho (12 mm) y el largo (60 mm) asegura la relación menor o igual a 10 %, y visibilidad de los granos superficiales, ya que el recubrimiento de zinc es del tipo clásico de flor gruesa que permite observar sus granos a simple vista. Aunque se trata de un material con interfase entre el acero y el zinc, sólo se analizó la parte superficial, es decir se considera una sola capa de granos (el porque de esta consideración se explicará al conocer el espesor del recubrimiento)

Además, como no se contaba con los datos de composición química del acero y el espesor del recubrimiento de zinc, se efectuaron un análisis químico al acero y microscopía electrónica de barrido para determinar el espesor del recubrimiento.

6.3 Preparación de muestras.

Ya que las muestras utilizadas en esta investigación serán sometidas a un ensayo de tensión axial, se prepararon de acuerdo a la norma ASTM E-8 [25] para probetas planas (Figura 6.1). Dentro de la distancia entre marcas, la cual es de 60 mm, se grabó una milimalla cuadrada de 2 mm x 2 mm con una navaja de bisturí, con el propósito de medir la deformación obtenida durante el ensayo. En la Figura 6.2 se muestra una probeta milimallada.

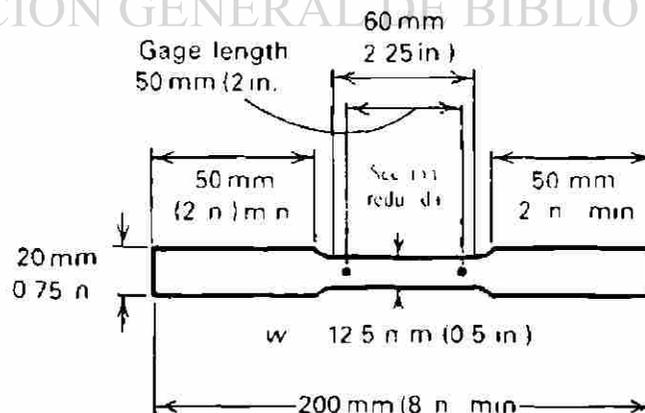


Figura 6.1 Geometría de las probetas de acuerdo a la norma ASTM E-8 para probetas planas [25].

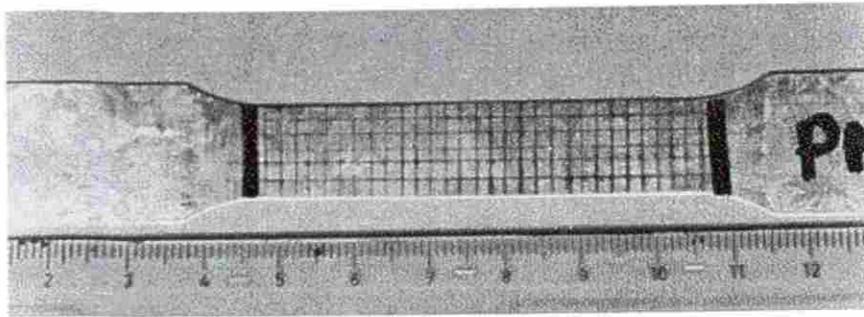


Figura 6.2 Fotografía de la muestra preparada con la milimalla de 2mm x 2mm.

Además, para definir mejor la forma y el tamaño de los granos, las probetas fueron sometidas a un ataque químico de ácido clorhídrico al 8 %, cuidando no dañar la superficie (véase Figura 6.3).



Figura 6.3 Imagen de la muestra preparada con la milimalla de 2mm x 2mm y atacada químicamente con HCl al 8%.

6.4 Ensayo de tensión.

Las probetas fueron sometidas a un ensayo de tensión axial con interrupciones en intervalos de tiempo definidos. Para poder definir estos intervalos, se realizaron pruebas exploratorias a 5 probetas con la finalidad de observar y obtener sus propiedades mecánicas y comportamiento durante la deformación y obtener los valores de elongación y esfuerzo a la ruptura. Además, se efectuó una prueba a una probeta mallada y atacada químicamente para descartar algún cambio en las propiedades mecánicas, debido a estos dos procesos.

En la Tabla 6.1 se indica los tiempos definidos a los cuales se detuvo la máquina para medir la deformación en las probetas, es importante señalar que antes de ser sometidas al ensayo se efectuó un análisis de imagen, el cual será descrito

posteriormente. Debido a que se presentaba el problema de que las probetas comenzaban a resbalarse al estarlas probando una y otra vez, se decidió efectuar para cada uno de los tiempos cuatro pruebas denominadas A, B, C, D, de las cuales se elegiría un espécimen de cada uno de los tiempos para ser simulada (resultados en Anexo 1).

Ya que el problema del deslizamiento de la probeta fue resuelto, se eligió la probeta B del paso 1 (180 s) para deformarla de acuerdo a los tiempo enlistados en la Tabla 6.2. Aunque existe una diferencia entre los tiempos determinados y los tiempos reales, el que presenta una mayor diferencia es el paso 1 debido al inconveniente antes mencionado.

Tabla 6.1 Intervalos de tiempo propuestos para el ensayo de tensión.

Paso	Tiempo (s)	Probetas
1	180	A, B, C, D
2	240	A, B, C, D
3	300	A, B, C, D
4	360	A, B, C, D
5	420	A, B, C, D

Tabla 6.2 Tiempos agregados al ensayo de tensión de la probeta B.

Probeta	Paso	Tiempo señalado (s)	Tiempo real (s)	Tiempo Acumulado (s)
B	1	180	21.7080	21.7080
	2	60	57.0326	78.7406
	3	60	53.8747	132.6153
	4	60	55.1335	187.7488
	5	120	116.1655	303.9143
	6	120	119.9714	423.8857
			Ruptura	

Todas las pruebas fueron realizadas a una velocidad constante del cabezal de 3mm/min en una máquina universal servoelectrica Sintech 30/D (Figura 6.4) con una capacidad de carga de 150 KN.

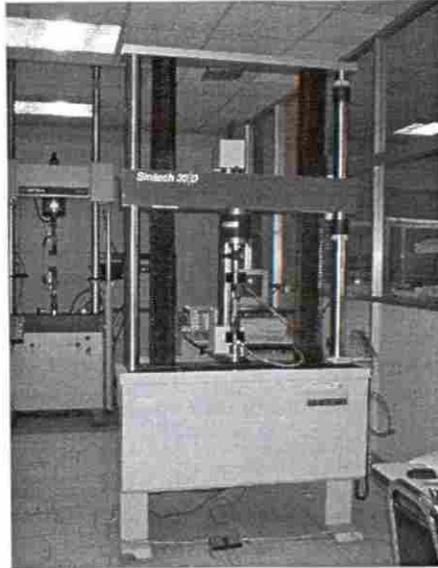


Figura 6.4 Máquina universal Sintech 30/D.

6.5 Análisis de imagen.

El análisis de imagen es la herramienta fundamental de la experimentación de este trabajo, ya que se necesitaba contar con la historia del antes y después de los pasos de deformación (las imágenes obtenidas de las probetas descritas en la Tabla 6.1 se muestran en el Anexo 2), tanto en la malla como en el aspecto de los granos.

Todas las imágenes fueron obtenidas por un digitalizador de imágenes comercial, a una resolución de 150 ppp. (píxeles por pulgada) a un aumento del 200 %. El análisis de la imagen se efectuó por medio de dos paquetes comerciales de edición de imágenes: Photo Plus 4 y Micrografx Windows Draw versión 6.

6.5.1 Medición del mallado.

Dentro del método de elemento finito una de las partes fundamentales es el mallado de la pieza a simular, es por esto que en las probetas se trazó la milimalla de 2 x 2 mm², para así poder comparar la deformación de la malla real con la del modelo.

Para llegar a esto, se tuvieron que determinar las coordenadas de la probeta sin deformación y en cada uno de los pasos indicados en la Tabla 6.2. Primeramente, se digitalizó la probeta sin deformar, mejorando la calidad de la imagen por medio del editor de imágenes Photo Plus, y determinando sus coordenadas por medio de Micrografx Windows Draw. En la Figura 6.5 se muestra como se obtuvo las coordenadas. En la parte inferior de esta figura, se señala las coordenadas en centímetros del punto marcado con blanco. Este proceso se practicó para cada paso de deformación. Cada probeta tiene 210 nodos y los pasos de deformación fueron 6.

Una vez determinadas las coordenadas de todos los pasos de deformación (ver Tabla 6.3), se creó un modelo en Turbo Pascal [26] el cual calculó la deformación real de cada uno de los pasos, de acuerdo a sus componentes en x, y, z y el esfuerzo cortante xy . El cómo evalúa la deformación real el programa se describirá en los resultados.

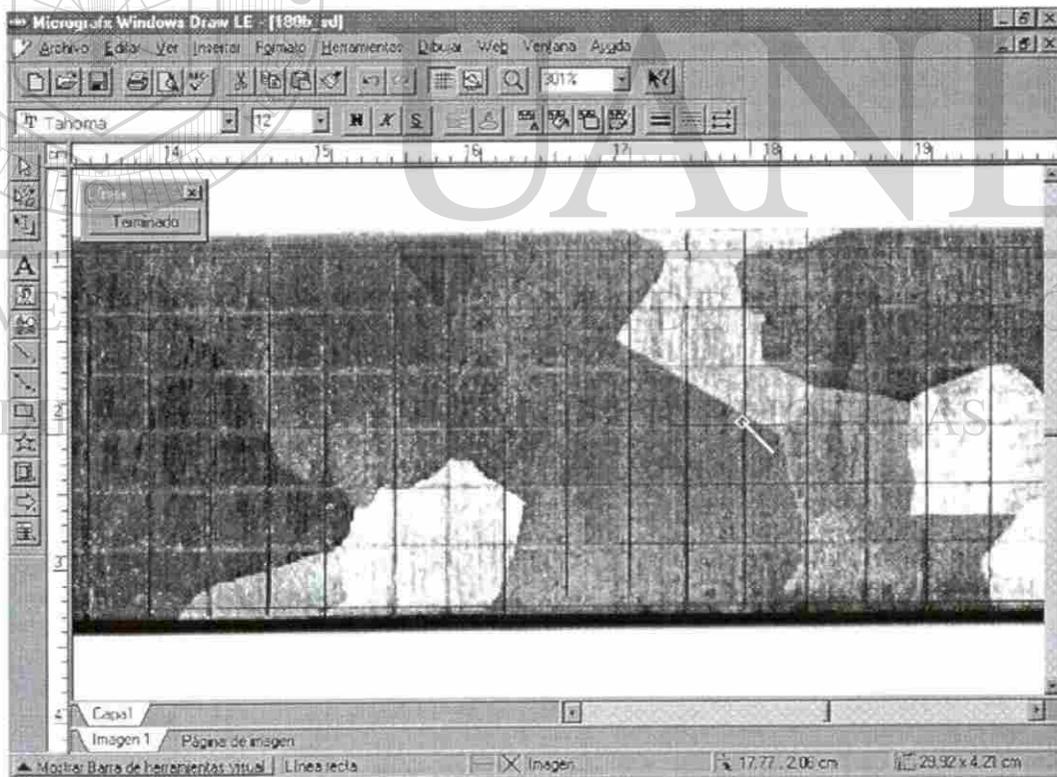


Figura 6.5 Imagen de la pantalla en Micrografx Windows Draw.

Tabla 6.3 Valores de las coordenadas (x, y) en mm de la milimalla de cada uno de los pasos de deformación.

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	0.000	11.637	0.000	11.469	0.000	11.450	0.000	11.425	0.000	11.400	0.000	11.181	0.000	10.850
	0.000	9.744	0.000	9.584	0.000	9.550	0.000	9.545	0.000	9.535	0.000	9.337	0.000	9.065
	0.000	7.777	0.000	7.634	0.000	7.625	0.000	7.600	0.000	7.590	0.000	7.460	0.000	7.211
	0.000	5.868	0.000	5.784	0.000	5.775	0.000	5.765	0.000	5.755	0.000	5.605	0.000	5.440
	0.000	3.939	0.000	3.884	0.000	3.850	0.000	3.870	0.000	3.875	0.000	3.747	0.000	3.616
	0.000	1.971	0.000	1.934	0.000	1.930	0.000	1.923	0.000	1.925	0.000	1.894	0.000	1.829
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	2.093	11.637	2.164	11.469	2.175	11.450	2.200	11.425	2.214	11.400	2.264	11.181	2.293	10.850
	2.093	9.744	2.164	9.584	2.175	9.550	2.200	9.545	2.214	9.535	2.264	9.337	2.293	9.065
	2.093	7.777	2.164	7.634	2.175	7.625	2.200	7.600	2.214	7.590	2.264	7.460	2.293	7.211
	2.093	5.868	2.164	5.784	2.175	5.675	2.200	5.765	2.214	5.755	2.264	5.605	2.293	5.440
	2.093	3.939	2.164	3.884	2.175	3.850	2.200	3.870	2.214	3.875	2.264	3.747	2.293	3.616
	2.093	1.971	2.164	1.934	2.175	1.930	2.200	1.923	2.214	1.925	2.264	1.894	2.293	1.829
	2.093	0.000	2.164	0.000	2.175	0.000	2.200	0.000	2.214	0.000	2.264	0.000	2.293	0.000
3	4.179	11.637	4.371	11.469	4.400	11.450	4.436	11.425	4.471	11.400	4.764	11.181	4.943	10.850
	4.179	9.744	4.421	9.584	4.421	9.550	4.436	9.545	4.471	9.535	4.764	9.337	4.893	9.065
	4.179	7.777	4.371	7.634	4.400	7.625	4.436	7.600	4.471	7.590	4.614	7.460	4.793	7.211
	4.179	5.868	4.221	5.784	4.250	5.675	4.286	5.765	4.421	5.755	4.514	5.605	4.643	5.440
	4.179	3.939	4.221	3.884	4.250	3.850	4.286	3.870	4.371	3.875	4.464	3.747	4.643	3.616
	4.179	1.971	4.271	1.934	4.271	1.930	4.286	1.923	4.321	1.925	4.464	1.894	4.643	1.829
	4.179	0.000	4.271	0.000	4.271	0.000	4.286	0.000	4.321	0.000	4.514	0.000	4.643	0.000
4	6.186	11.637	6.271	11.469	6.375	11.450	6.436	11.425	6.443	11.400	6.764	11.181	7.093	10.850
	6.186	9.744	6.271	9.584	6.350	9.550	6.436	9.545	6.443	9.535	6.764	9.337	7.043	9.065
	6.186	7.777	6.321	7.634	6.350	7.625	6.436	7.600	6.443	7.590	6.764	7.460	7.043	7.211
	6.186	5.868	6.321	5.784	6.350	5.675	6.436	5.765	6.443	5.755	6.714	5.605	6.993	5.440
	6.186	3.939	6.371	3.884	6.371	3.850	6.436	3.870	6.443	3.875	6.714	3.747	6.943	3.616
	6.186	1.971	6.371	1.934	6.371	1.930	6.436	1.923	6.443	1.925	6.714	1.894	6.993	1.829
	6.186	0.000	6.371	0.000	6.371	0.000	6.436	0.000	6.443	0.000	6.714	0.000	6.943	0.000
5	8.164	11.637	8.421	11.469	8.500	11.450	8.500	11.425	8.543	11.400	9.064	11.181	9.493	10.850
	8.164	9.744	8.421	9.584	8.500	9.550	8.500	9.545	8.543	9.535	9.064	9.337	9.393	9.065
	8.164	7.777	8.371	7.634	8.500	7.625	8.500	7.600	8.543	7.590	9.014	7.460	9.393	7.211
	8.164	5.868	8.421	5.784	8.500	5.675	8.500	5.765	8.543	5.755	8.964	5.605	9.393	5.440
	8.164	3.939	8.471	3.884	8.500	3.850	8.500	3.870	8.543	3.875	8.964	3.747	9.343	3.616
	8.164	1.971	8.471	1.934	8.500	1.930	8.500	1.923	8.543	1.925	8.964	1.894	9.343	1.829
	8.164	0.000	8.471	0.000	8.475	0.000	8.500	0.000	8.543	0.000	8.914	0.000	9.293	0.000
6	10.193	11.637	10.571	11.469	10.571	11.450	10.650	11.425	10.721	11.400	11.314	11.181	11.893	10.850
	10.193	9.744	10.621	9.584	10.621	9.550	10.650	9.545	10.721	9.535	11.314	9.337	11.893	9.065
	10.193	7.777	10.571	7.634	10.650	7.625	10.650	7.600	10.721	7.590	11.314	7.460	11.893	7.211
	10.193	5.868	10.621	5.784	10.650	5.675	10.650	5.765	10.721	5.755	11.314	5.605	11.793	5.440
	10.193	3.939	10.621	3.884	10.621	3.850	10.621	3.870	10.621	3.875	11.214	3.747	11.743	3.616
	10.193	1.971	10.571	1.934	10.600	1.930	10.600	1.923	10.621	1.925	11.214	1.894	11.743	1.829
	10.193	0.000	10.621	0.000	10.621	0.000	10.621	0.000	10.621	0.000	11.114	0.000	11.693	0.000

Continua...

