



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco**

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL-NUMÉRICA DEL
ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN Y EL EFECTO BAUSCHINGER
EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO INOXIDABLE**

**T E S I S PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANUFACTURA PRESENTA:
ING. ARAFAT MOLINA BALLINAS**

**DIRECTORES: DR. JUAN MANUEL SANDOVAL PINEDA
DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA
MÉXICO D. F. DICIEMBRE 2009**





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 14:00 horas del día 8 del mes de Diciembre del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME UA para examinar la tesis de titulada:
Evaluación y determinación experimental-numérica del endurecimiento por deformación y el efecto Bauschinger en las propiedades mecánicas de un Acero Inoxidable

Presentada por el alumno:

<u>Molina</u> Apellido paterno	<u>Ballinas</u> materno	<u>Arafat</u> nombre(s)							
Con registro: <table border="1"> <tr> <td>B</td> <td>0</td> <td>7</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>6</td> <td>4</td> </tr> </table>			B	0	7	1	3	6	4
B	0	7	1	3	6	4			

Aspirante al grado de:

Maestro en Ingeniería de Manufactura

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. Juan Manuel Sandoval Pineda

Director de tesis

Dr. Guillermo Urriagoitia Sosa

Dr. Emmanúel Alejandro Merchán Cruz

Dr. Ricardo Gustavo Rodríguez Cañizo

Dr. Luis Armando Flores Herrera

EL PRESIDENTE DEL
COLEGIO

Dr. Jaime Pacheco Martínez
UNIDAD PROFESIONAL
SECCION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACION



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 8 del mes Diciembre del año 2009, el (la) que suscribe Arafat Molina Ballinas alumno (a) del Programa de Maestría en Ingeniería de Manufactura con número de registro B071364, adscrito a ESIME Unidad Azcapotzalco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Juan Manuel Sandoval Pineda y Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa y cede los derechos del trabajo intitulado Evaluación y determinación experimental-numérica del endurecimiento por deformación y el efecto Bauschinger en las propiedades mecánicas de un Acero Inoxidable, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección yased_83@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Arafat Molina Ballinas

ÍNDICE

Resumen	v
Abstract	vi
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	xii
Objetivo	xiii
Justificación	xiv
Introducción	1
Capítulo I	
I.1 Introducción	3
I.2 Endurecimiento por deformación y efecto Bauschinger	3
I.2.1 Observaciones del efecto Bauschinger	5
I.2.2 Explicación del efecto Bauschinger	7
I.3 Esfuerzos residuales	11
I.3.1 Clasificación de los esfuerzos residuales	11
I.3.2 Inducción de esfuerzos residuales mediante procesos de fabricación	12
I.3.3 Efecto de los esfuerzos residuales en los componentes mecánicos	14
I.3.4 Medición del campo de esfuerzos residuales	15
I.3.4.1 Métodos no destructivos	16
I.3.4.2 Métodos semi destructivos	16
I.3.4.3 Métodos destructivos	17
I.3.4.3.1 Método de Sach	17
I.3.4.3.2 Método de respuesta de grieta	17
I.4 Sumario	18

Capítulo II

II.1 Introducción	20
II.2 Propiedades mecánicas de los materiales	21
II.2.1 Resistencia mecánica	21
II.2.2 Ensayos mecánicos	22
II.2.2.1 Ensayo de tensión	22
II.2.2.2 Ensayo de compresión	23
II.2.2.3 Ensayo de flexión	23
II.2.3 Reforzamiento de materiales metálicos	25
II.2.3.1 Reforzamiento por solución solida	25
II.2.3.2 Reforzamiento por tamaño de grano	26
II.2.3.3 Reforzamiento por fases dispersas o partículas	26
II.2.3.4 Reforzamiento por dislocación	26
II.3 Endurecimiento por deformación	27
II.4 Cuatro puntos de flexión en un material elastoplástico	28
II.5 Criterios de cedencia	33
II.6 Curva esfuerzo-deformación	34
II.6.1 Comportamiento elastoplástico ideal del material	35
II.6.2 Comportamiento elástico linealmente endurecido	35
II.6.3 Relación Ramberg-Osgood	37
II.6.4 Modelo reológico del endurecimiento no lineal	38
II.7 Reglas de endurecimiento	39
II.7.1 Endurecimiento Isotrópico	40
II.7.2 Endurecimiento Cinemático	41

II.8 Esfuerzos residuales	41
II.10 Sumario	43
Capítulo III	
III.1 Introducción	44
III.2 Consideraciones para el análisis numérico	44
III.2.1 Descripción del problema	44
III.2.2 Datos de la viga para el análisis	46
III.2.3 Procedimiento	47
III.3 Casos de estudio	49
III.3.1 Primer caso de estudio (Material sin historia previa)	49
III.3.2 Segundo caso de estudio (Material pre-deformado ligero en tensión ($3\varepsilon_y$))	51
III.3.3 Tercer caso de estudio (Material pre-deformado severo en tensión ($7\varepsilon_y$))	56
III.4 Cálculo de los esfuerzos residuales	61
III.4.1 Método inverso incremental para medir el campo de los esfuerzos residuales	61
III.4.2 Método inverso, polinomial global para determinar el campo de esfuerzos residuales	64
III.4.3 Cálculo de las respuestas	64
III.5 Evaluación numérica de las respuestas	68
III.5.1 Primer caso para la evaluación numérica del CCM	69
III.5.2 Segundo caso para la evaluación numérica del CCM en viga con pre-deformado ligero	70
III.5.3 Tercer caso para la evaluación numérica del CCM en viga con pre-deformado severo	72
III.6 Sumario	74

Capítulo IV

IV.1 Introducción	76
IV.2 Manufactura de probetas	76
IV.3 Tratamiento térmico	78
IV.4 Instrumentación de probetas	80
IV.5 Dispositivos para realizar los ensayos experimentales	83
IV.5.1 Banco de ensayos de cuatro puntos de flexión	83
IV.5.2 Dispositivo para ensayos de compresión	84
IV.5.3 Equipo de electroerosión para aplicar el CCM	85
IV.6 Evaluación de esfuerzos residuales en probetas recocidas	86
IV.7 Caracterización de las propiedades mecánicas del material	89
IV.8 Evaluación del campo de esfuerzos residuales en flexión pura	91
IV.9 Manipulación de las propiedades mecánicas y del campo de esfuerzos residuales	93
IV.9.1 Obtención de las propiedades mecánicas con historia previa en tensión	93
IV.9.2 Evaluación del campo de esfuerzos residuales con historia previa en tensión	95
IV.9.3 Obtención de las propiedades mecánicas con historia previa en compresión	99
IV.9.4 Evaluación del campo de esfuerzos residuales con historia previa en compresión	101
IV.10 Sumario	105
Discusiones, conclusiones y trabajos futuros	106
Referencias	109

Resumen.

La manipulación de las propiedades mecánicas de los materiales, recientemente ha tomado una gran importancia. Su trascendencia radica en el incremento de la vida útil del componente, lo cual es factible por medio del endurecimiento por deformación y la inducción de esfuerzos residuales benéficos.

En este trabajo de investigación se presenta el análisis numérico y el desarrollo experimental, realizado sobre la caracterización de un Acero Inoxidable AISI 316L. La relevancia de este tipo de estudios, es que se presenta una nueva metodología para incrementar la vida útil del componente. Alterando las propiedades mecánicas del espécimen, es posible retardar el surgimiento o interrumpir la propagación de grietas.

Asimismo, se muestra la manipulación tanto de las propiedades mecánicas como del campo de esfuerzos residuales, mediante la aplicación de cargas homogéneas y no homogéneas para disminuir la probabilidad de falla de los componentes. Además, se propone el ensayo de cuatro puntos de flexión como método de obtención de la curva esfuerzo-deformación, tanto de tensión como de compresión. La evaluación numérica se realiza utilizando el método de elementos finitos y el desarrollo experimental se realiza en dos partes, primero mediante ensayos mecánicos de tensión, compresión y flexión para la manipulación de las propiedades mecánicas, y después se realiza el método de respuesta de grieta (CCM) utilizando una máquina electro erosionadora, para obtener el campo de esfuerzos residuales.

Abstract.