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	Y
7	12.021	11.637	12.521	11.469	12.550	11.450	12.600	11.425	12.621	11.400	13.314	11.181	13.943	10.850
	12.021	9.744	12.471	9.584	12.550	9.550	12.600	9.545	12.621	9.535	13.314	9.337	13.943	9.065
	12.021	7.777	12.521	7.634	12.550	7.625	12.600	7.600	12.621	7.590	13.314	7.460	13.943	7.211
	12.021	5.868	12.471	5.784	12.550	5.675	12.600	5.765	12.621	5.755	13.314	5.605	13.943	5.440
	12.021	3.939	12.521	3.884	12.525	3.850	12.550	3.870	12.571	3.875	13.314	3.747	13.893	3.616
	12.021	1.971	12.471	1.934	12.500	1.930	12.550	1.923	12.571	1.925	13.264	1.894	13.843	1.829
	12.021	0.000	12.521	0.000	12.525	0.000	12.550	0.000	12.571	0.000	13.214	0.000	13.843	0.000
8	14.079	11.637	14.621	11.469	14.700	11.450	14.700	11.425	14.721	11.400	15.614	11.181	16.443	10.850
	14.079	9.744	14.621	9.584	14.700	9.550	14.700	9.545	14.721	9.535	15.664	9.337	16.343	9.065
	14.079	7.777	14.671	7.634	14.700	7.625	14.700	7.600	14.721	7.590	15.664	7.460	16.443	7.211
	14.079	5.868	14.671	5.784	14.721	5.675	14.721	5.765	14.721	5.755	15.614	5.605	16.443	5.440
	14.079	3.939	14.671	3.884	14.700	3.850	14.721	3.870	14.721	3.875	15.564	3.747	16.343	3.616
	14.079	1.971	14.721	1.934	14.721	1.930	14.721	1.923	14.721	1.925	15.614	1.894	16.343	1.829
	14.079	0.000	14.671	0.000	14.700	0.000	14.721	0.000	14.721	0.000	15.564	0.000	16.343	0.000
9	16.250	11.637	16.821	11.469	16.950	11.450	16.950	11.425	16.971	11.400	17.914	11.181	18.843	10.850
	16.250	9.744	16.821	9.584	16.950	9.550	16.950	9.545	16.971	9.535	17.914	9.337	18.843	9.065
	16.250	7.777	16.871	7.634	16.950	7.625	16.950	7.600	16.971	7.590	17.914	7.460	18.893	7.211
	16.250	5.868	16.871	5.784	16.950	5.675	16.950	5.765	16.971	5.755	17.914	5.605	18.843	5.440
	16.250	3.939	16.921	3.884	16.950	3.850	16.950	3.870	16.971	3.875	17.914	3.747	18.843	3.616
	16.250	1.971	16.921	1.934	16.925	1.930	16.950	1.923	16.971	1.925	17.914	1.894	18.843	1.829
	16.250	0.000	16.921	0.000	16.925	0.000	16.950	0.000	16.971	0.000	17.914	0.000	18.843	0.000
10	18.114	11.637	18.821	11.469	18.850	11.450	18.850	11.425	18.871	11.400	20.064	11.181	21.143	10.850
	18.114	9.744	18.821	9.584	18.850	9.550	18.850	9.545	18.871	9.535	20.064	9.337	21.143	9.065
	18.114	7.777	18.821	7.634	18.850	7.625	18.850	7.600	18.871	7.590	20.064	7.460	21.093	7.211
	18.114	5.868	18.821	5.784	18.850	5.675	18.850	5.765	18.871	5.755	20.014	5.605	21.093	5.440
	18.114	3.939	18.821	3.884	18.875	3.850	18.950	3.870	18.971	3.875	20.014	3.747	21.043	3.616
	18.114	1.971	18.821	1.934	18.850	1.930	18.950	1.923	18.971	1.925	19.964	1.894	21.043	1.829
	18.114	0.000	18.821	0.000	18.850	0.000	18.950	0.000	18.971	0.000	19.964	0.000	20.993	0.000
11	20.300	11.637	21.121	11.469	21.200	11.450	21.200	11.425	21.221	11.400	22.514	11.181	23.693	10.850
	20.300	9.744	21.171	9.584	21.200	9.550	21.200	9.545	21.221	9.535	22.564	9.337	23.693	9.065
	20.300	7.777	21.121	7.634	21.150	7.625	21.150	7.600	21.171	7.590	22.464	7.460	23.643	7.211
	20.300	5.868	21.121	5.784	21.100	5.675	21.100	5.765	21.121	5.755	22.414	5.605	23.593	5.440
	20.300	3.939	21.121	3.884	21.100	3.850	21.100	3.870	21.121	3.875	22.414	3.747	23.593	3.616
	20.300	1.971	21.071	1.934	21.100	1.930	21.100	1.923	21.121	1.925	22.314	1.894	23.493	1.829
	20.300	0.000	21.121	0.000	21.100	0.000	21.100	0.000	21.121	0.000	22.314	0.000	23.543	0.000
12	22.386	11.637	23.221	11.469	23.300	11.450	23.300	11.425	23.321	11.400	24.814	11.181	26.093	10.850
	22.386	9.744	23.271	9.584	23.271	9.550	23.271	9.545	23.271	9.535	24.764	9.337	26.043	9.065
	22.386	7.777	23.271	7.634	23.271	7.625	23.271	7.600	23.271	7.590	24.764	7.460	26.043	7.211
	22.386	5.868	23.271	5.784	23.271	5.675	23.271	5.765	23.271	5.755	24.714	5.605	25.993	5.440
	22.386	3.939	23.271	3.884	23.271	3.850	23.271	3.870	23.271	3.875	24.664	3.747	25.993	3.616
	22.386	1.971	23.271	1.934	23.271	1.930	23.271	1.923	23.271	1.925	24.664	1.894	25.943	1.829
	22.386	0.000	23.271	0.000	23.271	0.000	23.271	0.000	23.271	0.000	24.664	0.000	25.943	0.000
13	24.307	11.637	25.321	11.469	25.400	11.450	25.421	11.425	25.421	11.400	26.964	11.181	28.443	10.850
	24.307	9.744	25.321	9.584	25.400	9.550	25.421	9.545	25.421	9.535	26.964	9.337	28.393	9.065
	24.307	7.777	25.321	7.634	25.350	7.625	25.400	7.600	25.421	7.590	26.914	7.460	28.393	7.211
	24.307	5.868	25.321	5.784	25.350	5.675	25.400	5.765	25.421	5.755	26.914	5.605	28.393	5.440
	24.307	3.939	25.321	3.884	25.325	3.850	25.350	3.870	25.371	3.875	26.914	3.747	28.343	3.616
	24.307	1.971	25.321	1.934	25.325	1.930	25.350	1.923	25.371	1.925	26.864	1.894	28.293	1.829
	24.307	0.000	25.321	0.000	25.325	0.000	25.350	0.000	25.371	0.000	26.864	0.000	28.293	0.000

Continua...

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
14	26.250	11.637	27.321	11.469	27.400	11.450	27.421	11.425	27.421	11.400	29.164	11.181	30.693	10.850
	26.250	9.744	27.321	9.584	27.400	9.550	27.421	9.545	27.421	9.535	29.164	9.337	30.743	9.065
	26.250	7.777	27.321	7.634	27.400	7.625	27.421	7.600	27.421	7.590	29.164	7.460	30.693	7.211
	26.250	5.868	27.321	5.784	27.350	5.675	27.400	5.765	27.421	5.755	29.164	5.605	30.643	5.440
	26.250	3.939	27.321	3.884	27.350	3.850	27.350	3.870	27.421	3.875	29.064	3.747	30.593	3.616
	26.250	1.971	27.371	1.934	27.371	1.930	27.350	1.923	27.421	1.925	29.064	1.894	30.593	1.829
	26.250	0.000	27.321	0.000	27.321	0.000	27.350	0.000	27.371	0.000	29.064	0.000	30.543	0.000
15	28.107	11.637	29.371	11.469	29.400	11.450	29.521	11.425	29.521	11.400	31.164	11.181	32.993	10.850
	28.107	9.744	29.371	9.584	29.400	9.550	29.451	9.545	29.451	9.535	31.264	9.337	32.993	9.065
	28.107	7.777	29.371	7.634	29.400	7.625	29.471	7.600	29.471	7.590	31.214	7.460	32.993	7.211
	28.107	5.868	29.371	5.784	29.400	5.675	29.446	5.765	29.446	5.755	31.214	5.605	32.943	5.440
	28.107	3.939	29.371	3.884	29.400	3.850	29.400	3.870	29.421	3.875	31.164	3.747	32.843	3.616
	28.107	1.971	29.371	1.934	29.400	1.930	29.400	1.923	29.421	1.925	31.164	1.894	32.843	1.829
	28.107	0.000	29.371	0.000	29.400	0.000	29.400	0.000	29.421	0.000	31.114	0.000	32.843	0.000
16	30.471	11.637	31.771	11.469	31.850	11.450	31.971	11.425	31.971	11.400	33.914	11.181	35.793	10.850
	30.471	9.744	31.771	9.584	31.850	9.550	31.921	9.545	31.921	9.535	33.914	9.337	35.793	9.065
	30.471	7.777	31.821	7.634	31.825	7.625	31.921	7.600	31.921	7.590	33.814	7.460	35.693	7.211
	30.471	5.868	31.821	5.784	31.825	5.675	31.921	5.765	31.921	5.755	33.814	5.605	35.693	5.440
	30.471	3.939	31.771	3.884	31.800	3.850	31.921	3.870	31.921	3.875	33.814	3.747	35.643	3.616
	30.471	1.971	31.771	1.934	31.800	1.930	31.850	1.923	31.871	1.925	33.764	1.894	35.593	1.829
	30.471	0.000	31.721	0.000	31.800	0.000	31.850	0.000	31.871	0.000	33.664	0.000	35.593	0.000
17	32.264	11.637	33.621	11.469	33.650	11.450	33.800	11.425	33.821	11.400	35.814	11.181	37.843	10.850
	32.264	9.744	33.621	9.584	33.650	9.550	33.771	9.545	33.771	9.535	35.814	9.337	37.843	9.065
	32.264	7.777	33.621	7.634	33.650	7.625	33.771	7.600	33.771	7.590	35.764	7.460	37.843	7.211
	32.264	5.868	33.621	5.784	33.650	5.675	33.771	5.765	33.771	5.755	35.764	5.605	37.793	5.440
	32.264	3.939	33.571	3.884	33.600	3.850	33.750	3.870	33.771	3.875	35.764	3.747	37.743	3.616
	32.264	1.971	33.571	1.934	33.575	1.930	33.700	1.923	33.721	1.925	35.764	1.894	37.693	1.829
	32.264	0.000	33.571	0.000	33.575	0.000	33.700	0.000	33.721	0.000	35.714	0.000	37.643	0.000
18	34.171	11.637	35.621	11.469	35.700	11.450	35.771	11.425	35.771	11.400	37.964	11.181	40.093	10.850
	34.171	9.744	35.621	9.584	35.700	9.550	35.771	9.545	35.771	9.535	38.014	9.337	40.093	9.065
	34.171	7.777	35.621	7.634	35.700	7.625	35.771	7.600	35.771	7.590	37.914	7.460	40.093	7.211
	34.171	5.868	35.621	5.784	35.650	5.675	35.771	5.765	35.771	5.755	37.914	5.605	40.043	5.440
	34.171	3.939	35.621	3.884	35.625	3.850	35.771	3.870	35.771	3.875	37.864	3.747	39.993	3.616
	34.171	1.971	35.621	1.934	35.625	1.930	35.700	1.923	35.771	1.925	37.864	1.894	39.893	1.829
	34.171	0.000	35.621	0.000	35.625	0.000	35.700	0.000	35.721	0.000	37.764	0.000	39.893	0.000
19	36.264	11.637	37.771	11.469	37.900	11.450	38.000	11.425	38.021	11.400	40.314	11.181	42.493	10.850
	36.264	9.744	37.771	9.584	37.900	9.550	37.950	9.545	37.971	9.535	40.314	9.337	42.543	9.065
	36.264	7.777	37.821	7.634	37.825	7.625	37.950	7.600	37.971	7.590	40.214	7.460	42.493	7.211
	36.264	5.868	37.821	5.784	37.825	5.675	37.950	5.765	37.971	5.755	40.214	5.605	42.493	5.440
	36.264	3.939	37.821	3.884	37.825	3.850	37.900	3.870	37.971	3.875	40.214	3.747	42.493	3.616
	36.264	1.971	37.821	1.934	37.825	1.930	37.900	1.923	37.971	1.925	40.164	1.894	42.443	1.829
	36.264	0.000	37.821	0.000	37.825	0.000	37.900	0.000	37.971	0.000	40.114	0.000	42.393	0.000
20	38.364	11.637	39.971	11.469	40.050	11.450	40.171	11.425	40.171	11.400	42.614	11.181	44.993	10.850
	38.364	9.744	39.921	9.584	40.050	9.550	40.121	9.545	40.121	9.535	42.614	9.337	44.943	9.065
	38.364	7.777	40.021	7.634	40.025	7.625	40.121	7.600	40.121	7.590	42.614	7.460	44.993	7.211
	38.364	5.868	40.021	5.784	40.025	5.675	40.121	5.765	40.121	5.755	42.564	5.605	44.943	5.440
	38.364	3.939	40.021	3.884	40.025	3.850	40.100	3.870	40.121	3.875	42.514	3.747	44.893	3.616
	38.364	1.971	39.971	1.934	39.975	1.930	40.100	1.923	40.121	1.925	42.464	1.894	44.893	1.829
	38.364	0.000	39.971	0.000	39.975	0.000	40.050	0.000	40.071	0.000	42.464	0.000	44.793	0.000

Continua...