Material mechanical properties manipulation has recently been extremely important. Its relevance is based on improving the service life in the components. This is possible by applying strain hardening techniques and /or inducing beneficial residual stresses.

In this work, is presented a numerical an experimental analysis concerning the characterization of a stainless steel *AISI 316L*. The importance of this kind of studies, is that a new methodology that can be use to improve the mechanical resistance of the material. By altering the mechanical properties of the material, it could be possible to delay the nucleation o interrupt the propagation of cracks.

Also, it is presented by applying numerical tools, the manipulation of homogeneous and non homogeneous loading to vanish the possibility of failure. In the same sense, bending tests are proposed to provide tensile and compressive stress profile. Numeric evaluation is done using the Finite Element Method, experimental design is achieved in two parts. The first one is using the tensile, compression and flexion tests to manipulate the mechanical properties. As a second step considers the Crack Compliance Method to obtain the residual stress.

Índice de figuras

Figura I.1 Curva esfuerzo-deformación mostrando el endurecimiento por deformación y el efecto Bauschinger	4
Figura I.2 Simplificación esquemática de la teoría de Heyn	8
Figura I.3 Teoría de Heyn	9
Figura I.4 Superposición de esfuerzos residuales	13
Figura I.5 Método de respuesta de grieta aplicado a una viga prismática	17
Figura II.1 Prótesis de cadera con cabeza femoral de acero inoxidable AISI 316L	19
Figura II.2 Máquina para ensayos de tensión	22
Figura II.3 Barra flexionada bajo cuatro puntos de flexión	23
Figura II.4 Diagrama tensión-compresión en una barra flexionada	24
Figura II.5 Reforzamiento por solución sólida a). Átomo intersticial, b). Átomo sustitucional.	25
Figura II.6 Elemento con sección rectangular	27
Figura II.7 Diagrama esfuerzo-deformación para un material elastoplástico idealizado	27
Figura II.8 Distribución de esfuerzos en zona elástica	28
Figura II.9 Comportamiento elastoplástico del material	29
Figura II.10. Comportamiento plástico del elemento	30
Figura II.11 Curvas esfuerzo-deformación, a) Comportamiento elastoplástico perfecto, b) Comportamiento elástico linealmente endurecido	33
Figura II.12 Modelo de endurecimiento no lineal de la curva esfuerzo-deformación	37
Figura II.13 Representación de la regla de endurecimiento isotrópico	39
Figura II.14 Representación de la regla de endurecimiento cinemática	40
Figura II.15 Obtención de los esfuerzos residuales, a). Fase de carga, b). Fase de descarga, c). Método de superposición	41
Figura III.1 Viga prismática propuesta para la evaluación numérica	44
Figura III.2 Discretización de la viga	44
Figura III.3 Comportamiento mecánico del material obtenido experimentalmente	46
Figura III.4 Modelo de cuatro puntos de flexión	47
Figura III.5 Pre-deformado de la viga en ANSYS	47

Figura III.6 Simulación de viga flexionada en ANSYS	48
Figura III.7 Aplicación de carga en material sin historia previa	49
Figura III.8 Esfuerzos residuales en material sin historia previa	50
Figura III.9 Esquema de los esfuerzos residuales por el MEF	50
Figura III.10 Deformación homogénea del material	51
Figura III.11 Segundo caso de estudio. a) Aplicación de carga en el material con pre-deformado axial ligero en tensión. b) Correspondiente simulación de viga flexionada con historia previa.	52
Figura III.12 Descarga del segundo caso de estudio. a) Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado ligero en tensión. b) Correspondiente simulación de esfuerzos residuales por MEF.	53
Figura III.13 Segundo caso de estudio con pre-carga en compresión. a) Aplicación de carga en material con pre-deformado axial ligero en compresión. b) Correspondiente simulación de viga flexionada con historia previa.	54
Figura III.14 Descarga del segundo caso de estudio con pre-carga en compresión. a) Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado ligero en compresión. b) Correspondiente simulación de esfuerzos residuales por MEF.	55
Figura III.15 Tercer caso de estudio. a) Aplicación de carga en el material con pre-deformado axial severo en tensión. b) Correspondiente simulación de viga flexionada con historia previa.	56
Figura III.16 Descarga del tercer caso de estudio. a) Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado severo en tensión. b) Correspondiente simulación de esfuerzos residuales por MEF.	57
Figura III.17 Tercer caso de estudio con pre-carga en compresión. a) Aplicación de carga en material con pre-deformado axial severo en compresión. b) Correspondiente simulación de viga flexionada con historia previa.	58
Figura III.18 Descarga del tercer caso de estudio con pre-carga en compresión. a) Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado severo en compresión. b) Correspondiente simulación de esfuerzos residuales por MEF.	59
Figura III.19 Cuerpo en 2D con un corte profundo para liberar esfuerzos residuales.	60

Figura III.20 Medición de la deformación ϵ cerca del corte en la cara superior y sobre la cara posterior.	63
Figura III.21 Tira metálica sometida a una grieta en el borde para la superficie de carga y fuerzas virtuales.	64
Figura III.22 Relajación de los esfuerzos mediante CCM.	67
Figura III.23 Curva obtenida del relajamiento de la deformación, sin historia previa.	68
Figura III.24 Comparación del campo de esfuerzos residuales, sin historia previa.	69
Figura III.25 Curvas obtenidas del relajamiento de la deformación, pre-deformado ligero.	70
Figura III.26 Comparación del campo de esfuerzos residuales, pre-deformado ligero en tensión.	70
Figura III.27 Comparación del campo de esfuerzos residuales, pre-deformado ligero en compresión.	71
Figura III.28 Curvas obtenidas del relajamiento de la deformación, pre-deformado severo.	
Figura III.29 Comparación del campo de esfuerzos residuales, pre-deformado severo en tensión.	
Figura III.30 Comparación del campo de esfuerzos residuales, pre-deformado severo en compresión.	
Figura IV.1 Probeta utilizada en la investigación	76
Figura IV.2 Procesos de manufactura de las probetas	77
Figura IV.3 Paquetes de probetas que se sometieron al tratamiento térmico de recocido	78
Figura IV.4 Horno empleado para el tratamiento térmico	79
Figura IV.5 Colocación de las galgas extensométricas	80
Figura IV.6 Herramientas para el pegado de la galga extensométrica	80
Figura IV.7 Posición de la galga	81
Figura IV.8 Soldadura de cables a la galga	82
Figura IV.9 Banco de ensayos de cuatro puntos de flexión	83
Figura IV.10 Dispositivo de compresión de probetas	84
Figura IV.11 Proceso de electroerosión	85

Figura IV.12	Electroerosionado de las probetas	86
Figura IV.13	Curva de relajación de las probetas recocidas	86
Figura IV.14	Campo de esfuerzos residuales en vigas recocidas	87
Figura IV.15	Recubrimiento de las galgas extensométricas	87
Figura IV.16	Posicionamiento de la probeta durante el electroerosionado	88
Figura IV.17	Ensayo de cuatro puntos de flexión	88
Figura IV.18	Curva carga-deformación del ensayo de cuatro puntos de flexión	89
Figura IV.19	Curva esfuerzo-deformación del ensayo de cuatro puntos de flexión	90
Figura IV.20	Curva de relajación de la deformación en probetas sin historia previa	91
Figura IV.21	Campo de esfuerzos residuales en probeta sin historia previa	91
Figura IV.22	Comparación de campos de esfuerzo residuales en probetas sin historia previa	92
Figura IV.23	Deformado axial en tensión de la probeta	93
Figura IV.24	Curva esfuerzo-deformación con pre-deformado de 5700 $\mu\epsilon$ en tensión	93
Figura IV.25	Curva esfuerzo-deformación con pre-deformado de 13300 $\mu\epsilon$ en tensión	94
Figura IV.26	Curva de relajación con pre-deformado ligero en tensión	95
Figura IV.27	Curva de relajación con pre-deformado severo en tensión	95
Figura IV.28	Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado de 5700 $\mu\epsilon$ en tensión	96
Figura IV.29	Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado de 13300 $\mu\epsilon$ en compresión	97
Figura IV.30	Comparación de métodos con pre-deformado en tensión de 5700 $\mu\epsilon$	97
Figura IV.31	Comparación de métodos con pre-deformado en tensión de 13300 $\mu\epsilon$	98
Figura IV.32	Deformado axial en compresión de la probeta	99
Figura IV.33	Curva esfuerzo deformación con pre-deformado de 5700 $\mu\epsilon$ en compresión	99
Figura IV.34	Curva esfuerzo deformación con pre-deformado de 13300 $\mu\epsilon$ en compresión	100
Figura IV.35	Curva de relajación con pre-deformado ligero en compresión	101
Figura IV.36	Curva de relajación con pre-deformado severo en compresión	101
Figura IV.37	Campo de esfuerzos residuales con historia previa de 5700 $\mu\epsilon$ en	102

compresión

Figura IV.38 Campo de esfuerzos residuales con historia previa de 13300 $\mu\epsilon$ en 102

compresión

Figura IV.39 Comparación de métodos con pre-deformado en compresión de 5700 $\mu\epsilon$ 103