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
21	40.257	11.637	41.971	11.469	42.050	11.450	42.171	11.425	42.171	11.400	44.764	11.181	47.193	10.850
	40.257	9.744	41.971	9.584	42.050	9.550	42.171	9.545	42.171	9.535	44.714	9.337	47.243	9.065
	40.257	7.777	41.971	7.634	42.000	7.625	42.171	7.600	42.171	7.590	44.714	7.460	47.143	7.211
	40.257	5.868	41.921	5.784	42.000	5.675	42.150	5.765	42.171	5.755	44.614	5.605	47.143	5.440
	40.257	3.939	41.971	3.884	41.975	3.850	42.100	3.870	42.121	3.875	44.614	3.747	47.143	3.616
	40.257	1.971	41.971	1.934	41.975	1.930	42.050	1.923	42.121	1.925	44.564	1.894	47.043	1.829
	40.257	0.000	41.971	0.000	41.975	0.000	42.050	0.000	42.071	0.000	44.564	0.000	47.043	0.000
22	42.150	11.637	43.921	11.469	44.050	11.450	44.200	11.425	44.221	11.400	46.814	11.181	49.493	10.850
	42.150	9.744	43.921	9.584	44.050	9.550	44.150	9.545	44.221	9.535	46.814	9.337	49.493	9.065
	42.150	7.777	43.921	7.634	44.000	7.625	44.150	7.600	44.171	7.590	46.814	7.460	49.443	7.211
	42.150	5.868	43.921	5.784	44.000	5.675	44.100	5.765	44.146	5.755	46.764	5.605	49.243	5.440
	42.150	3.939	43.921	3.884	44.000	3.850	44.100	3.870	44.121	3.875	46.764	3.747	49.393	3.616
	42.150	1.971	43.921	1.934	43.950	1.930	44.071	1.923	44.071	1.925	46.714	1.894	49.293	1.829
	42.150	0.000	43.921	0.000	43.950	0.000	44.071	0.000	44.071	0.000	46.664	0.000	49.293	0.000
23	44.193	11.637	46.071	11.469	46.150	11.450	46.325	11.425	46.371	11.400	49.164	11.181	51.893	10.850
	44.193	9.744	46.071	9.584	46.150	9.550	46.300	9.545	46.371	9.535	49.114	9.337	51.893	9.065
	44.193	7.777	46.071	7.634	46.150	7.625	46.300	7.600	46.321	7.590	49.064	7.460	51.793	7.211
	44.193	5.868	46.121	5.784	46.150	5.675	46.300	5.765	46.321	5.755	49.064	5.605	51.793	5.440
	44.193	3.939	46.071	3.884	46.150	3.850	46.250	3.870	46.321	3.875	49.014	3.747	51.793	3.616
	44.193	1.971	46.071	1.934	46.100	1.930	46.250	1.923	46.271	1.925	49.014	1.894	51.793	1.829
	44.193	0.000	46.071	0.000	46.100	0.000	46.250	0.000	46.221	0.000	48.964	0.000	51.743	0.000
24	46.186	11.637	48.171	11.469	48.200	11.450	48.350	11.425	48.421	11.400	51.264	11.181	54.193	10.850
	46.186	9.744	48.171	9.584	48.200	9.550	48.300	9.545	48.371	9.535	51.264	9.337	54.143	9.065
	46.186	7.777	48.171	7.634	48.200	7.625	48.300	7.600	48.371	7.590	51.264	7.460	54.193	7.211
	46.186	5.868	48.171	5.784	48.200	5.675	48.300	5.765	48.371	5.755	51.264	5.605	54.143	5.440
	46.186	3.939	48.171	3.884	48.200	3.850	48.300	3.870	48.371	3.875	51.214	3.747	54.093	3.616
	46.186	1.971	48.171	1.934	48.200	1.930	48.275	1.923	48.321	1.925	51.164	1.894	54.143	1.829
	46.186	0.000	48.171	0.000	48.200	0.000	48.250	0.000	48.271	0.000	51.114	0.000	54.043	0.000
25	48.171	11.637	50.221	11.469	50.300	11.450	50.500	11.425	50.521	11.400	53.564	11.181	56.543	10.850
	48.171	9.744	50.221	9.584	50.300	9.550	50.421	9.545	50.421	9.535	53.564	9.337	56.543	9.065
	48.171	7.777	50.221	7.634	50.250	7.625	50.400	7.600	50.421	7.590	53.464	7.460	56.393	7.211
	48.171	5.868	50.171	5.784	50.250	5.675	50.400	5.765	50.421	5.755	53.464	5.605	56.393	5.440
	48.171	3.939	50.171	3.884	50.250	3.850	50.400	3.870	50.421	3.875	53.414	3.747	56.343	3.616
	48.171	1.971	50.171	1.934	50.250	1.930	50.400	1.923	50.446	1.925	53.364	1.894	56.293	1.829
	48.171	0.000	50.171	0.000	50.250	0.000	50.400	0.000	50.421	0.000	53.364	0.000	56.293	0.000
26	50.279	11.637	52.371	11.469	52.500	11.450	52.650	11.425	52.721	11.400	55.814	11.181	58.943	10.850
	50.279	9.744	52.371	9.584	52.500	9.550	52.625	9.545	52.671	9.535	55.814	9.337	58.943	9.065
	50.279	7.777	52.371	7.634	52.500	7.625	52.600	7.600	52.671	7.590	55.814	7.460	58.893	7.211
	50.279	5.868	52.371	5.784	52.450	5.675	52.600	5.765	52.646	5.755	55.764	5.605	58.843	5.440
	50.279	3.939	52.371	3.884	52.450	3.850	52.600	3.870	52.621	3.875	55.764	3.747	58.843	3.616
	50.279	1.971	52.371	1.934	52.450	1.930	52.600	1.923	52.671	1.925	55.714	1.894	58.843	1.829
	50.279	0.000	52.371	0.000	52.450	0.000	52.600	0.000	52.671	0.000	55.764	0.000	58.793	0.000
27	52.421	11.637	54.621	11.469	54.750	11.450	54.900	11.425	54.971	11.400	58.164	11.181	61.543	10.850
	52.421	9.744	54.621	9.584	54.700	9.550	54.850	9.545	54.971	9.535	58.114	9.337	61.543	9.065
	52.421	7.777	54.621	7.634	54.700	7.625	54.850	7.600	54.971	7.590	58.114	7.460	61.343	7.211
	52.421	5.868	54.621	5.784	54.700	5.675	54.850	5.765	54.971	5.755	58.114	5.605	61.343	5.440
	52.421	3.939	54.621	3.884	54.700	3.850	54.850	3.870	54.971	3.875	58.114	3.747	61.293	3.616
	52.421	1.971	54.571	1.934	54.700	1.930	54.850	1.923	54.971	1.925	58.114	1.894	61.293	1.829
	52.421	0.000	54.621	0.000	54.700	0.000	54.850	0.000	54.946	0.000	58.114	0.000	61.293	0.000

Continua...

Paso	SD		1		2		3		4		5		6	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
28	54.400	11.637	56.671	11.469	56.750	11.450	56.950	11.425	57.021	11.400	60.364	11.181	63.743	10.850
	54.400	9.744	56.671	9.584	56.750	9.550	56.900	9.545	57.021	9.535	60.364	9.337	63.743	9.065
	54.400	7.777	56.671	7.634	56.750	7.625	56.950	7.600	57.071	7.590	60.364	7.460	63.693	7.211
	54.400	5.868	56.671	5.784	56.750	5.675	56.950	5.765	57.071	5.755	60.364	5.605	63.643	5.440
	54.400	3.939	56.671	3.884	56.750	3.850	56.950	3.870	57.071	3.875	60.364	3.747	63.593	3.616
	54.400	1.971	56.671	1.934	56.750	1.930	56.950	1.923	57.021	1.925	60.364	1.894	63.643	1.829
	54.400	0.000	56.671	0.000	56.750	0.000	56.950	0.000	57.021	0.000	60.314	0.000	63.593	0.000
29	56.429	11.637	58.871	11.469	58.950	11.450	59.100	11.425	59.221	11.400	62.614	11.181	66.093	10.850
	56.429	9.744	58.871	9.584	58.950	9.550	59.100	9.545	59.221	9.535	62.614	9.337	66.093	9.065
	56.429	7.777	58.871	7.634	58.950	7.625	59.075	7.600	59.221	7.590	62.664	7.460	66.093	7.211
	56.429	5.868	58.771	5.784	58.925	5.675	59.050	5.765	59.221	5.755	62.614	5.605	66.043	5.440
	56.429	3.939	58.771	3.884	58.925	3.850	59.050	3.870	59.171	3.875	62.614	3.747	66.043	3.616
	56.429	1.971	58.771	1.934	58.900	1.930	59.000	1.923	59.171	1.925	62.564	1.894	65.743	1.829
	56.429	0.000	58.721	0.000	58.875	0.000	59.000	0.000	59.171	0.000	62.514	0.000	65.893	0.000
30	58.464	11.637	60.971	11.469	61.000	11.450	61.150	11.425	61.321	11.400	64.714	11.181	68.243	10.850
	58.464	9.744	60.871	9.584	61.000	9.550	61.200	9.545	61.321	9.535	64.764	9.337	68.343	9.065
	58.464	7.777	60.871	7.634	61.000	7.625	61.200	7.600	61.321	7.590	64.814	7.460	68.343	7.211
	58.464	5.868	60.821	5.784	61.000	5.675	61.150	5.765	61.321	5.755	64.714	5.605	68.293	5.440
	58.464	3.939	60.821	3.884	61.000	3.850	61.150	3.870	61.321	3.875	64.714	3.747	68.293	3.616
	58.464	1.971	60.821	1.934	60.950	1.930	61.100	1.923	61.321	1.925	64.714	1.894	68.193	1.829
	58.464	0.000	60.721	0.000	60.950	0.000	61.100	0.000	61.271	0.000	64.664	0.000	68.143	0.000
31	60.493	11.637	62.921	11.469	63.065	11.450	63.300	11.425	63.414	11.400	66.900	11.181	70.450	10.850
	60.493	9.744	62.921	9.584	63.065	9.550	63.300	9.545	63.414	9.535	66.900	9.337	70.450	9.065
	60.493	7.777	62.921	7.634	63.065	7.625	63.300	7.600	63.414	7.590	66.900	7.460	70.450	7.211
	60.493	5.868	62.921	5.784	63.065	5.675	63.300	5.765	63.414	5.755	66.900	5.605	70.450	5.440
	60.493	3.939	62.921	3.884	63.065	3.850	63.300	3.870	63.414	3.875	66.900	3.747	70.450	3.616
	60.493	1.971	62.921	1.934	63.065	1.930	63.300	1.923	63.414	1.925	66.900	1.894	70.450	1.829
	60.493	0.000	62.921	0.000	63.065	0.000	63.300	0.000	63.414	0.000	66.900	0.000	70.450	0.000

6.5.2 Medición de la deformación de los granos.

Para evaluar la deformación de los granos de acuerdo a su cambio en ancho y alto se utilizó el método de estimación de la deformación equivalente desarrollado por Hensler y Gifkins [21] descrito en la sección 5.6. Para ello, se midió la altura H (paralela al eje del esfuerzo) y el ancho W (perpendicular al eje del esfuerzo) máximos [20]. La probeta seleccionada 1B cuenta con 30 granos, de los cuales se resolvió hacer las mediciones antes mencionadas en un 50 % del total de granos, es decir a 15 de estos. En la Tabla 6.4 se muestra los valores de H y W para los 15 granos en los pasos de deformación.

Las mediciones se efectuaron antes y después de cada deformación, mediante Micrografx Windows Draw, obteniendo las coordenadas de la altura y el ancho máximos como se muestra en la Figura 6.6.

Tabla 6.4 Valores de H y W para los diferentes pasos de deformación.

Grano	SD		1		2		3		4		5		6	
	H	W	H	W	H	W	H	W	H	W	H	W	H	W
1 06	3.660	2.300	3.800	2.300	3.800	2.300	3.800	2.200	3.800	2.150	4.000	2.050	4.000	2.000
2 09	4.800	2.900	5.150	2.900	5.200	2.700	5.200	2.800	5.050	2.800	5.450	2.700	5.500	2.650
3 11	6.500	5.150	6.830	5.116	7.200	4.950	7.400	4.950	7.350	4.950	8.050	4.900	8.200	4.600
4 13	8.700	7.000	8.900	6.967	8.950	6.650	9.300	6.650	9.600	6.650	9.600	6.400	9.800	6.300
5 17	9.750	8.600	9.966	8.330	10.000	8.330	10.100	8.000	9.700	8.100	10.150	7.750	10.450	7.450
6 18	5.416	1.900	5.416	1.900	5.500	1.800	5.600	1.800	5.700	2.000	5.850	1.700	5.850	1.700
7 19	5.900	5.083	6.616	5.083	6.250	4.750	6.300	4.450	6.650	4.700	6.650	4.600	6.650	4.550
8 20	8.450	8.650	8.650	8.650	8.800	8.250	9.100	8.250	9.400	8.250	9.400	7.950	9.500	7.950
9 21	2.750	2.200	2.860	2.200	3.200	2.200	3.200	2.150	3.000	1.800	3.250	1.800	3.300	1.800
10 22	10.950	11.637	12.000	11.469	12.000	11.450	11.800	11.425	12.250	11.400	12.500	11.181	12.500	10.850
11 24	4.800	5.150	5.030	5.150	5.030	5.050	5.030	5.000	5.500	5.000	5.500	5.000	5.350	4.900
12 25	8.050	5.000	8.600	4.900	8.600	4.650	8.600	4.650	8.900	4.650	8.900	4.500	8.900	4.400
13 26	5.950	5.170	6.267	5.160	6.300	4.950	6.300	4.800	6.300	4.800	6.550	4.650	6.550	4.650
14 27	15.880	7.300	15.880	7.300	15.600	6.950	15.450	6.950	15.950	6.950	17.000	6.850	17.200	6.800
15 28	4.950	4.660	5.330	4.367	5.200	4.250	5.200	4.250	5.300	4.250	5.350	4.100	5.400	4.050

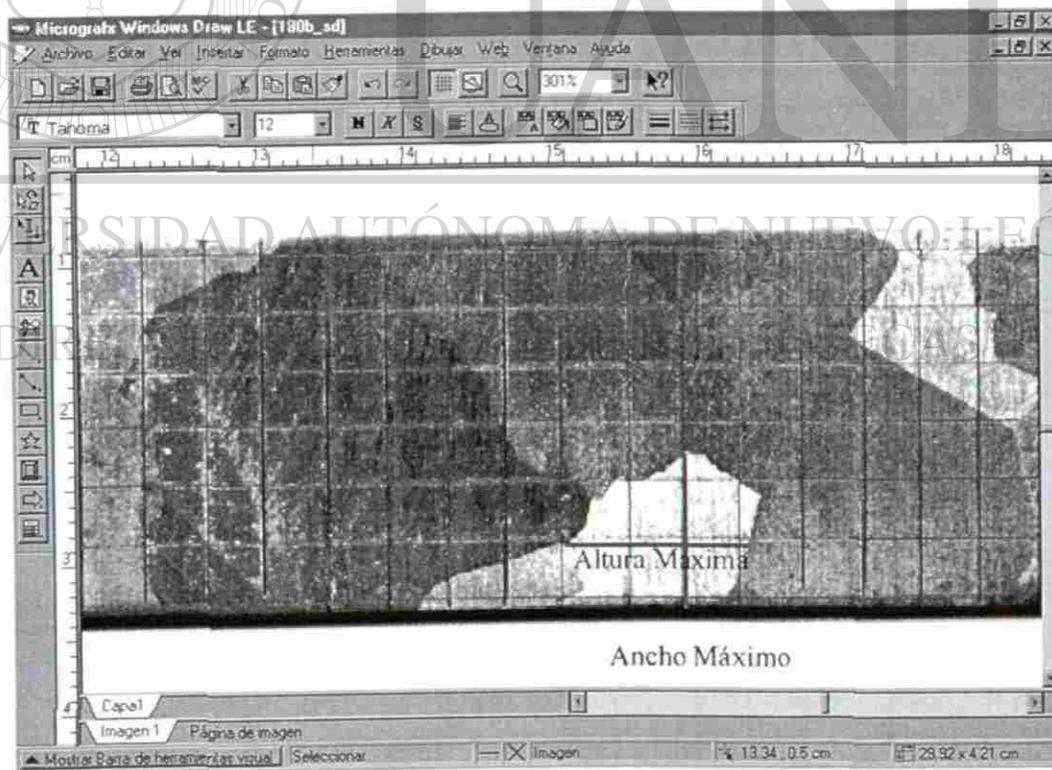


Figura 6.6 Imagen que muestra el procedimiento de medición de la altura y del ancho máximo para determinar la deformación equivalente.

6.6 Simulación por elemento finito.

En este trabajo se efectuaron 2 modelos y 1 tipo de análisis, los cuales se realizaron en el paquete comercial ABAQUS version 6.2. El primer modelo consistió en la probeta rectangular con la malla cuadrada de 2 mm x 2 mm al cual se llamó MALLA, y el segundo se baso en la probeta seccionada de acuerdo a la forma y al tamaño de grano llamado GRANOS. El tipo de análisis que se uso fue estático.

6.6.1 Conceptos básicos de ABAQUS/CAE^{MR}.

Un análisis completo en ABAQUS Standar usualmente consiste de 3 pasos: preprocesador, simulación y postprocesador. Estos pasos son ligados por archivos como se muestra en la Figura 6.7.

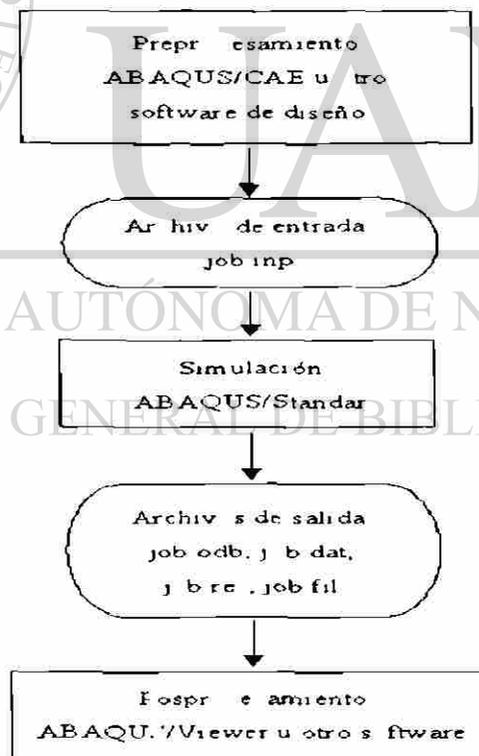


Figura 6.7 Esquema de los tres pasos y como son ligados [27].

Preprocesador (ABAQUS/CAE)

En esta estación se define el modelo del problema físico y se crea un archivo de entrada a ABAQUS. El modelo es usualmente creado gráficamente utilizando ABAQUS CAE u otro preprocesador o paquete de diseño, aunque el archivo de entrada de ABAQUS para un análisis simple puede ser creado directamente utilizando un editor de texto.

Simulación (ABAQUS/Standar)

La simulación normalmente se corre como un proceso de soporte, es la estación en la cual ABAQUS Standar resuelve el problema numérico definido en el modelo. Ejemplos de salida de un análisis incluye desplazamientos y esfuerzos que son almacenados en archivos binarios leídos por el postprocesador. Dependiendo de la complejidad, el problema será analizado y el poder de la computadora aplicado, por lo que puede tomar desde segundos a días para realizar el análisis completo.

Postprocesador (ABAQUS/Viewer).

Se pueden evaluar los resultados una vez que la simulación haya sido terminada y los desplazamientos, esfuerzos, u otras variables fundamentales hayan sido calculados.

La evaluación generalmente se hace interactivamente usando ABAQUS/Viewer u otro postprocesador. ABAQUS/Viewer lee los archivos de base de datos de salida binarios neutrales, teniendo una variedad de opciones de despliegado de resultados, incluyendo planos de color de contorno, animaciones, planos de forma deformada y planos X-Y.

Un modelo en ABAQUS es compuesto de diferentes componentes que juntos describen el problema físico para ser analizado y poder obtener los resultados. Por lo menos, el modelo de análisis debe de consistir de la siguiente información:

- Discretización de la geometría.
- Propiedades de la sección del elemento.
- Datos del material.
- Cargas y condiciones frontera.

- Tipo de análisis.
- Requerimientos de salida.

ABAQUS CAE es el ambiente completo ABAQUS que proporciona una interfase para crear modelos ABAQUS, interactivamente enviando y monitoreando los trabajos de ABAQUS y evaluando los resultados de las simulaciones. ABAQUS CAE está dividido en módulos, donde cada módulo define un aspecto lógico del proceso de simulación.

Cambiando de módulo a módulo, se construye el modelo. Cuando el modelo está completo ABAQUS CAE genera un archivo de entrada que es enviado a ABAQUS Standard o ABAQUS Explicit para su solución. Estos programas de solución analizan el archivo de entrada generado por ABAQUS CAE, ejecutando el análisis, mandando la información a ABAQUS CAE, observando el progreso del trabajo en el monitor y generando la base de datos de salida. Finalmente, se utiliza ABAQUS Viewer para analizar la base de datos de salida y así observar los resultados del análisis [27].

ABAQUS CAE está dividido en unidades funcionales denominadas módulos. Cada módulo contiene únicamente herramientas que son relevantes para una porción específica del trabajo de modelación. En las secciones subsecuentes se definirán cada uno de estos módulos y como se fueron construyeron los 2 modelos en este trabajo.

6.6.1.1 Módulo Parte (Part).

Este módulo permite crear partes individuales que componen la geometría directamente en ABAQUS CAE, ó también puede importarla de otros programas de modelación geométrica [27].

Para este trabajo se utilizó ABAQUS CAE para realizar las geometrías de los dos modelos.

Para el modelo MALLA la geometría se realizó en un espacio de modelación en dos dimensiones del tipo deformable, con una aplicación base de estructura plana (Planar Shell) y consistió en un probeta rectangular de 60 mm de largo y 12 mm de ancho. El segundo modelo (GRANOS) también se efectuó bajo el mismo procedimiento del modelo MALLA, pero posteriormente fue seccionada de acuerdo a una aproximación del tamaño y forma de los 30 granos que se tienen dentro de esta sección.

Esta aproximación se realizó debido a que la geometría de los granos es muy complicada, ya que cada grano contiene un sinnúmero de bordes y ondulaciones que harían casi imposible su construcción. En la Figura 6.8(a) se muestra la probeta elegida para este modelo, nótese que las fronteras de granos son muy complejas para trazarse. En la Figura 6.8(b) se observa la aproximación efectuada de los granos, las coordenadas utilizadas se encuentran en la Tabla 6.5.

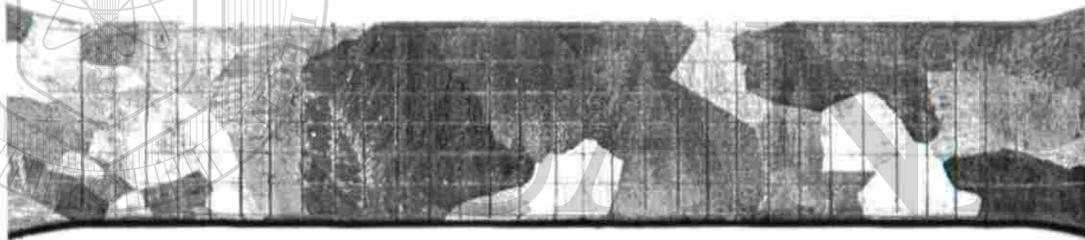


Figura 6.8 Geometría de la probeta rectangular utilizada en modelo GRANOS.

6.6.1.2 Módulo Propiedades (Property).

Este módulo contiene la información acerca de las propiedades de la parte o región de la parte. Dentro de éste se crean la definición y secciones del material y la asignación de éstos a regiones de las partes que componen la geometría [27].

En este trabajo se definió el comportamiento del acero de bajo carbono galvanizado como mecánico, teniendo parte elástica y parte plástica y asignando las propiedades de este material de las obtenidas en los ensayos de tensión descritos en la sección 6.4 en ambos modelos, aunque el modelo de GRANOS fue dividido en cada una de sus secciones se utilizaron las mismas propiedades.

6.6.1.3 Módulo Ensamble (Assembly).

Cuando se crea una parte, ésta existe con su propio sistema de coordenadas, independiente de otras partes en el modelo. Se usa este módulo de ensamble para pasar todas las partes de la geometría de su propio sistema de coordenadas a un sistema de coordenadas global, creando de esta manera un ensamble. Un modelo ABAQUS contiene solamente un ensamble [27].

Dentro de este módulo se mandan llamar las partes que crean el modelo, para este trabajo solo se mando llamar las geometrías antes mencionadas.

6.6.1.4 Módulo Paso (Step).

Se puede usar el módulo paso para crear y configurar pasos de análisis y asociar peticiones de salida. La secuencia de paso provee un modo conveniente para capturar cambios en un modelo (tales como carga y cambios de condición de frontera); las peticiones de salida pueden variar conforme se necesite entre pasos [27].

Para los modelos realizados en este trabajo el tipo de análisis empleado fue estático (STATIC) y se definió como pasos a los tiempos reales a los que se deformó la probeta de acuerdo a la Tabla 6.2. y los requerimientos de salida fueron el esfuerzo conforme al criterio de Von Mises y la deformación plástica equivalente.

6.6.1.5 Módulo Interacción (Interaction).

En el módulo interacción se especifican las interacciones mecánicas y térmicas entre regiones de un modelo o entre regiones de un modelo y sus alrededores. Un ejemplo de interacción es el contacto entre dos superficies. Otras interacciones que pueden ser definidas incluyen restricciones, tales como vínculos, ecuaciones, y restricciones de cuerpos rígidos. ABAQUS CAE no reconoce los contactos mecánicos entre partes de casos o regiones de un ensamble a menos que el contacto sea especificado en el módulo de interacción; la simple proximidad física de dos superficies en un ensamble no es suficiente para indicar cualquier tipo de interacción entre las superficies. Las interacciones son objetos dependientes del paso, lo cual significa que se deben especificar los pasos de análisis en los cuales están activos. En este trabajo no se utilizó ninguna interacción [27].

6.6.1.6 Módulo Carga (Load).

El módulo carga permite especificar cargas, condiciones de frontera y campos. Las condiciones de cargas y condiciones de frontera son objetos dependientes del paso, lo que significa que se deben especificar los pasos de análisis en los cuales están activos; algunos campos son aplicados únicamente al inicio del análisis, mientras que otros son dependientes del paso [27].

Para los modelos realizados en este trabajo se utilizaron como condiciones frontera: el extremo izquierdo sin movimiento, y el extremo derecho utilizó para cada

paso el desplazamiento en x que presentó la probeta. En la Tabla 6.6 se enlistan los desplazamientos para cada uno de los pasos.

Tabla 6.6 Desplazamientos utilizados como condiciones frontera para cada uno de los pasos.

Paso	Desplazamiento en x (mm)
1	2.921
2	3.065
3	3.300
4	3.414
5	6.900
6	10.450

6.6.1.7 Módulo Malla (Mesh).

El módulo malla contiene herramientas que permiten generar una malla de elemento finito en un ensamble creado con ABAQUS/CAE. Están disponibles varios niveles de automatización y control de tal manera que se puede crear una malla que cumpla los requerimientos del análisis [27].

La malla del primer modelo es igual a la malla experimental de 2 mm x 2 mm (véase Figura 6.9), y para el segundo el mallado se realizó con un elemento triangular respetando los límites de grano (ver Figura 6.10). Al final de este paso contamos con el tipo de elemento, para el primero se trató de un elemento CPS8R (elemento bi-cuadrático 8 nodos integración reducida) y para el segundo es un elemento CP3 (elemento lineal triangular 3 nodos).

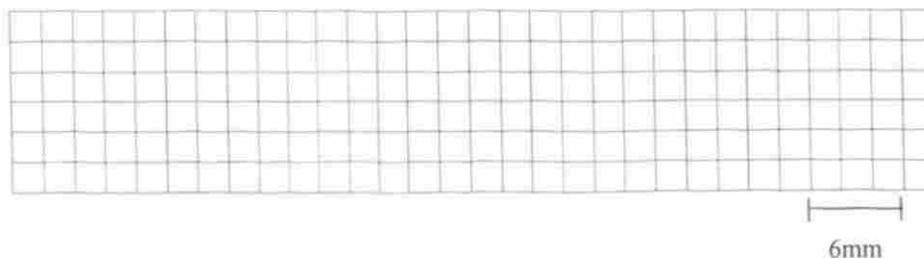


Figura 6.9 Esquema del mallado para el modelo MALLA.

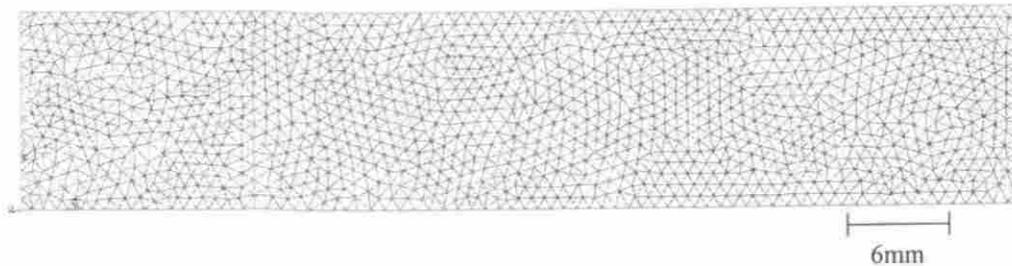


Figura 6.10 Esquema del mallado para el modelo GRANOS.

6.6.1.8 Módulo Trabajo (Job).

Una vez que se han finalizado todas las tareas envueltas en la definición del modelo, se usa el módulo de trabajo para analizar el modelo. El módulo de trabajo permite interactivamente enviar un trabajo para análisis y control del progreso. Además, múltiples modelos y corridas pueden ser enviados y controlados [27].

6.6.1.9 Módulo Visualización (Visualization).

El módulo de visualización provee una imagen gráfica del modelo de elemento finito y sus resultados. Se obtiene información del modelo y resultados a partir de la base de datos de salida; se puede controlar la información que se va a escribir a la base de datos de salida modificando la petición de salida en el módulo de paso [27].

6.6.1.10 Módulo Bosquejo (Sketch).

Los bosquejos son perfiles bidimensionales que son usados para ayudar a formar la geometría definiendo una parte ABAQUS/CAE nativa. Se usa el módulo de bosquejo para crear un esquema que defina una parte plana, una viga o una división o para crear un bosquejo que puede ser extruido, “barrido” o revolucionado para formar una parte tridimensional [27].

CAPITULO 7

RESULTADOS Y DISCUSION.

7.1 Introducción.

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental de la investigación, así como la discusión de éstos. Este capítulo se dividirá en las secciones: caracterización del material, propiedades mecánicas y simulación por elemento finito, la cual se subdividirá a su vez en el modelo MALLA y GRANOS.

7.2 Caracterización del material.

El material seleccionado es un acero de bajo carbono galvanizado por inmersión en caliente, al cual se le efectuó un análisis químico cualitativo y cuantitativo al acero base (sin recubrimiento), por medio de un espectrómetro de rayos X marca Rigaku modelo 3270 y para la evaluación del carbono se empleo un indicador LECO modelo 444. Ambos equipos se encuentran en las instalaciones de COMIMSA Saltillo. En la Tabla 7.1 se señalan los datos obtenidos de este análisis.

Tabla 7.1 Composición química del acero base (‰ en peso).