Figura IV.40 Comparación de métodos con pre-deformado en compresión de 13300 $\mu\epsilon$ 103

Índice de tablas

Tabla III.1	Propiedades mecánicas del Acero Inoxidable	45
Tabla III.2	Comportamiento del material obtenido de forma experimental	45
Tabla IV.1	Dimensiones de la probeta para el ensayo de cuatro puntos de flexión	76
Tabla IV.2	Composición química del material	78
Tabla IV.3	Propiedades mecánicas obtenidas del material	90

Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de investigación es analizar el efecto y variación en las propiedades mecánicas y el campo de los esfuerzos residuales de un Acero Inoxidable AISI 316L (que es utilizado en la manufactura de implantes biomecánicos) cuando previamente el material ha sido sometido a una predeformación plástica homogénea. El estudio comprende el desarrollo de forma experimental y numérica.

Para lograr este objetivo general se proponen los siguientes objetivos particulares.

Objetivos particulares

- Aplicación del ensayo de cuatro puntos de flexión para la caracterización de las propiedades mecánicas de un elemento con o sin historia previa
- Determinar la influencia del pre-deformado homogéneo en las propiedades mecánicas del elemento
- Manipulación del campo de los esfuerzos residuales mediante el pre-deformado homogéneo
- Evaluación numérica de la regla de endurecimiento cinemática en el elemento mecánico

Justificación

Los materiales utilizados en componentes biomecánicos necesitan ser caracterizados en forma real para cuantificar los parámetros de elasticidad y plasticidad que son utilizados en su manufactura. El conocimiento de estos parámetros permite realizar los análisis más reales de las condiciones de esfuerzos y deformaciones pertinentes y con ello proponer diseños mecánicos más confiables y con vida útil más larga.

El fenómeno de deformación homogénea más allá del punto de cedencia, conocido también como endurecimiento por deformación, hace más resistente a los materiales dúctiles. Debido a un aumento en el esfuerzo de cedencia y por lo tanto un aumento en el límite elástico, por otro lado, también ocasiona una alteración en el campo de esfuerzos residuales.

Introducción

Los estudios de ingeniería, especialmente en la mecánica de materiales, se enfocan en entender la resistencia y el desempeño físico de los componentes mecánicos, ya sean, estructuras, engranes, ejes, etc., cuando estos están sometidos a cargas. El estudiante de ingeniería aprende a realizar diseños de piezas mecánicas dentro del rango elástico y con un factor de seguridad. No obstante no se preocupa de que es lo que pasa cuando el material entra a la zona plástica por efecto de la aplicación de un agente externo, esta omisión influye mucho en los diseños, ya que en los procesos de manufactura se sobrepasa el punto de cedencia del material, cuando estos se someten a procesos de conformado con o sin arranque de viruta, y procesos de origen térmico como los son: soldadura y fundición, alterando así el estado inicial del material, es decir, se les induce historia previa.

Tradicionalmente los procesos de manufactura se realizaban de manera secuencial, primero el departamento de diseño realizaba los planos de la pieza a manufacturar, después estos planos eran enviados a los diferentes departamentos de la organización, como son: departamento de materiales y producción. Como se puede observar todo se realiza de forma separada, por lo que existen consideraciones que no se toman en cuenta en la etapa de diseño, como lo son: el fortalecimiento del material por medio de medios mecánicos, como lo es el endurecimiento por deformación, y los efectos que causan los procesos de manufactura en el componente mecánico, como los son los esfuerzos residuales, los cuales pueden ser beneficios cuando son en compresión o dañinos cuando son en tensión.

En la presente investigación se toma en cuenta lo descrito en los párrafos anteriores, se realiza una caracterización de las propiedades mecánicas de un material de grado biomecánico, esto es, para realizar diseños más confiables y a un menor costo de producción. La caracterización se lleva a cabo mediante la aplicación de cargas homogéneas y no homogéneas más allá del punto de cedencia. Las cargas homogéneas son aquellas que actúan con la misma intensidad en todo el componente, como lo son las cargas axiales. Las cargas no homogéneas, son aquellas que no están distribuidas en todo el componente, actuando con mayor intensidad en la zona donde es aplicada, es importante mencionar que estas son la mayor parte de las cargas que se aplican durante los procesos de manufactura y durante la vida útil del elemento.

Para la realización de la investigación, primero se lleva acabo una recopilacion de los trabajos anteriores sobre la aplicación de los dos tipos de cargas utilizados en la caracterización mecánica, esto se ve en el capítulo I. En el capítulo II se describe la teoría utilizada para realizar el análisis. En el capítulo III, se realiza el análisis numérico de la investigación, esto es, para tener una idea aproximada del comportamiento mecánico del material. En el Capítulo IV, se realiza el desarrollo experimental que es el comportamiento real del material bajo este tipo de cargas. Se comparan ambos metodos obteniendo resultados similares corroborando un análisis con otro.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

I.1.- Introducción

En el diseño de componentes mecánicos, los análisis se enfocan en la aplicación de agentes externos que generan esfuerzos dentro de la zona elástica. Es decir, que el efecto no exceda el esfuerzo de cedencia. Se ha observado que aunque los cálculos de diseño sean correctos, el comportamiento del material no es el esperado, debido a que se considera el estado de esfuerzos inicial como ideal o inexistente. Lo que se entiende por no considerar que el material estuvo por la acción de diferentes procesos de manufactura, los cuales inducen en él cambios en su estado de esfuerzos inicial [Urriolagoitia-Sosa, 2005].

Este comportamiento de los elementos mecánicos debido al estado de esfuerzos inicial, es el resultado de la aplicación de agentes externos de tal manera que el esfuerzo resultante haya sobrepasado el esfuerzo de cedencia, dicho agente externo puede aplicarse de forma homogénea, no homogénea o una combinación entre ambas [Kandil, et. al., 2001].

Cuando el agente externo es aplicado de forma homogénea se produce el fenómeno de endurecimiento por deformación y por consiguiente el efecto Bauschinger [Urriolagoitia-Sosa, 2005]. Cuando el agente externo es aplicado de forma no homogénea se inducen esfuerzos permanentes también llamados esfuerzos residuales [Kandil, et. al., 2001].

I.2.- Endurecimiento por deformación y efecto Bauschinger

Es sabido que la pre-deformación uniaxial de un material, induce a que se comporte anisotropicamente [Bauschinger, 1881 y 1886]. Esto significa que muchas de las propiedades se convertirán en función de la dirección de la mayor deformación plástica, esto es conocido como endurecimiento por deformación. Sin embargo, si se invierte la dirección de la carga del material después de la sobrecarga inicial (que sobrepasó el esfuerzo de cedencia), la curva esfuerzo-deformación es diferente al comportamiento inicial (Figura I.1). Este comportamiento es conocido como efecto *Bauschinger*.

El efecto *Bauschinger* recibe su nombre por el Ingeniero Alemán *J. Bauschinger* quien fue el primero en estudiar el fenómeno en 1881. *Bauschinger* trabajó en acero dulce [1881 y 1886] y encontró que, cargando una barra a tensión más allá de su límite elástico, descargando y volviendo a cargar la barra en la misma dirección, aumenta su límite elástico. Pero si la carga es aplicada en dirección opuesta a la de la primera carga, habrá una reducción en el límite

elástico y en algunos casos el comportamiento elástico puede desaparecer, reduciendo así su ductilidad.