‰ C	‰ S	‰ Mn	‰ P	‰ Si	‰ Cr	‰ Ni	‰ Mo	‰ Cu	% V	‰ Nb	% Ti
0.064	0.005	0.03	< 0.010	0.010	<0.010	0.12	<0.010	0.103	<0.010	<0.010	<0.010

De la Tabla 7.1 se confirmó que se trata de un acero de bajo carbono tipo AISI 1005 [28].

Otro dato que se evaluó fue el espesor del recubrimiento, esto con el fin de poder considerar en el modelo matemático al recubrimiento como una sola capa de granos. Para esto se empleó un microscopio electrónico de barrido (SEM). En la Figura 7.1 se muestra la imagen obtenida en el SEM, se realizaron 4 lecturas (Tabla 7.2) del espesor obteniendo un promedio de 20 μm . Además, se practicó un análisis semi-cuantitativo de la composición del recubrimiento, véase el espectro de la Figura 7.2. Este espectro indica que el recubrimiento del acero estudiado es un galvanizado clásico, ya que su componente principal es el Zn, con trazos de Al y Fe los cuales se pueden deber al acero, ó bien el trazo de Al, puede ser por dos causas: el contenido de Al en el baño o la contaminación en el proceso metalográfico al pulir con alúmina.

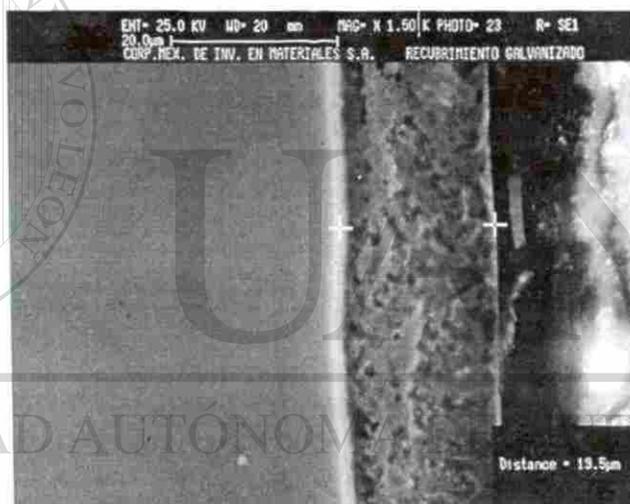


Figura 7.1 Micrografía del acero de bajo carbono galvanizado a 1500X.

Tabla 7.2 Mediciones por medio del SEM del espesor del recubrimiento de Zn del acero de bajo carbono.

Medición	Espesor (μm)
1	22
2	19.3
3	19.2
4	19.5
Promedio	20

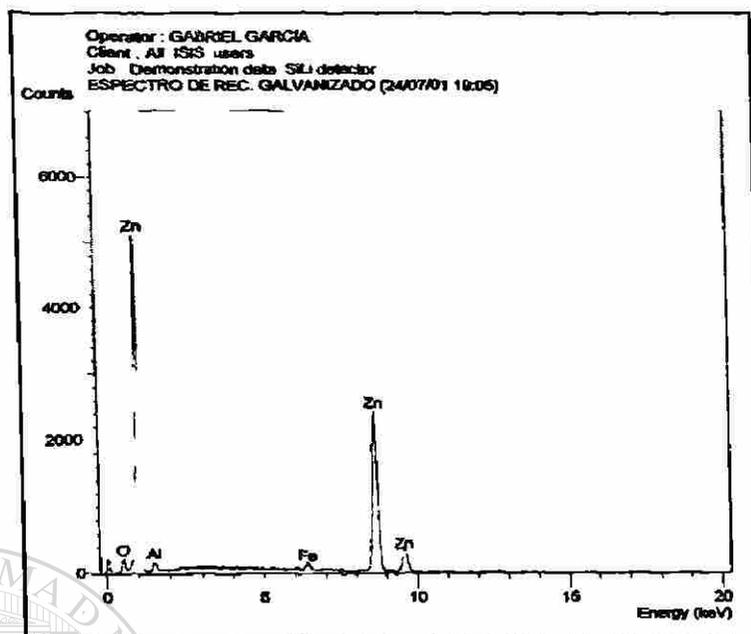


Figura 7.2 Espectro del análisis semi-cuantitativo del recubrimiento de zinc.

7.3 Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas utilizadas en los modelos por elemento finito, fueron obtenidas del promedio del ensayo de tensión de las 5 probetas ensayadas hasta la ruptura descritas en la sección 6.4. Cabe señalar que la probeta mallada y atacada químicamente se encuentra dentro de estas pruebas y no presenta cambios significativos. La curva esfuerzo-deformación tanto del promedio del ensayo de tensión de las 5 probetas, como de la probeta mallada se muestra en la Figura 7.3.

El juego de curvas esfuerzo-deformación del ensayo interrumpido de la muestra seleccionada (paso 1 espécimen B) para la simulación se presentan en la Figura 7.4. Aunque el primer paso se suponía que era de 180 s, se determinó que el tiempo real que se había deformado fue de sólo 21.70 s, debido al problema del deslizamiento de la probeta al momento de estar realizando la prueba.

El esfuerzo máximo registrado en el material original (Figura 7.3 línea de color rojo) fue de 352.64 MPa, mientras que el material mallado y atacado químicamente línea

de color azul de la Figura 7.3, presenta un esfuerzo máximo de 367.44 MPa , entre estos valores no existe una diferencia significativa (14.8 MPa), pero comparándolos con el esfuerzo máximo de la prueba interrumpida que fue de 400.10 MPa esta diferencia se incrementa a 47.46 MPa con respecto al material original y 32.66 MPa relacionándolo con el material mallado y atacado químicamente. Estas diferencias se deben al endurecimiento por deformación que experimenta la probeta al ser ensayada una y otra vez

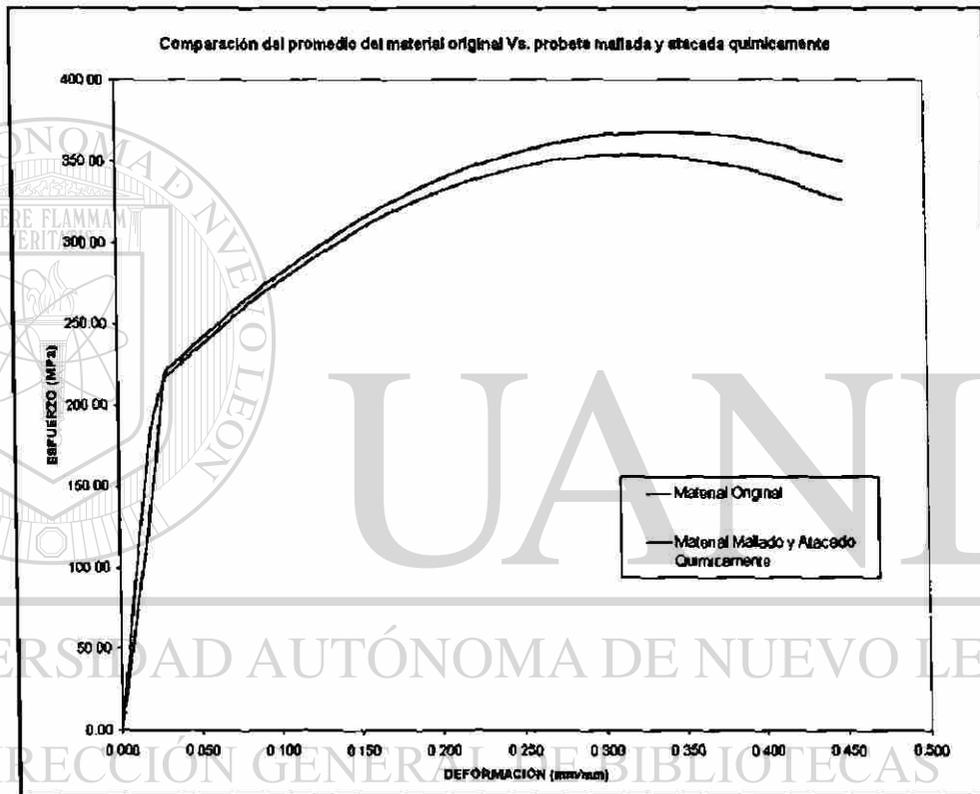


Figura 7.3 Comparativo de las curvas esfuerzo-deformación del promedio de las 5 probetas ensayadas del material original y de la probeta mallada y atacada químicamente.

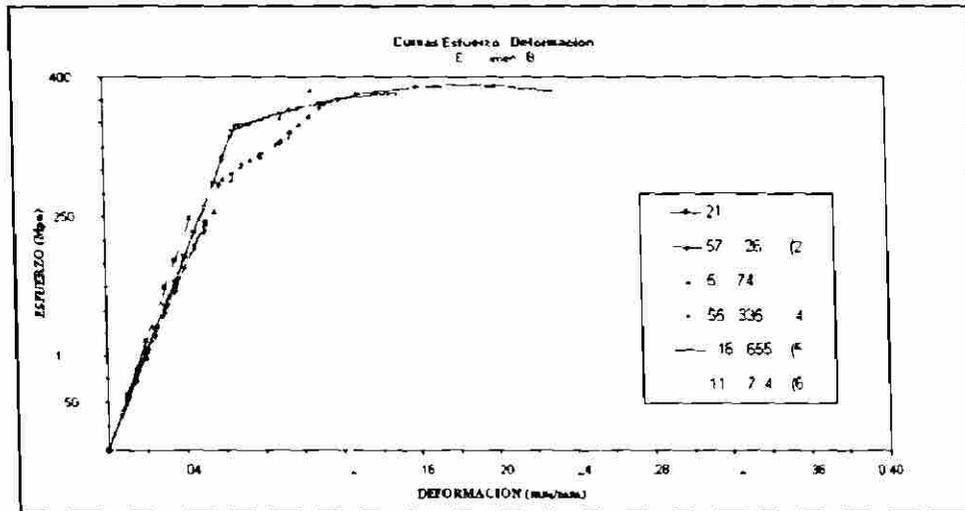


Figura 7.4 Curvas esfuerzo-deformación del ensayo interrumpido de la muestra a simular, se obtienen seis paros antes de llegar a la fractura, 1) 21.70 s, 2) 57.03 s, 3) 53.87 s, 4) 55.13 s, 5) 116.16 s y 6) 119.97 s.

7.4 Estimación de la deformación.

Se evaluó la deformación tanto en la malla como en los granos de la probeta, a continuación se presentan los cálculos obtenidos en el desarrollo experimental, así como la discusión de éstos.

Deformación en malla.

Se utilizaron dos técnicas para evaluar la deformación en la malla de 2 mm x 2 mm. La primera consistió en evaluar la deformación real de acuerdo a la fórmula,

$$\varepsilon = \frac{2}{3} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (7.1)$$

donde,

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0} + 1\right) \quad (7.2)$$

y

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (7.3)$$

Estas mediciones se realizaron solamente en x y y , y la deformación en z se considero despreciable.

La segunda forma para medir la deformación fue mediante un programa de Turbo Pascal, el cual con las coordenadas obtenidas del análisis de imagen de la probeta a simular 1B (véase la Figura 7.5), evalúa los componentes de la deformación y su deformación.

Los componentes de la deformación se evalúan con el cambio en longitud que sufre los nodos que componen la malla en la direcciones x y y , mediante la ecuación 7.2.

Para evaluar la deformación z se considera volumen constante, es decir,

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (7.4)$$

por lo tanto la deformación en z sera de

$$\varepsilon_z = -(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (7.5)$$

De los resultados obtenidos para cada nodo en sus tres componentes, el programa calcula un promedio de la deformación cuadro por cuadro, obteniendo los esquemas que se pueden apreciar en las Figuras 7.7, 7.8, y 7.9 especificados como ε_1 para x , ε_2 para y , ε_3 para z .

El programa tambien estima el esfuerzo cortante xy (γ_{xy} , o en las Figuras 7.7, 7.8, y 7.9 como γ_{12}).

Para finalmente calcular la deformación promedio mediante la fórmula,

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \left[\frac{1}{2} ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2) + \frac{3}{4} (\gamma_{12})^2 \right] \quad (7.6)$$

Tabla 7.3 Deformación real de cada paso de deformación.

Paso	1	2	3	4	5	6
ε (mm/mm)	0.03427	0.03649	0.03998	0.04194	0.08838	0.136930

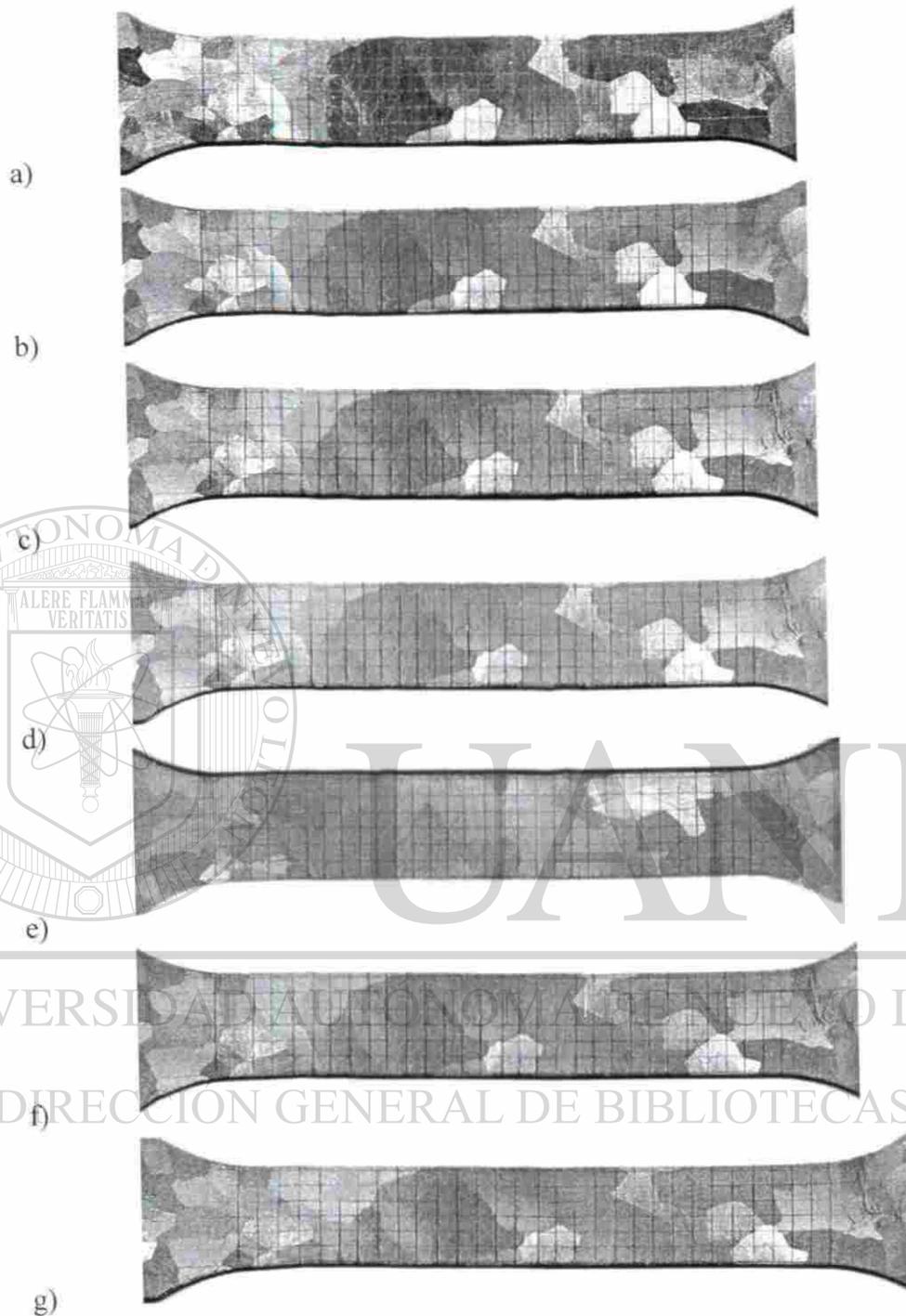


Figura 7.5 Secuencia de la probeta ensayada a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

En la Figura 7.6 y en la Tabla 7.4 se presentan los resultados de la deformación media de todos los pasos de deformación calculados por el programa en Turbo Pascal. Debido a que los ensayos se determinaron por tiempo y no por deslizamiento, para este

programa se omitieron 3 de los pasos (57.03 s, 53.87 s, 55.13 s) ya que la diferencia entre sus desplazamientos era muy pequeña. En la Figura 7.7 se muestran las componentes de deformación en x, y, z del paso 1, lo mismo se presenta en las Figura 7.8 y 7.9 para los pasos 5 y 6 respectivamente.