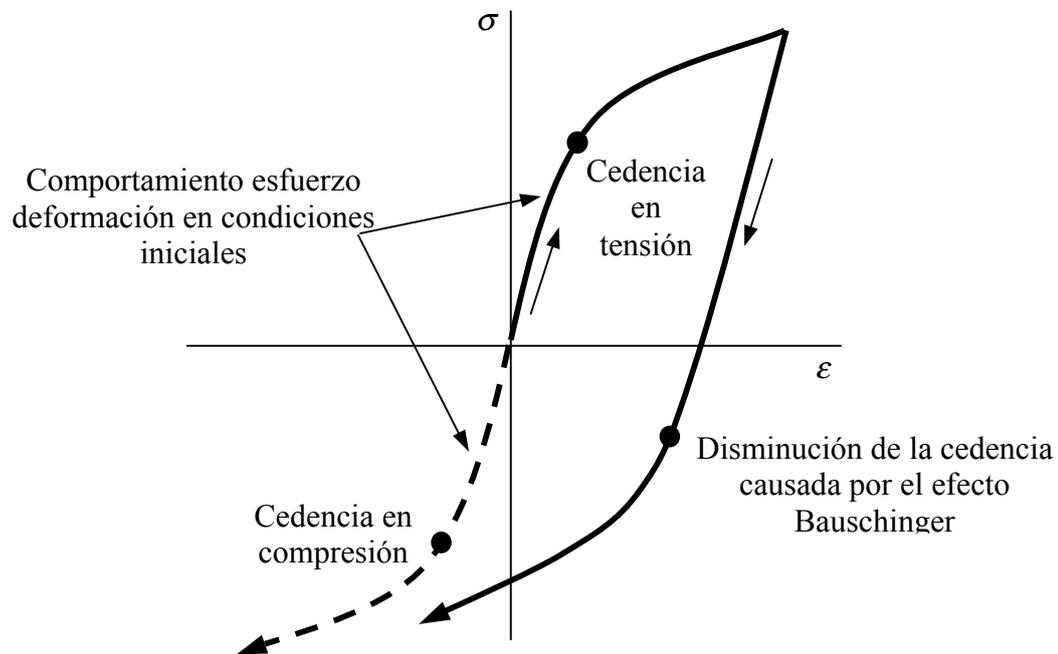


Figura I.1.- Curva esfuerzo-deformación mostrando el endurecimiento por deformación y el efecto *Bauschinger* [Urriolagoitia-Sosa, 2005].

Bauschinger [1881] comenzó a estudiar el fortalecimiento direccional de los metales especulando el comportamiento anisotrópico del punto de cedencia en 1881, presentando el trabajo experimental y conclusiones en 1886 en Alemania [*Bauschinger 1881 y 1886*]. El trabajo experimental se llevó a cabo en Hierro forjado y acero Bessemer, resumiendo los resultados como sigue:

- Al pre-deformar un material más allá del punto de cedencia, incrementa el límite elástico en la dirección de la pre-deformación. Dicho aumento en el límite elástico permanece como una nueva propiedad mecánica cuando se retira la carga aplicada.
- Al pre-deformar un material más allá del punto de cedencia, el límite elástico disminuye en la dirección opuesta de la pre-deformación. Si la magnitud de la pre-deformación aumenta, el límite elástico en dirección opuesta puede reducirse a cero.

- El endurecimiento por deformación es posible cuando la carga es aplicada en dirección contraria, cuando el material se encuentra sin historia previa.
- El fenómeno no es dependiente del tiempo.

Las principales limitaciones de los resultados de *Bauschinger* fue la falta de sensibilidad de los equipos utilizados en esa época para medir con exactitud las deformaciones. Varios años después *Bairstow* [1911] realizó una serie de pruebas de fatiga para establecer dos teoremas relacionados con el efecto *Bauschinger*. Primeramente postula que el límite elástico al comenzar a cargar en una dirección sólo puede ser aumentado con una correspondiente disminución en el límite elástico en la carga de la dirección contraria. Segundo, existe un límite en que el esfuerzo de cedencia puede ser elevado.

I.2.1.- Observaciones del efecto *Bauschinger*

En 1920 *Moore y Beckinsale* [1920] encontraron que es posible eliminar el efecto *Bauschinger* a través de un tratamiento térmico de recosido. *Bader y Lode* [1930] estudiaron la transición de la zona elástica a la zona plástica de la curva esfuerzo - deformación. *Nadai* [1931] estudio el efecto *Bauschinger* en un Acero dulce por la aplicación de una carga inducida por un componente de torsión en la región plástica y volver a torcerla en la dirección opuesta. Se obtuvieron resultados similares a los obtenidos cuando la carga es uniaxial.

Similar al trabajo de *Nadai, Canal* [1956], comenzó a experimentar con tubos huecos que eran sometidos a cargas de torsión, mejorando la sensibilidad de los resultados de la medición de esfuerzo y deformación. Los materiales utilizados en los ensayos fueron; Cobre, Aluminio, Latón, Níquel y Magnesio. El concluye primeramente que, durante la deformación en compresión no solo disminuye el esfuerzo de cedencia inicial con respecto a la deformación original, sino que también, la curva esfuerzo deformación cambia la dirección de un esfuerzo negativo o una deformación positiva y que la relación esfuerzo deformación cambia su forma parabólica característica. En segundo lugar que, al calentar el espécimen arriba de la temperatura de recristalización, el efecto *Bauschinger* desaparece.

Los trabajos de observación del efecto *Bauschinger* continuaron durante las siguientes dos décadas, listando la disminución del esfuerzo de cedencia en compresión cuando el material es sometido a un pre-deformado, esto solo fue una manifestación del efecto *Bauschinger*.

Otras manifestaciones incluyen; la buena redondez aparente de la porción plástica en compresión inicial de la curva esfuerzo-deformación, el incremento en el rango de endurecimiento por deformación y un permanente ablandamiento. Similares resultados fueron obtenidos por *Wilson [1965]*, *Ashby [1966]*, *Gould, Hirsch y Humphreys [1974]*, *Atkinson, Brown y Stobbs [1974]* y *Lloyd [1977]*.

En 1989, *Takeda y Nasu [1989]* realizaron varias pruebas de flexión para determinar la resistencia a tensión y compresión en placas de acero anisotrópico. El efecto *Bauschinger* y la anisotropía planar de los materiales fueron examinados usando flexión en especímenes cortados a varios ángulos de la dirección del pre-estirado. Esto condujo a la propuesta de una función de cedencia anisotrópica.

Recientemente *Thakur, Nemat-Nasser y Vecchio [1996]* publicaron sus observaciones sobre la dinámica del efecto *Bauschinger*. Su procedimiento experimental se llevo a cabo en una prueba de tensión dividida en una barra *Hopkinson* bajo cargas dinámicas. Ellos probaron dos tipos de materiales, aleación HAYNES 230 y aleación Al 2024. Los especímenes tensionados fueron sujetos a una tensión simple de magnitud conocida y después se descargo. La deformación uniforme evalúa la sección de la muestra a tensión, donde fue seccionado y recargado en compresión usando la misma velocidad de deformación usada en la carga de tensión. La aleación de Al 2024 no exhibió efecto *Bauschinger* en cualquiera de las velocidades de deformación. La aleación HAYNES 230 exhibió efecto *Bauschinger* solo bajo condiciones de alta velocidad de deformación. [*Thakur, Nemat-Nasser y Vecchio 1996*].

El efecto *Bauschinger* ha resultado ser una función de varios parámetros (dirección de la carga, velocidad de deformación, temperatura y la textura) [*Ono, et. al., 1983, Arsenault y Wu, 1987 y Thakur, Nemat-Nasser y Vecchio 1996*]. El efecto *Bauschinger* durante la carga a compresión de un material puede ser generalizado dentro de una transición de rango largo y de rango corto. La transición de rango largo incluye dislocaciones internas [*Pedersen, et. al., 1981 y Hasegawa, et. al., 1986*] y dislocaciones en las fronteras de grano [*Ono, et. al., 1983 y Margolin, et. al., 1978*]. La transición de rango corto es la resistencia a la dislocación [*Aran, et. al., 1987*].