Tabla 7.4 Deformación media de los pasos 1, 5, 6, calculada por el programa Turbo Pascal,

Paso	1	5	6
ϵ (mm mm)	0.0400	0.101	0.153

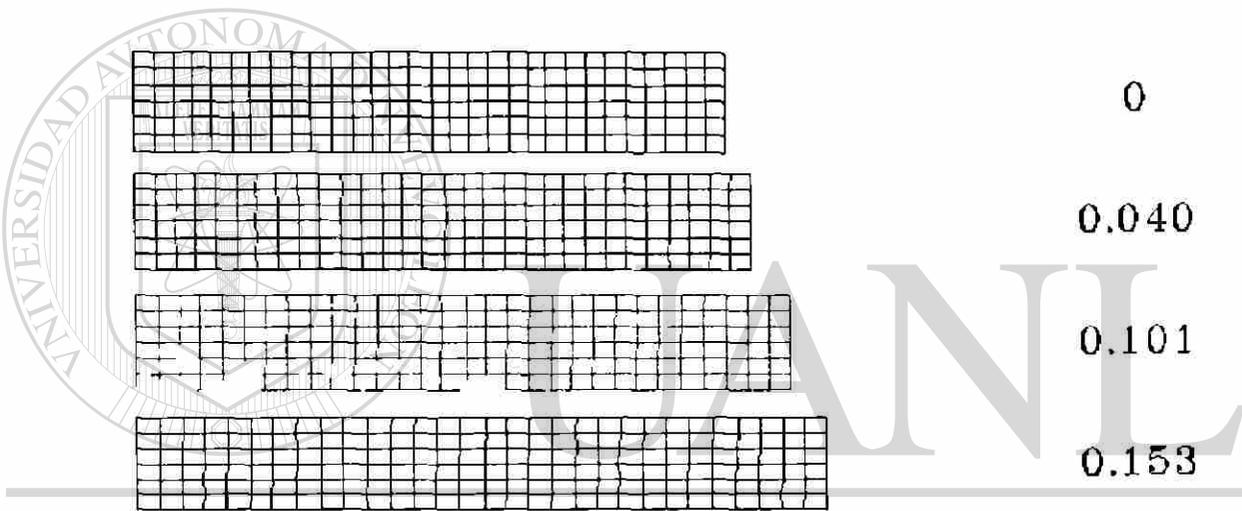


Figura 7.6 Mediciones de la deformación media en los diferentes pasos.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

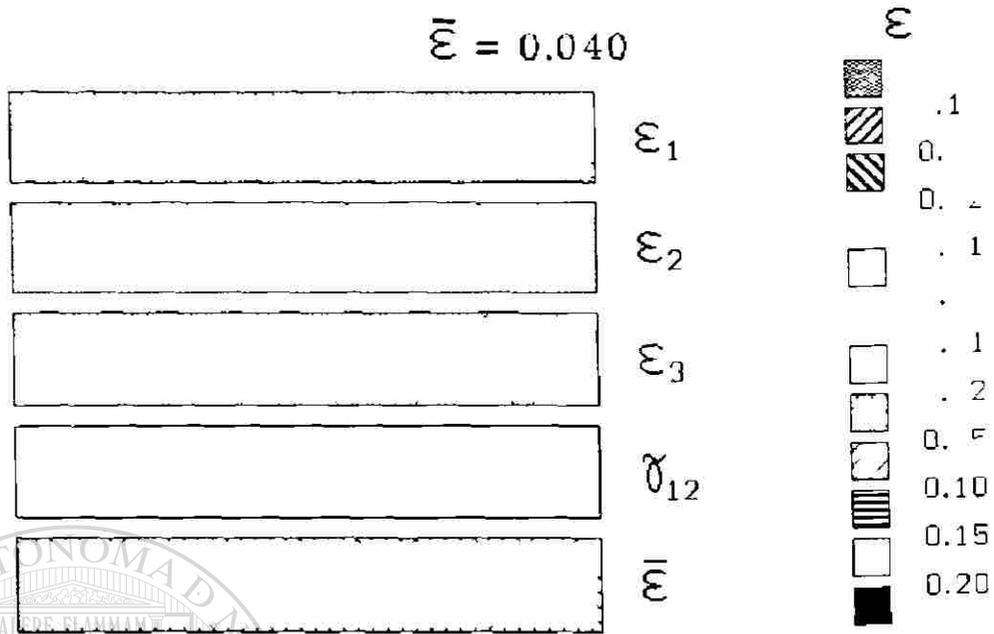


Figura 7.7 Mediciones de los componente de deformación en x, y, z en el paso 1.

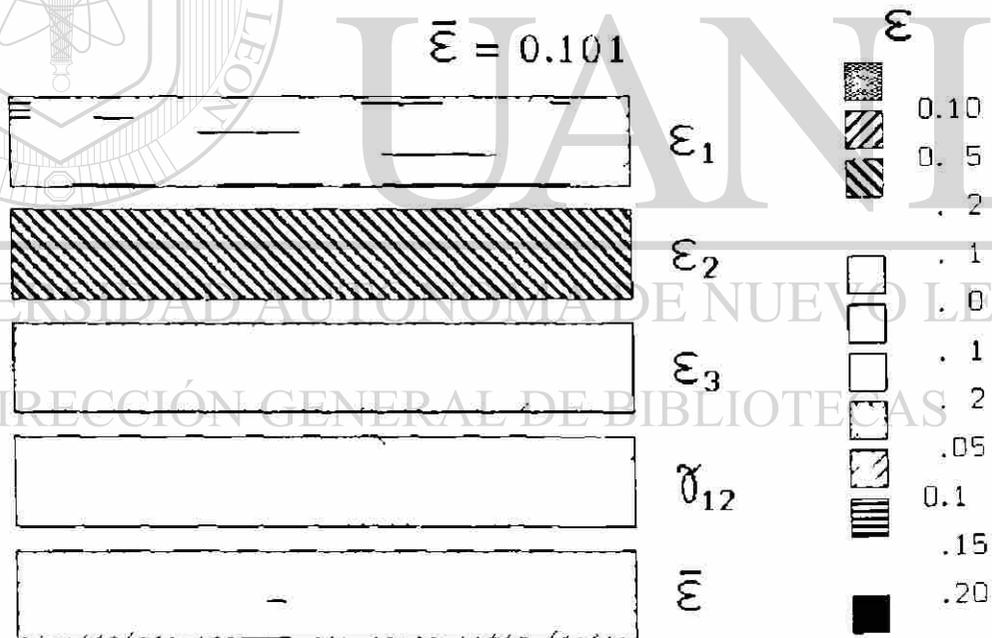


Figura 7.8 Mediciones de los componente de deformación en x, y, z en el paso 5.

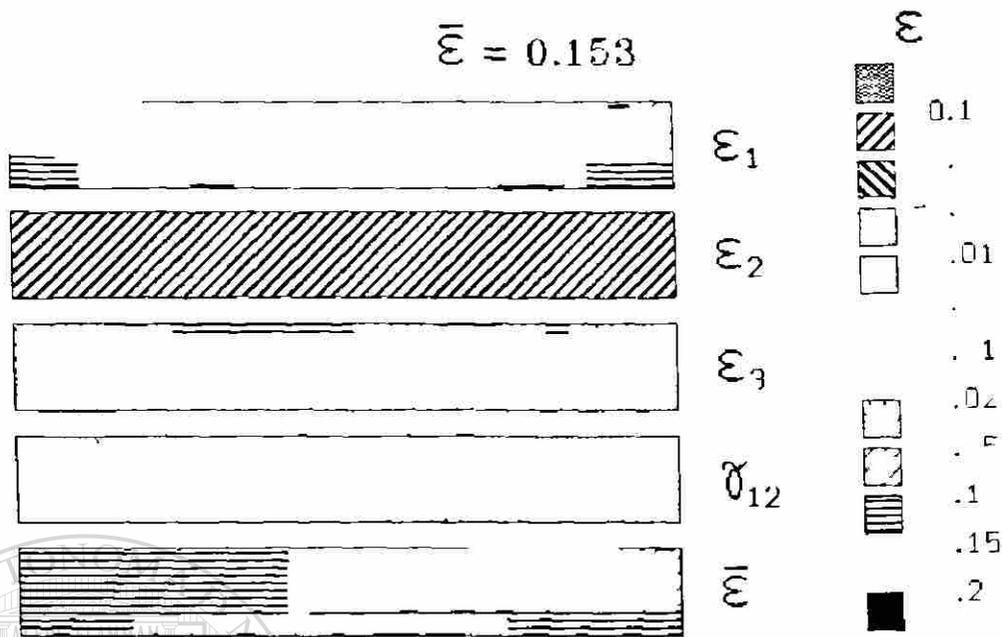


Figura 7.9 Mediciones de los componente de deformación en x , y , z en el paso 6.

Deformación en granos.

De acuerdo a la técnica de Gifkins y Hensler [21] para la estimación de la deformación de los granos, se midieron los anchos y alturas máximas de 15 granos de los 6 diferentes pasos de deformación y posteriormente se evaluaron sus promedios, utilizando para el cálculo la fórmula de la ecuación 5.4. Los resultados obtenidos de estas mediciones se resumen en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5 Tabla de las deformaciones equivalentes obtenidas mediante el método Gifkins y Hensler [21].

Paso	1	2	3	4	5	6
Deformación Equivalente (ϵ)	0.03868	0.03890	0.05378	0.05577	0.1041	0.1506

Examinando los resultados de las Tablas 7.3, 7.4 y 7.5, se observa diferencias, por ejemplo, en el paso 6 comparando la Tabla 7.3 con la 7.4 la diferencia es de 10.52 % y con respecto a la Tabla 7.5 es de 10.00 %, se puede observar que las medidas de la deformación de la Tabla 7.3 son mas pequeñas que las de las Tablas 7.4 y 7.5, lo cual se

debe a que en la Tabla 7.4 el programa de Turbo Pascal evalúa los tres componentes de la deformación, además de tomar en cuenta al esfuerzo cortante para cada uno de los puntos (nodos) que forman la malla, lo cual lleva a un valor más real de la deformación total que sufre la muestra. Y la Tabla 7.5 evalúa la deformación a partir del cambio de alto y ancho que sufren los granos al ser deformados una y otra vez.

7.5 Simulación por elemento finito mediante ABAQUS/CAE ^{MR}.

Como se mencionó se realizaron dos modelos, uno de acuerdo a la malla cuadrada de 2 mm x 2 mm dibujada en la sección entre marcas (60 mm) de las probetas, al cual se le denominó MALLA y el segundo que siguió el patrón de la forma y tamaño de los granos contenidos entre la misma zona entre marcas, el cual se llamó GRANOS.

Para ambos modelos se utilizaron las propiedades mecánicas que se describen en la Figura 7.3 (línea de color rojo) y los desplazamientos utilizados como condiciones frontera se describen la Tabla 6.6. Como se dijo anteriormente se utilizó un análisis estático, ya que ABAQUS permite por este tipo de análisis evaluar comportamientos tanto lineales como no lineales, siendo en este caso un comportamiento no lineal ya que en estos modelos se incluye la parte plástica del comportamiento del material.

Los datos de salida solicitados para ambos modelos fue el esfuerzo de acuerdo al esfuerzo equivalente Mises, definido como,

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_m \cdot \sigma_m} \quad (7.7)$$

donde $\sigma_m = \sigma_m - \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ y δ es la delta Kronecker.

Y la deformación de acuerdo a la deformación plástica equivalente que utiliza la fórmula,

$$\epsilon = \sqrt{\frac{2}{3} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} \quad (7.8)$$

Aunque se trata de modelos en dos dimensiones, ABAQUS toma en cuenta el espesor de la probeta.

Cabe señalar, que en ambos casos no se tomó en cuenta la respuesta elástica del material ni el endurecimiento por deformación que sufre la probeta al ser ensayada una y otra vez. ABAQUS calcula el endurecimiento por deformación (n) para la curva (propiedades) dada, lo que no calcula es el endurecimiento por deformación acumulado en cada paso de deformación.

7.5.1. Modelo MALLA.

Esfuerzo

En la Figura 7.10 se muestra la secuencia de la distribución de esfuerzos del modelo de la MALLA obtenido por FEM en diferentes pasos de deformación de acuerdo a los tiempos reales señalados en la Tabla 6.2. Posteriormente, se obtuvo la curva esfuerzo-deformación para un elemento de la parte media de la probeta (elemento 50) y punto de integración 3, la cual se muestra en la Figura 7.11 (línea color negro). además en ésta se puede observar una buena aproximación con el comportamiento del material original (línea de color rojo) obtenido experimentalmente.

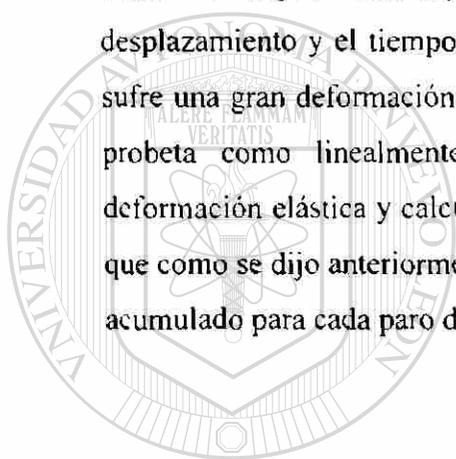
Comparando los esfuerzos máximos obtenidos por ABAQUS y los obtenidos en el ensayo de tensión interrumpido de la Figura 7.4 (Tabla 7.6). Se puede observar que en el primer paso el porcentaje de error entre ellos es aceptable (9.47%), debido a que en este paso el endurecimiento por deformación es despreciable, siendo lo único que afecta la recuperación elástica del material.

En los pasos 2, 3, 4 el porcentaje de error aumenta hasta en un 50.09%, esto se debe a que ABAQUS modela a deformaciones pequeñas un comportamiento idealmente plástico, en el cual se calcula la n de los datos del material dados, pero no calcula el endurecimiento por deformación que acumula la probeta al ser sometida a deformación.

ademas como son deformaciones pequeñas si existe una recuperacion elastica del material.

Si bien ABAQUS calcula el valor n del endurecimiento por deformación de la curva en sí, no evalúa esta para cada tiempo, para ello se necesitaría realizar 5 modelos diferentes con las propiedades de cada curva (Figura 7.4) y así ABAQUS podría evaluar el endurecimiento por deformación de cada una de éstas.