El efecto *Bauschinger* también se puede atribuir a la influencia de las características microestructural como las vacancias en el material, el tamaño y forma de los granos [Embury y Ashby, 1985 y Reynolds y Lyons 1997].

A finales del siglo, Zhang, et. al. [2000] publicó sus resultados sobre el efecto que causa la pre-deformación en tensión sobre el esfuerzo de cedencia a compresión en Ti-6Al-2C-2Mo-2Sn-Zr (Ti-6-22-22). Se realizaron pruebas a tensión y a compresión para medir la retención del esfuerzo de cedencia a compresión después de quitar los esfuerzos. La retención de la resistencia a la cedencia a compresión indica un efectivo proceso de alivio de esfuerzos. La reducción del esfuerzo de cedencia a compresión depende de la magnitud de la pre-deformación a tensión. El análisis de Rayos-X demostró que todas las muestras pre-deformadas exhibían muy bajos esfuerzos residuales a compresión.

K. Han, C. J. Van Tyne y B. S. [2005] estudiaron el comportamiento del efecto *Bauschinger* en tres diferentes Aceros, que tenían como fase principal la Ferrita, cada tipo de Acero tenía diferente tamaño de grano uno con respecto del otro, teniendo como conclusiones que el efecto *Bauschinger* en el material depende de la microestructura y la cantidad de endurecimiento por deformación a la que es sometido.

I.2.2.- Explicación del efecto *Bauschinger*

Heyn [1918] presenta la primera explicación aceptada sobre el efecto *Bauschinger* en 1918. Supone en primer lugar, que el material consiste de elementos de volumen muy reducido que tienen una curva ideal de esfuerzo-deformación y que el límite elástico de varios elementos de volumen no es igual entre ellos. Esta suposición puede explicar la curvatura inicial de transición elasto-plástica de la curva esfuerzo-deformación. Segundo, durante la deformación, la deformación unitaria es homogéneamente uniforme a lo largo del material y esto asume que el valor absoluto del límite elástico de cualquier volumen de elementos es independiente de la dirección de la deformación, es decir, es lo mismo en tensión que en compresión (isotrópico). Por lo tanto, durante la deformación plástica la distribución de esfuerzos no es uniforme en éste tipo de material después de la descarga. Surgiendo esfuerzos residuales debido a la no uniforme cedencia de los volúmenes de elementos y éstos son responsables del efecto *Bauschinger*.

La siguiente figura puede simplificar la visualización de éste fenómeno físico (Figura I.2). Considere un espécimen hecho de elementos de volumen A y B que tienen las mismas constantes elásticas. Asuma que el elemento de volumen B tiene un límite elástico más elevado que el elemento de volumen A. Suponga también que ambos elementos se deforman plásticamente sin endurecimiento, es decir perfectamente elasto-plástico.

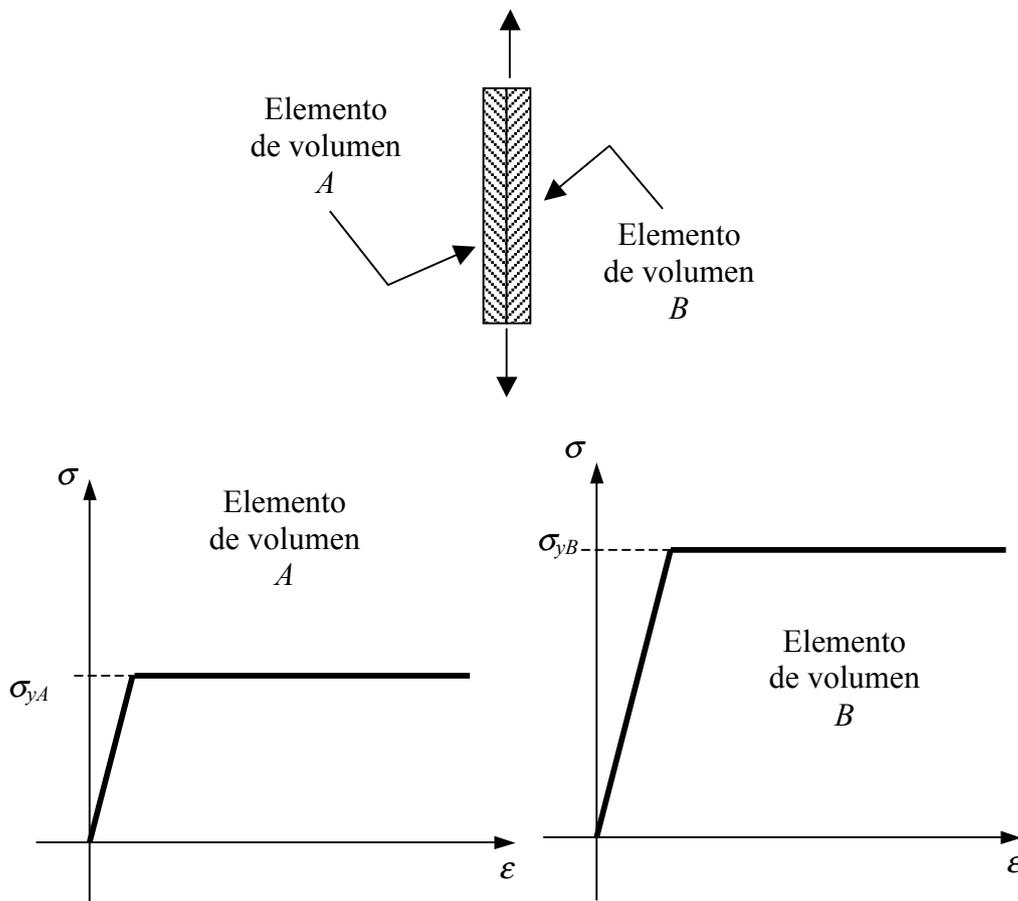


Figura I.2.- Simplificación esquemática de la teoría de *Heyn* [1918].

Si el espécimen es probado a tensión y a compresión en una máquina de ensayo rígido, la curva esfuerzo-deformación es un promedio de ambos elementos como se muestra en la Figura I.3. Si el espécimen es cargado uniaxialmente en tensión, ambos elementos iniciarán una deformación elástica. Inmediatamente después el elemento de volumen A produce un cambio en la pendiente de la curva. A partir de este instante la deformación en el espécimen no será homogénea y se crearán esfuerzos residuales si la carga es removida. Si el espécimen

es deformado más, el elemento de volumen B también cederá. Si el proceso continúa más lejos, ambos elementos continuaran deformándose plásticamente. Después la carga será retirada del espécimen. En esta fase, el elemento A estará bajo esfuerzos residuales de compresión como se muestra en la posición I_A y el elemento B estará bajo esfuerzos residuales de tensión, como se muestra en la posición I_B (Figura 1.3). Después deje que el espécimen sea cargado en compresión con la misma magnitud como lo fue originalmente a tensión. El elemento A experimentara una cedencia rápidamente como se muestra en la posición I_A' y por consiguiente la rápida cedencia de la combinación de volúmenes. Este simple modelo demuestra que el promedio de esfuerzos de cedencia en una deformación a compresión es menor que la que se tenía en la deformación original. Los esfuerzos residuales en I_A y I_B son comúnmente conocidos como esfuerzos de *Heyn*.

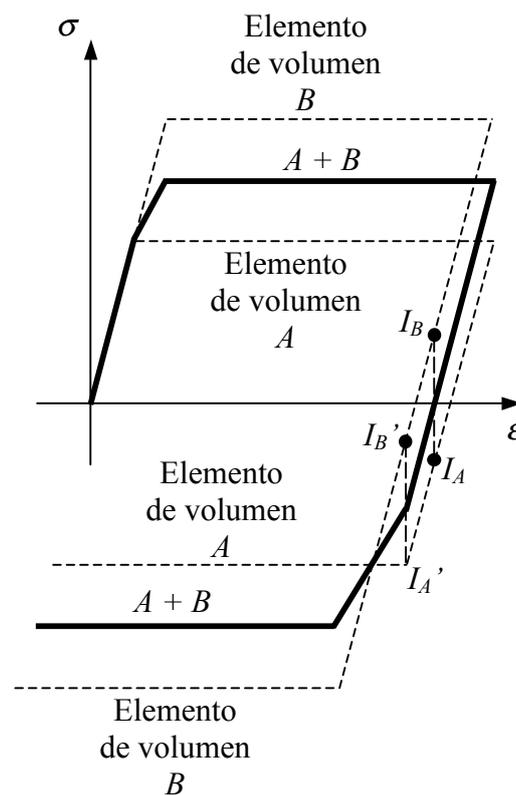


Figura 1.3.- Teoría de *Heyn* [1918].