En los pasos 5 y 6 la diferencia entre los esfuerzos comienza a decrecer (25.76 y 17.33 % respectivamente), lo cual puede ser debido a que en estos pasos el desplazamiento y el tiempo a que está sujeta la probeta aumentan, es decir el material sufre una gran deformación, provocando que ABAQUS utilice el comportamiento de la probeta como linealmente endurecida por deformación, tomando en cuenta su deformación elástica y calculando la n para el material. El porcentaje de error se debe a que como se dijo anteriormente ABAQUS no calcula el endurecimiento por deformación acumulado para cada paro de tiempo.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

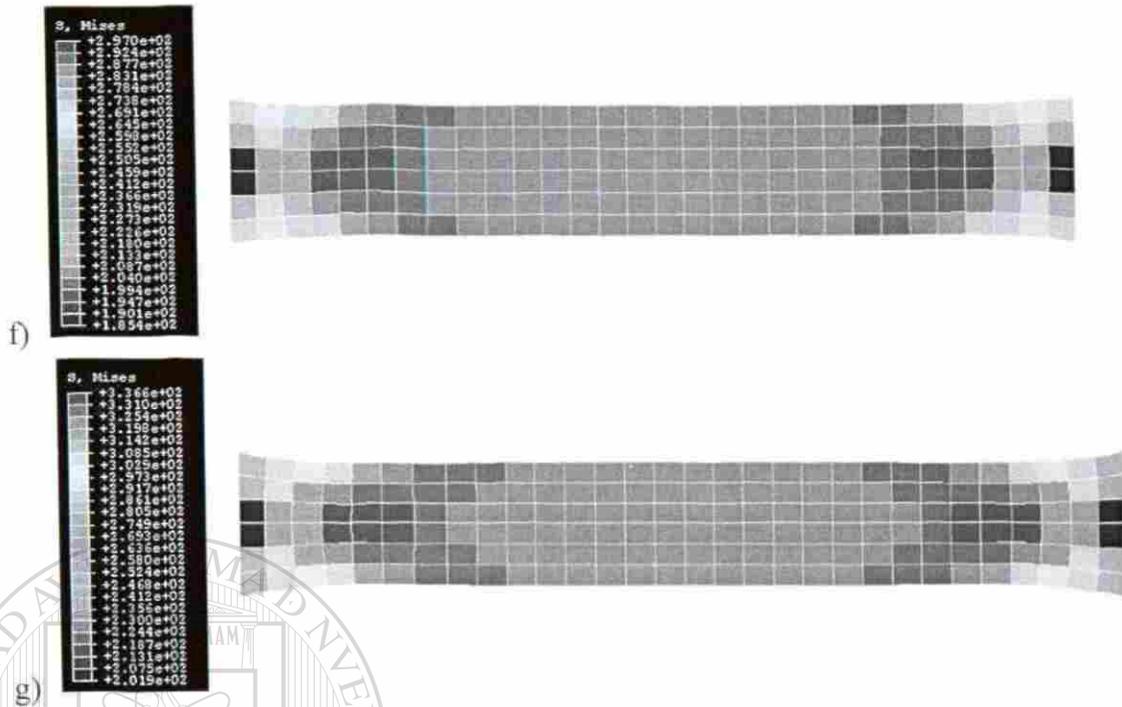


Figura 7.10 Secuencia de distribución de esfuerzos del modelo MALLA obtenida por FEM a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

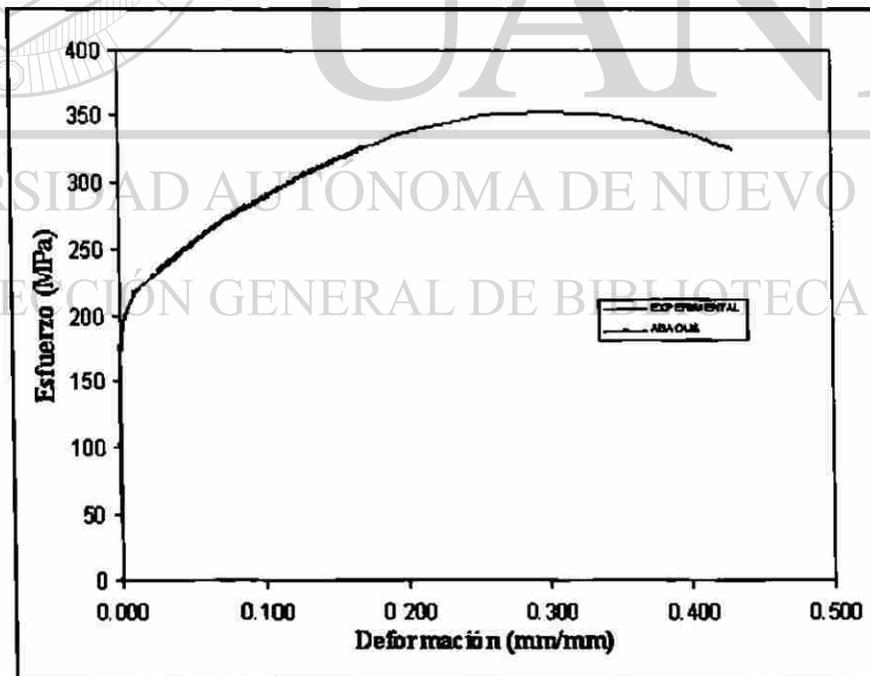


Figura 7.11 Gráfica comparativa de las curvas esfuerzo-deformación, obtenida experimentalmente de las 5 probetas ensayadas a la fractura y la generada por ABAQUS para el modelo MALLA.

Tabla 7.6 Comparación de los valores de esfuerzo máximo calculados experimentalmente y los calculados por ABAQUS para el modelo MALLA.

Paso	1	2	3	4	5	6
Experimental	215.9	374.9	393.5	361.6	400.1	396.3
ABAQUS	238.5	241.2	245.5	247.5	297.0	336.6
% de Error	9.476	55.43	59.57	46.10	25.76	17.73

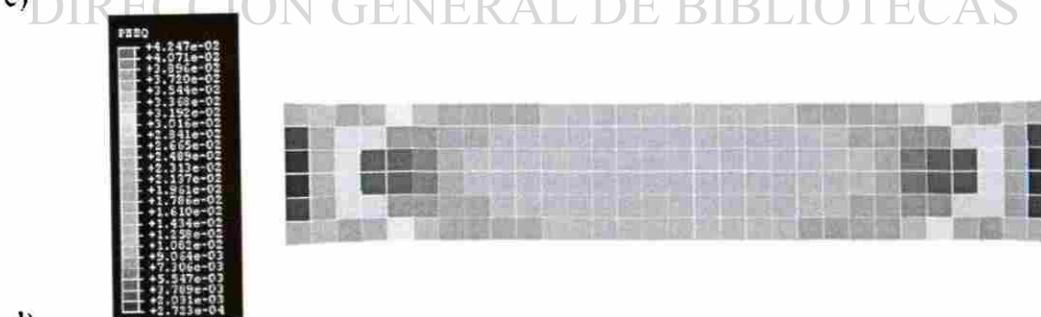
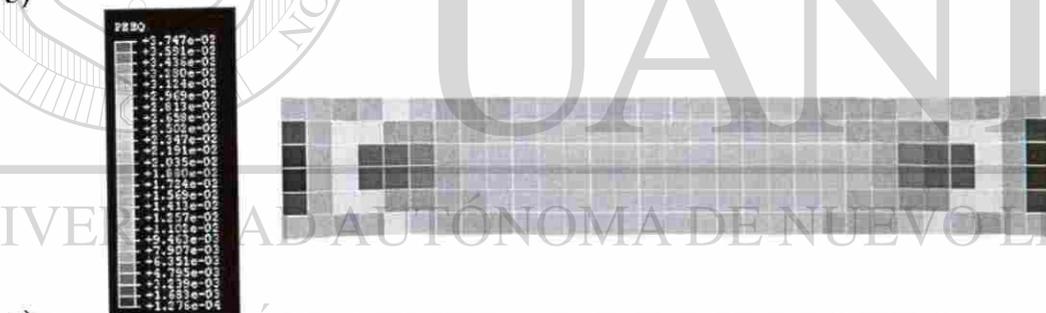
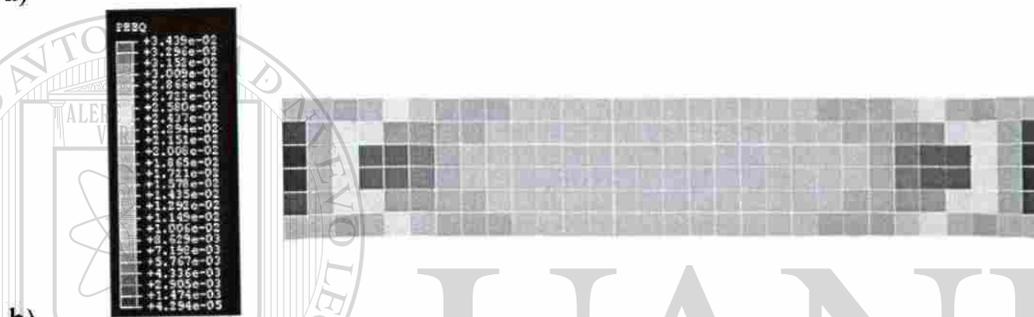
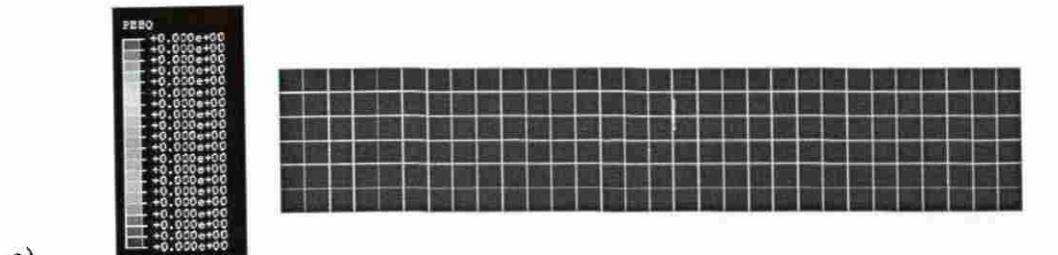
Deformación.

La Figura 7.12 muestra la secuencia de la distribución de deformación de la probeta del modelo MALLA. Como se mencionó anteriormente existieron dos formas de evaluar la deformación para este modelo, de acuerdo a la Tabla 7.7 que compara la deformación real de acuerdo a la ecuación 7.8. (despreciando la deformación en z) y la calculada por ABAQUS, en esta se puede observar una buena aproximación en los primeros 2 pasos (8.72% y 6.19% respectivamente) y posteriormente esta diferencia se eleva hasta un 17.16% en el paso 6. Además, se puede observar que del paso 1 al 5 el valor de la deformación calculada por ABAQUS es menor que lo deducido experimentalmente, esto se puede deber a que ABAQUS a pequeñas deformaciones, toma el modelo como idealmente plástico y no toma en cuenta la parte que corresponde a deformación elástica.

En los pasos 5 y 6 que se consideran largas deformaciones, las mediciones experimentales son menores que las calculadas por ABAQUS y el comportamiento del modelo cambia a linealmente endurecido por deformación, pero existen diferencias (10.59% y 17.16% respectivamente), debido a que ABAQUS no calcula el endurecimiento para cada paso de prueba, es decir en la prueba experimental existe una disminución de la ductilidad por el endurecimiento que sufre la muestra, lo cual se ve reflejado en los datos experimentales.

En cambio la Tabla 7.8 que compara la deformación media calculada por el programa de Turbo Pascal y la calculada por ABAQUS presenta una mejor aproximación, ya que este toma en cuenta las componentes de deformación en x , y , z .

siendo 21.2 % el máximo error, el cual se presenta en el paso 1. Este porcentaje de error se puede deber a la manera que ABAQUS simula el comportamiento a deformaciones pequeñas. ya que no toma en cuenta la deformación elastica y ni la influencia del esfuerzo cortante en xy del material.



Continúa....

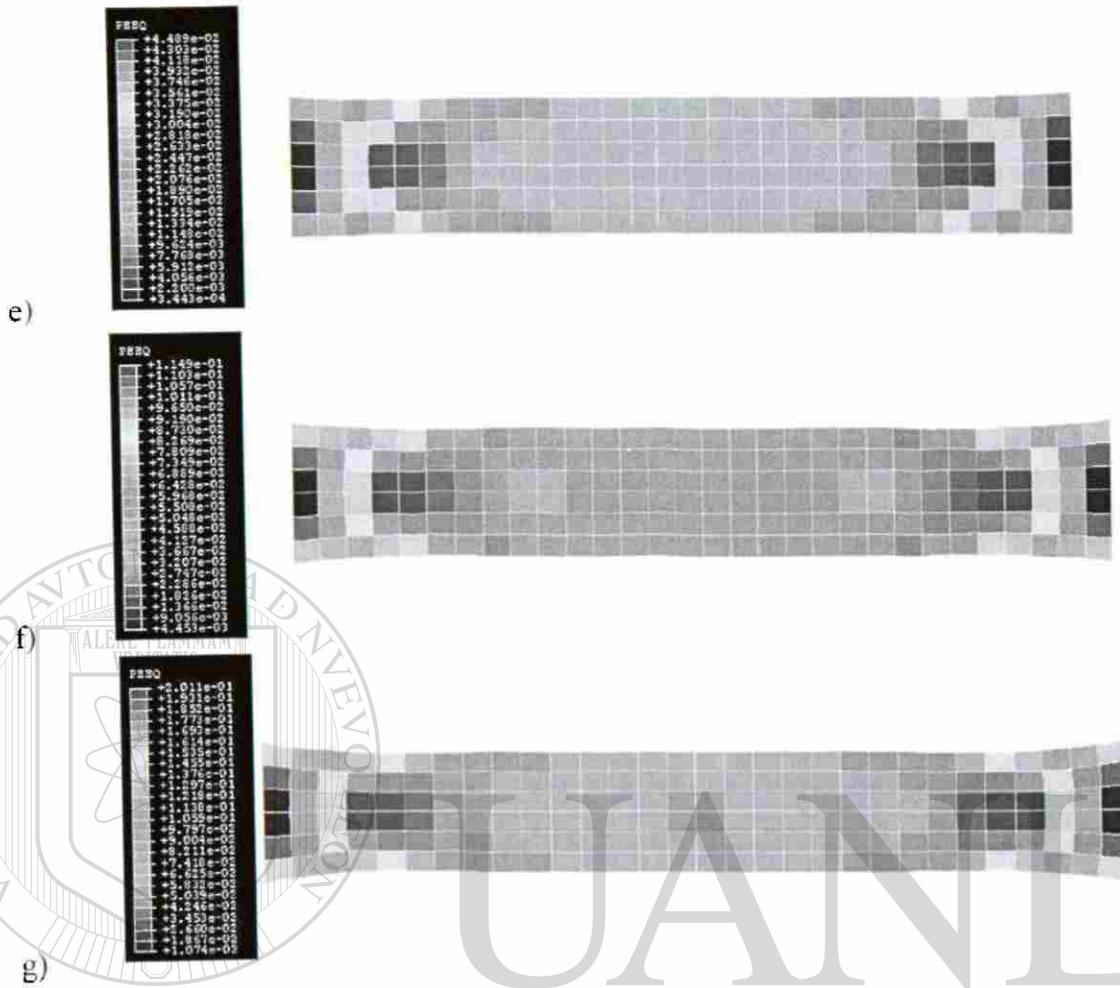


Figura 7.12 Secuencia de distribución de deformación del modelo MALI A obtenido por FEM a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

Tabla 7.7 Comparativo de la deformación real y la obtenida por FEM para cada paso de deformación.