Masing [1925] apoya esta teoría mediante la realización de una serie de experimentos en Latón y en Hierro (pruebas de tensión y compresión), Cobre y Aluminio (prueba de torsión). Estos experimentos demuestran una similitud con la curva esfuerzo-deformación en

compresión calculada. Los experimentos de *Masing* fueron hechos con valores muy pequeños de pre-deformación. La deformación fue invertida después de una deformación de 0.5% a 1% y bajo estas circunstancias la teoría nos da una similitud cuantitativa. Sin embargo, a valores más altos de pre-deformación, la observación experimental del efecto *Bauschinger* es muy diferente al efecto predicho por la teoría de *Heyn*.

Sachs y Shoji [1927] investigaron el efecto *Bauschinger* en cristales simples de Bronce mediante el uso de pruebas de tensión y compresión. La observación del trabajo refuta la creencia que el efecto *Bauschinger* es inducido por discontinuidades en la deformación en las fronteras de grano, que se debieron a la variación en la orientación de los granos vecinos, como fue sugerido por *Heyn [1918]*.

Woolley [1953] concluyó un estudio del efecto *Bauschinger* usando varios tipos de metales F.C.C. y B.C.C. Él observó que la deformación asociada con el efecto *Bauschinger* es aproximadamente proporcional al esfuerzo aplicado para producir el endurecimiento por deformación dividido por el módulo de *Young*, y es casi independiente del tamaño de grano. Él presentó una explicación del efecto *Bauschinger* en términos del reordenamiento de las dislocaciones presentes en el endurecimiento por deformación. Después en 1958 refuta la teoría de *Masing [Woolley 1958]* y también su propia teoría anterior para explicar el efecto *Bauschinger [Woolley 1953]*.

Históricamente los modelos teóricos para describir el efecto *Bauschinger* han sido principalmente de dos tipos, Macroscópico o Microscópico. El enfoque macroscópico se basa en las teorías de la continuidad plástica, el modelo más comúnmente usado para el endurecimiento por deformación son los modelos isotrópico y cinemático. La teoría de endurecimiento isotrópico está basada en la expansión uniforme de una superficie inicial de cedencia, y como tal, es inadecuado para describir el efecto *Bauschinger* únicamente. Por otra parte, las leyes del endurecimiento cinemático están fundamentadas en la traslación de la superficie de cedencia original, y consecuentemente son más adecuados para explicar la dependencia direccional de la relación esfuerzo deformación. *Mroz [1967]* propone una combinación de isotrópica y cinemática en un modelo macroscópico, que generalmente se usa para dar una completa descripción del efecto *Bauschinger*. El más cercano a dar una completa teoría microscópica que explique el efecto *Bauschinger* se propone por *Orowan [1959]*.

Sugirió que la porción inicial redondeada del flujo de la curva en compresión fue permeable por el movimiento de las dislocaciones y que la disminución de las dislocaciones en dicha curva fue debido a los esfuerzos anteriores que deberán ser relajados después de invertir la deformación.

I.3.- Esfuerzos residuales

Diferentes términos técnicos son usados para referirse a los esfuerzos residuales, estos incluyen: Esfuerzos internos, Esfuerzos iniciales, Esfuerzos inherentes, Esfuerzos de reacción o Esfuerzos de fabricación [Masubuchi, 1980]. Los esfuerzos residuales han sido definidos como, esfuerzos auto equilibrantes existentes en un cuerpo, cuando esté se encuentra libre de la aplicación de agentes externos. El estado de esfuerzos debe de estar en equilibrio estático, es decir, el total de las fuerzas que actúan en cualquier sección transversal debe ser cero y el total de los momentos de fuerza en cualquier sección también debe ser cero [Treuting, 1952].

I.3.1.- Clasificación de los esfuerzos residuales

En modo general los esfuerzos residuales han sido divididos en dos categorías, Macroscópicos y Microscópicos dependiendo del tamaño de la zona en la que actúan [Masubuchi, 1980 y Parlane, 1979]:

1. Esfuerzos residuales Macroscópicos: Se encuentran distribuidos sobre áreas apreciables, es decir, sobre un grupo de granos del material. También son conocidos como esfuerzos de cuerpo de primera clase [Masubuchi, 1980]. Ejemplos de estos esfuerzos son los producidos por la molienda de metales, soldadura de piezas, calentamiento de una estructura causando distorsión y flexión plástica en barras.
2. Esfuerzos residuales Microscópicos: Son esfuerzos que varían de grano a grano o dentro de un mismo grano, también son conocidos como esfuerzos de cuerpo de segunda clase. La influencia exacta de estos esfuerzos aun no está bien entendida, pero ellos son relacionados con procesos tales como endurecimiento, precipitación y difusión en aleaciones que tiene como resultado cambios en las propiedades Físicas. Ejemplos de estos esfuerzos son los producidos en la

transformación martensítica en los aceros, o los esfuerzos que existen a escala atómica cerca de las dislocaciones.

Existe otra clasificación estandarizada propuesta por *Macherauch y Kloos [1986]* clasificando a los esfuerzos residuales en tres diferentes clases:

- 1^a Clase: Este tipo de esfuerzos residuales son macro-esfuerzos que son casi homogéneos en magnitud y dirección a través de grandes áreas de granos de material y se encuentran en equilibrio en todo el componente.
- 2^a Clase: Este tipo de esfuerzos residuales son micro-esfuerzos y son inhomogéneos a través de zonas microscópicas y actúa sobre el tamaño del grano en un material, esta en equilibrio dentro de un número de granos.
- 3^a Clase: Este tipo de esfuerzos residuales también son micro-esfuerzos y son inhomogéneos que se distribuyen a través de áreas sub-microscópicas del material (algunas distancias atómicas en el grano).

I.3.2.- Inducción de esfuerzos residuales mediante procesos de fabricación

Varios procesos necesarios para la fabricación de los componentes pueden causar esfuerzos residuales. Algunos de los principales procesos se describen a continuación.

- Proceso de maquinado. Este proceso se describe como, las operaciones mecánicas para remover o cortar material para la fabricación de nuevas piezas. Ejemplo de esta operación es la perforación, escariado, lapeado, brochado, aserrado, torneado, fresado y rectificando. Estos procesos estándar de maquinado usualmente crean esfuerzos de compresión en la zona de corte del metal [*Bainbridge, 1969*]. La magnitud de los esfuerzos residuales puede ser alta o baja dependiendo de las propiedades mecánicas del material, la fuerza de corte, la velocidad utilizada para cortar, la herramienta, la profundidad de corte, la velocidad de avance, el líquido refrigerante y la geometría de la herramienta.

- Procesos de formado. Estos son procesos en el cual son aplicadas cargas para deformar permanentemente un componente sin arranque de material. Algunos procesos de formado son rolado, flexión, torsión, forja, rectificación, tensión, compresión, prensado, centrifugado y shot peening. Estos pueden generar esfuerzos residuales de tensión y/o compresión en la superficie del componente dependiendo del proceso. La operación de flexión que es la usada en este estudio induce esfuerzos residuales en vigas. Cuando una barra es flexionada más allá de su punto de cedencia, la deformación plástica tiene lugar en ambos caso tensión y compresión. El esfuerzo debido a la aplicación de la carga genera una distribución no lineal de esfuerzos a través de la profundidad de la barra, pero el esfuerzo debido a la descarga tiene una distribución elástica y lineal [Timoshenko y Gere, 1991]. El estado de esfuerzos residuales que actúa sobre la barra a la descarga puede ser obtenida por superposición (Figura I.4) y mediante el uso de la ecuación:

$$\sigma_{residual} = \sigma_{carga} + \sigma_{descarga} \quad (1.1)$$

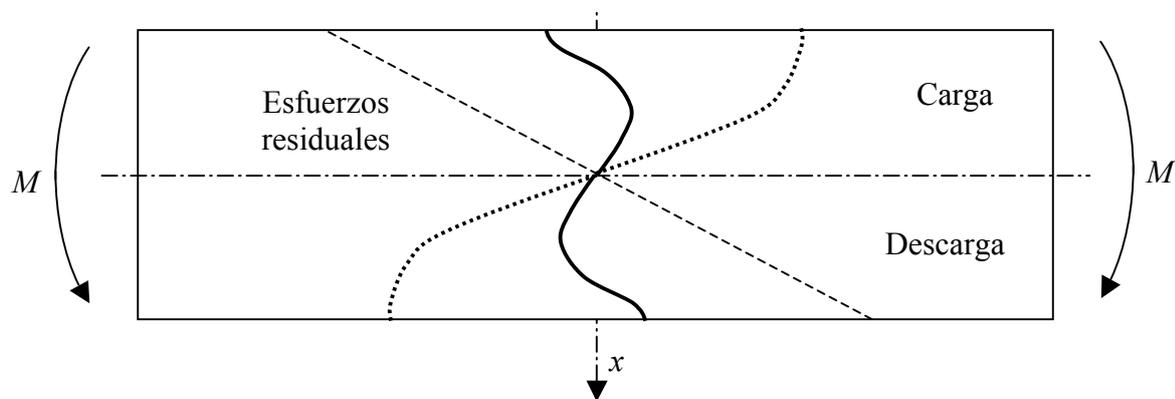


Figure I.4.- Superposición de esfuerzos residuales.

Donde x describe la localización con respecto a la profundidad de la barra. Los esfuerzos residuales ocurrirán con signos opuestos en las regiones que originalmente estaban a tensión o compresión.

- Procesos con tratamiento térmico: Estos procesos pueden producir esfuerzos residuales siempre que el material no experimente cambios en su estructura

cristalina. Por ejemplo, cuando el aluminio es rápidamente enfriado después de un tratamiento térmico, el gradiente de temperatura resultante causa una diferente velocidad de contracción en la superficie con respecto al interior [Bonner, 1996].

- Procesos de unión: Los procesos indicados aquí involucran operaciones de unir dos o más piezas permanentemente [Bonner, 1996]. Algunos ejemplos de este tipo de procesos son la soldadura y el adherido. Los mecanismos involucrados en la generación de esfuerzos residuales en los procesos de unión (principalmente en la soldadura) son muchos y variados y su interacción puede ser complejas. La fuente principal de inducción de esfuerzos residuales esta localizada durante la contracción al momento de enfriarse la unión. Sin embargo, otras fuentes pueden ser identificadas dependiendo el proceso de unión. [Huang, et. al., 1988 y Dye, et. al., 2000].
- Procesos de recubrimiento: Este proceso se refiere a la técnica de aplicación de una capa delgada de un material en otro. Es utilizado para mejorar y modificar las propiedades físicas y la apariencia de un componente. Recubrimiento y laminación son aplicados a diferentes materiales incluyendo metales, plásticos, materiales compuestos y cerámicos. Algunos ejemplos de este tipo de operación son electro deposición, revestimiento, pulverización y galvanizado.

I.3.3.- Efecto de los esfuerzos residuales en los componentes mecánicos

La inducción de los esfuerzos residuales por uno o más de las operaciones señaladas anteriormente puede dar lugar a múltiples efectos, tales como, cambio en las propiedades del metal, alteración de la conductividad eléctrica, permeabilidad magnética, reactividad química, precipitación, deformación plástica, endurecimiento por trabajo, fatiga, efectos elásticos y plásticos posteriores, recuperación alástica y re-cristalización, fricciones internas, propiedades elástica, resistencia mecánica, cualidades de fabricación y estabilidad dimensional. El conocimiento de los cambios dimensionales no homogéneos resultante de los esfuerzos residuales pueden ser usados para explicar diferentes efectos observables, como son:

- **Propiedades mecánicas:** La respuesta de un componente mecánico bajo cargas estáticas (Tensión y/o compresión) puede ser alterada por la inducción de esfuerzos residuales. Los agentes externos producen esfuerzos que se agregan a los esfuerzos residuales ya existentes. Cuando la suma de estos esfuerzos excede el esfuerzo de cedencia del material, puede ocurrir flujo plástico de forma temprana y consecuentemente la falla tendrá lugar antes de lo previsto
- **Fatiga:** La inducción de esfuerzos residuales puede resultar en una reducción o un incremento en la resistencia de iniciación y propagación de grietas. Los esfuerzos residuales pueden afectar significativamente la iniciación de la grieta y la tasa de crecimiento de la misma, ya sea por mantener cerrada la grieta por los esfuerzos residuales de compresión, o abriendo la grieta por los esfuerzos residuales de tensión.
- **Relevado de esfuerzos por recocido:** El objetivo principal de relevar los esfuerzos por medio del recocido es la de elevar la temperatura del componente mecánico con el fin de eliminar los esfuerzos residuales y al mismo tiempo no producir altos niveles de ablandamiento del material. Pero en ocasiones el proceso de relevado de esfuerzos no logra este propósito. Si un componente tiene altos esfuerzos residuales a tensión se pone en un horno y se calienta demasiado rápido, los esfuerzos térmicos por la no homogénea expansión puede tensarlo más y causar que el componente se fracture [*Treuting, 1952*].
- **Estabilidad dimensional:** El relevado de esfuerzos residuales mediante operaciones térmicas causa una redistribución que tiende a distorsionar el equilibrio estático que debe ser re-establecido. Equivalentemente la relajación de esfuerzos da lugar a una distorsión, debido a que requiere mantener el equilibrio realizando cambios dimensionales que neutralicen las fuerzas y flexiones que neutralicen los momentos. Un simple ejemplo de la inestabilidad dimensional es el efecto elástico posterior en el cual el relevado de esfuerzos longitudinales es acompañado por una contracción longitudinal. La distribución de esfuerzos también pueden ser alterados cuando una parte de un material que comparta el esfuerzo son removidos a lo largo de este. Esto altera

el equilibrio estático, a través de la generación de fuerzas internas y momentos para ser balanceados por los cambios dimensionales y flexiones. Uno de los métodos para determinar los esfuerzos residuales basados en estas observaciones es el Método de Respuesta de Grieta (CCM por sus siglas en inglés).

I.3.4.- Medición del campo de esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales se encuentran presentes en los elementos mecánicos que han sido sometidos a un proceso de manufactura. Los esfuerzos residuales no se pueden medir de forma directa, lo que se mide es la deformación causada por el relajamiento del esfuerzo residual, esto se aplica a todos los métodos empleados para dicha medición.

Existen diferentes métodos para la medición del campo de esfuerzos residuales, los cuales se pueden dividir en métodos no destructivos, métodos semi destructivos y métodos destructivos.

I.3.4.1.- Métodos no destructivos

Los métodos no destructivos para la medición del campo de esfuerzos residuales se basa en la relación existente entre los parametros físicos y cristalograficos sobre los esfuerzos residuales. Tienen la desventaja de ser un método indirecto y las cantidades de los esfuerzos determinados estan influenciado no sólo por la magnitud del esfuerzo, sino que también por los parametros del material, tales como la estructura del material y sus defectos. Además la interpretación de los datos es más complicada. Los métodos más empleados son [*Kandil, et al., 2001*]:

- Técnicas ultrasonicas y acusticas
- Los métodos magneticos
- Método de difracción de rayos X
- Método de difracción de neutrones

I.3.4.2.- Métodos semi destructivos

Los métodos semi destructivos se fundamentan en la inducción de una pequeña perforación o ranura (la perforación no afecta la integridad estructural del elemento

mecánico), la cual permite la relajación del campo de esfuerzos residuales que actúan en la zona del corte. Los más empleados son [Wadsley, 1994]:

- El método del barreno
- El método del barreno profundo
- La técnica del anillo anular

I.3.4.3.- Métodos destructivos

Los métodos mecánicos también conocidos como métodos destructivos son los más utilizados en la medición del campo de esfuerzos residuales. Este tipo de métodos son confiables y se obtienen datos muy cercanos a la realidad. El método consiste en remover grandes cantidades de material, lo cual produce un cambio estructural y de forma, la medición de este cambio estructural y de forma, permite calcular el campo de esfuerzos residuales original. Los más utilizados son el método de Sach y el método de respuesta de grieta

I.3.4.3.1.- Método de Sach [1941]

Este método permite medir la distribución del campo de esfuerzos residuales en la dirección circunferencial y longitudinal en barras cilíndricas. Si se remueven las capas de material desde la parte interna, las deformaciones axiales y tangenciales se miden en la superficie exterior, ahora si se remueven las capas desde el exterior, las deformaciones se miden en el interior del tubo. Este método se utiliza en casos donde se presenta simetría rotacional y son uniformes en dirección axial.