Paso	1	2	3	4	5	6
Experimental	0.03427	0.03649	0.03998	0.04194	0.08838	0.13693
ABAQUS	0.03152	0.03436	0.03554	0.03746	0.09885	0.16530
% Error	8.72	6.19	12.49	10.68	10.59	17.16

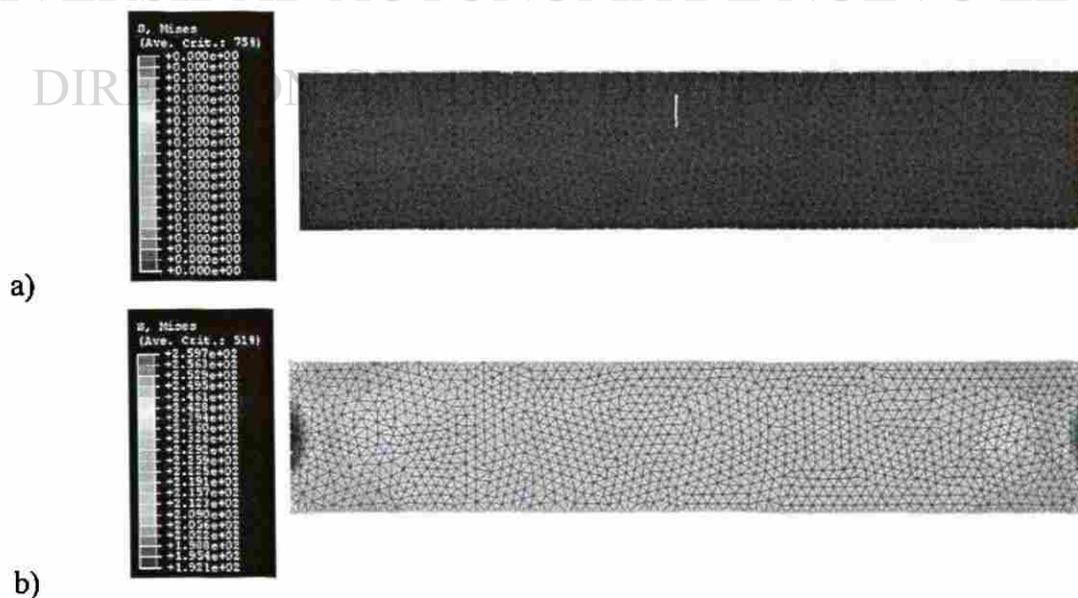
Tabla 7.8 Comparativo de la deformación media obtenida por el programa de Turbo Pascal y la obtenida por FEM para los pasos 1, 5 y 6.

Paso	1	5	6
Turbo Pascal	0.04000	0.1010	0.1530
ABAQUS	0.03152	0.0988	0.1653
% Error	21.2	2.17	7.44

7.5.2. Modelo GRANOS.

La Figura 7.13 muestra la secuencia de la distribución de esfuerzos del modelo GRANOS obtenida por FEM en diferentes pasos de deformación de acuerdo a los tiempos reales señalados en la Tabla 6.2. En la Figura 7.14 se muestra el comparativo entre la curva esfuerzo-deformación generada por ABAQUS (línea color negro) para un elemento de la parte media de la probeta (1321) en el punto de integración 2, y la curva experimental del material original (línea de color rojo de la Figura 7.3), pudiendo observarse una buena aproximación entre ellas.

Efectuando una comparación entre los esfuerzos máximos calculados por ABAQUS y los encontrados para cada paso en la prueba interrumpida, tal como se indican en la Tabla 7.9, se observa una mejor aproximación que el modelo MALLA (Tabla 7.6), esto se debe a que la malla es más fina ya que esta sigue el patrón del tamaño y forma de los granos. Aunque los porcentajes de error siguen siendo grandes, esto se debe básicamente a las mismas razones expuestas en el modelo MALLA, principalmente al hecho de que ABAQUS no calcula el endurecimiento por deformación para cada paso de tiempo.



Continúa...

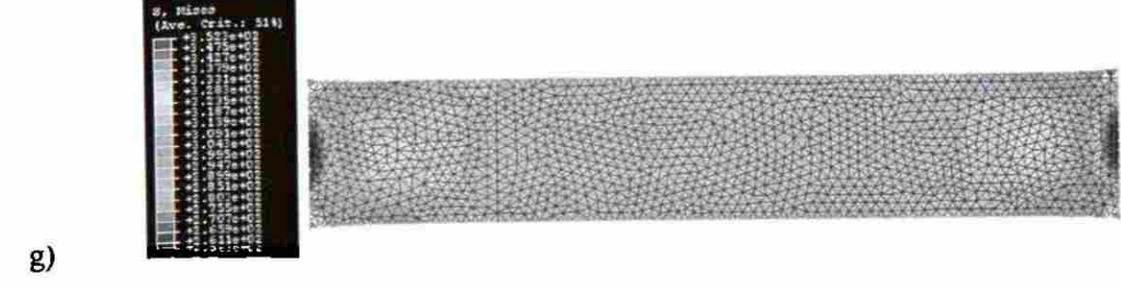
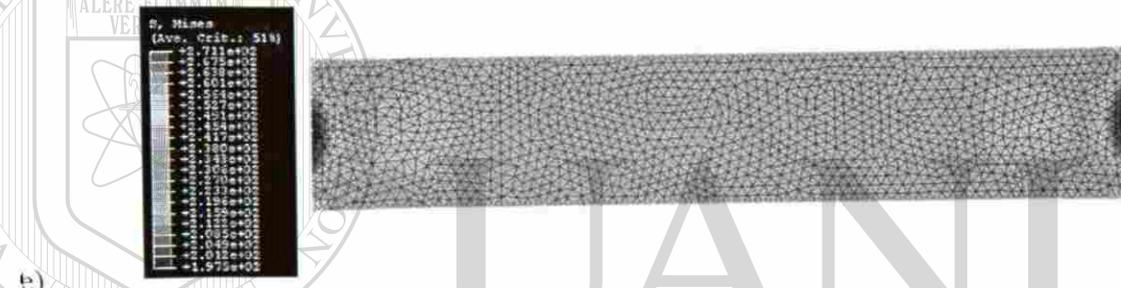
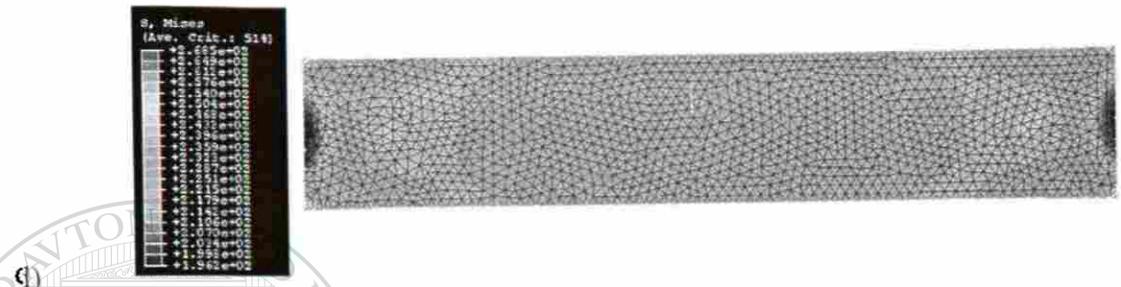
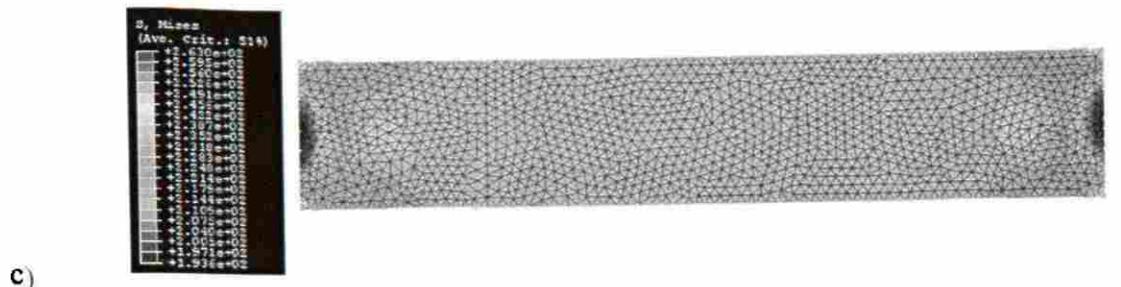


Figura 7.13 Secuencia de distribución de esfuerzos para el modelo GRANOS obtenida por medio de FEM a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

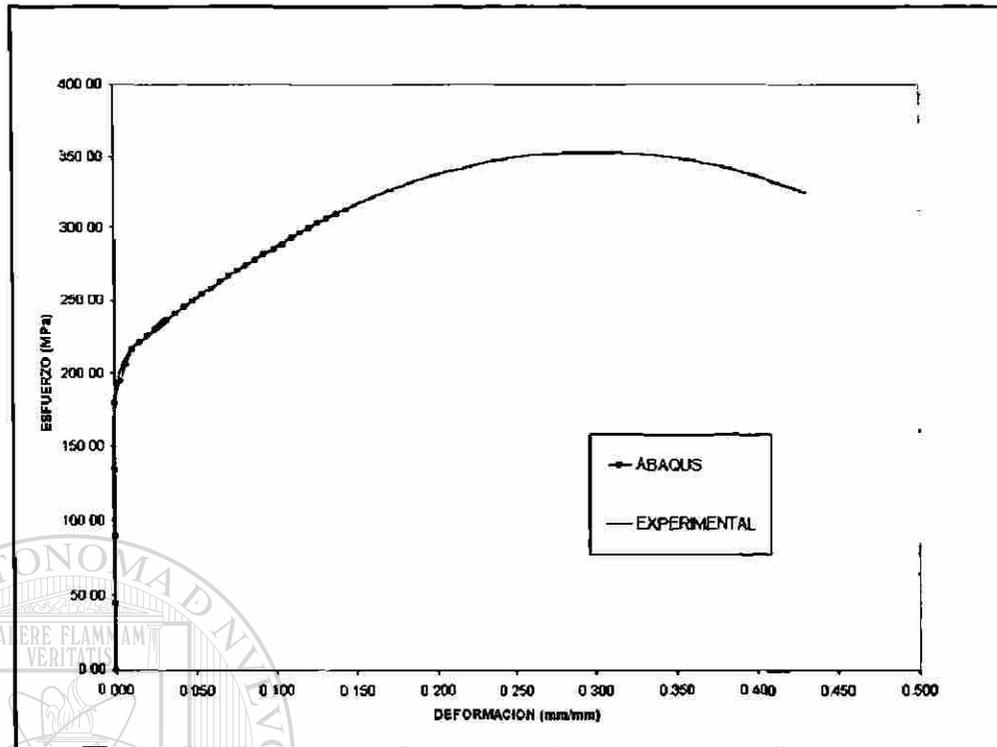


Figura 7.14 Gráfica comparativa de las curvas esfuerzo-deformación, obtenida experimentalmente y la generada por ABAQUS para el modelo GRANOS.

Tabla 7.9 Comparación de los valores de esfuerzo máximo calculados experimentalmente y los calculados por ABAQUS para el modelo GRANOS.

Paso	1	2	3	4	5	6
Experimental	215.9	374.9	393.5	361.6	400.1	396.3
ABAQUS	259.7	263.0	268.5	271.1	334.4	352.3
% de Error	20.28	42.54	46.55	33.38	16.42	11.10

Deformación

En la Figura 7.15 se observa la continuidad de la distribución de deformación de la muestra 1B del modelo GRANOS alcanzado por FEM a los diferentes tiempos de deformación. La forma de evaluar la deformación para este modelo fue de acuerdo a la técnica de Gifkins y Hensler [21], la Tabla 7.10 enlista los valores de deformación calculados por esta técnica en los diferentes pasos, de acuerdo al promedio de los 15 granos y el valor promedio obtenido de la simulación numérica por ABAQUS.

Al comparar los resultados se tienen porcentajes de error más pequeños que los registrados en el modelo MALLA.

En los pasos del 1 al 4 (pequeñas deformaciones) las mediciones experimentales son mayores que las calculadas por ABAQUS, teniendo un porcentaje de error máximo de 8.83 en el paso 3. Esto se debe a que como se dijo anteriormente en el modelo MALLA, ABAQUS a pequeñas deformaciones simula un comportamiento idealmente plástico, es decir solo toma en cuenta la deformación plástica que sufrió el material.

En los pasos 5 y 6 aunque sus diferencias son pequeñas (1.70 y 1.63 %), se puede observar que las mediciones experimentales son menores, básicamente se debe al hecho de que al estar ensayando una y otra vez la probeta ésta pierde ductilidad, dando como resultado estas diferencias.

Otro factor que hace que el modelo GRANOS es mejor que el modelo MALLA, es la formación de la malla respeta los límites de grano, haciéndose mas fina y por lo tanto mejora su aproximación. Es importante señalar que aunque la aproximación de los granos a una forma rectangular no es la ideal, si mejora la aproximación, dando un indicativo de que es pertinente seguir la deformación de los granos para encontrar la deformación total del material.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

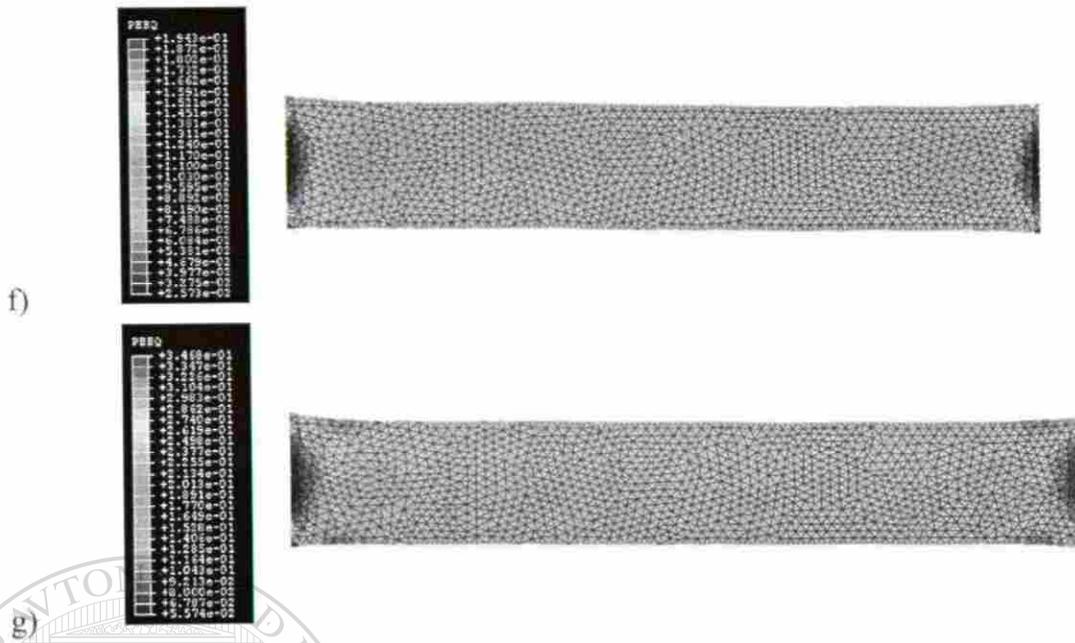


Figura 7.15 Secuencia de distribución de deformación del modelo GRANOS obtenido por FEM a diferentes paros de tiempo: a) 0 s, b) 21.70 s, c) 57.03 s, d) 53.87 s, e) 55.13 s, f) 116.16 s y g) 119.97 s.

Tabla 7.10 Comparación entre los valores de la deformación equivalente calculada experimentalmente y la calculada por el modelo numérico para cada paso.

Paso	1	2	3	4	5	6
Experimental	0.03868	0.03890	0.05333	0.05538	0.1046	0.1503
ABAQUS	0.03613	0.03881	0.04900	0.05450	0.1065	0.1528
% Error	7.05	0.231	8.83	1.61	1.81	1.63