I.3.4.3.2.- Método de respuesta de grieta

Este es el método con el cual se realiza la evaluación del campo de esfuerzos residuales en el presente trabajo de investigación. Este método consiste en la inducción de una pequeña ranura en el componente a estudiar (Figura I.5), la cual produce una relajación parcial del campo de esfuerzos residuales en la vecindad de la grieta. Se utiliza una galga extensométrica para medir la relajación que se produce en el reacomodo del campo de los esfuerzos residuales debido al corte [Prime, 1999].

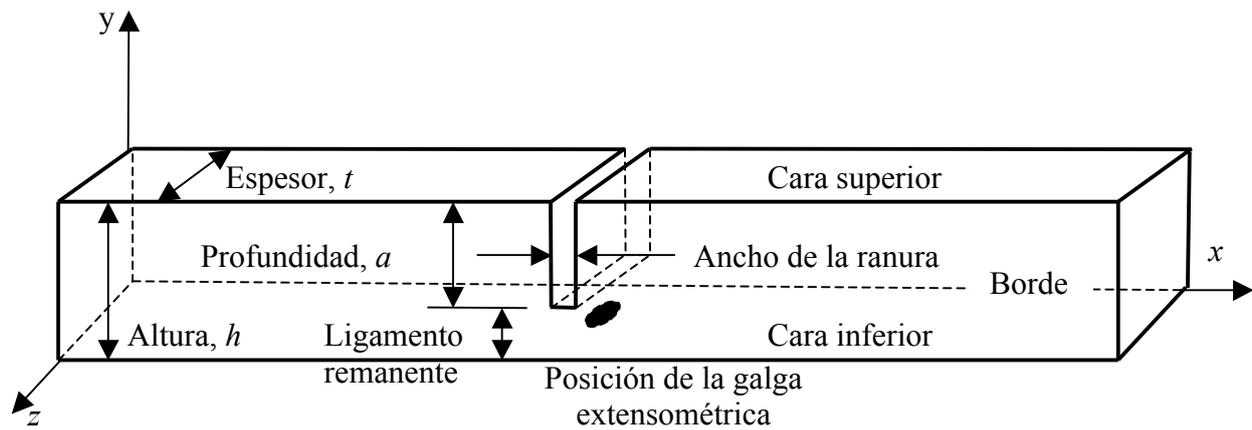


Figura I.5.- Método de respuesta de grieta aplicado a una viga prismática [Prime, 1999].

I.4.- Planteamiento del problema

En esta investigación se realiza la caracterización de las propiedades mecánicas del Acero Inoxidable AISI 316L para cuantificar los parámetros de elasticidad y plasticidad en forma real, la caracterización se realiza mediante el ensayo de cuatro puntos de flexión, para esto se propone una probeta prismática de sección transversal rectangular, además se mide el cambio en las propiedades mecánicas cuando es aplicado un pre-deformado axial homogénea, para esto se proponen dos tipos de magnitud en el endurecimiento por deformación, pre-deformado ligero y severo (3 y 7 veces la deformación de cedencia, respectivamente), también se toma en cuenta la dirección de la carga axial, primeramente se considera en tensión y posteriormente se invierte en compresión.

Para tener una mayor comprensión del efecto del pre-deformado axial homogéneo, se evalúan los campos de esfuerzos residuales en cada caso de pre-deformado utilizando el método de respuesta de grieta.

I.5.- Sumario.

En éste capítulo se dio una reseña histórica de las personas que han estudiado el endurecimiento por deformación y el efecto *Bauschinger*, desde *J. Bauschinger* quien fue el primero en estudiarlo, por lo cual lleva su nombre, hasta la época actual, pasando por diferentes personas que investigaron dicho fenómeno. Las diferentes pruebas que se han realizado para la determinación del incremento del punto de cedencia en tensión y la reducción del punto de cedencia en compresión después de una pre-deformación. También se da una explicación del porqué de éste fenómeno. Además se habla de los esfuerzos residuales,

su clasificación y como pueden ser inducidos, también se describen algunos de los efectos que pueden causar la inducción de estos esfuerzos en los elementos mecánicos.

En el próximo capítulo se realizará un marco teórico para estudiar éstos fenómenos, explicando a mayor detalle que es el endurecimiento por deformación y el efecto *Bauschinger*, así como las leyes de endurecimiento y los tipos de ensayos a realizar en las pruebas y las propiedades mecánicas del material a utilizar. Las ecuaciones que rigen las deformaciones homogéneas y las deformaciones no homogéneas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1.- Introducción

La utilización de metales en implantes biomédicos y ortopédicos se basa fundamentalmente en la resistencia mecánica y la compatibilidad del material bajo las condiciones a las que servirá dicho material [López, Durán y Ceré, 2004]. El acero inoxidable 316L es usado en la fabricación de implantes biomecánicos, de ahí su importancia para este estudio (Figura II.1).



Figura II.1.- Prótesis de cadera con cabeza femoral de acero inoxidable AISI 316L.

Al caracterizar este material sujeto a endurecimiento por deformación al ser sometido bajo cargas homogéneas mejora sus propiedades mecánicas, se pueden realizar mejores diseños y más confiables. Cuando el material es sometido a cargas no homogéneas se pueden inducir esfuerzos residuales y si son bien aplicados es posible alargar la vida útil del componente [Urriolagoitia-Sosa, 2007]. Por consiguiente se puede economizar en material y bajar el peso total del componente mecánico.

Este capítulo presenta los métodos para determinar los cambios en las propiedades mecánicas cuando el material es endurecido por deformación bajo una carga uniaxial y su consecuencia el efecto *Bauschinger*. Así como también la reglas de endurecimiento que sigue este fenómeno. En esta investigación se usará el ensayo de flexión pura para la determinación de las propiedades mecánicas, este método consiste en aplicar momentos flexionantes en cuatro puntos de flexión

bajo condiciones de equilibrio estático, derivando así dos comportamientos de la curva de esfuerzo-deformación (Tensión y Compresión).

II.2.- Propiedades mecánicas de los materiales

Para que las máquinas y estructuras funcionen apropiadamente, su diseño requiere que se entienda el comportamiento mecánico de los materiales usados. Es importante al desarrollar una investigación caracterizar un material dado que las propiedades mecánicas cambian entre diferentes lotes y fabricantes, para esto se hace uso de la prueba de tensión y compresión [Gere, 2002], siendo la de mayor importancia la prueba de tensión, debido a que los esfuerzos de tensión ayudan a la propagación de las grietas, generando así una fisura en el material hasta llegar a la fractura del componente [Luis-Hector et al, 2004] [Sauseda-Meza et al, 2005].

Como el uso de materiales depende, en gran parte, de sus propiedades mecánicas, tales como resistencia mecánica, dureza y ductilidad. Es posible obtener valores numéricos que describan estas propiedades mecánicas mediante el uso de pruebas. El procedimiento usual es colocar probetas del material a estudiar en máquinas de prueba, aplicar cargas y medir las deformaciones resultantes como, cambios de longitud y diámetro. Para comprender mejor la importancia de la caracterización del material bajo pruebas mecánicas se describen las siguientes definiciones

II.2.1.- Resistencia mecánica

La resistencia mecánica de un material determina la cantidad de esfuerzo o carga que puede soportar antes de pasar su límite elástico o esfuerzo de cedencia de forma excesiva hasta llegar a la falla.

En el caso de los metales y los polímeros termoplásticos, el criterio de diseño se fundamenta habitualmente en el esfuerzo de cedencia. Sin embargo, debido a que los materiales pueden haber experimentado un trabajo en frío o una deformación plástica previa (Historia previa del material), la resistencia de un material puede variar desde el esfuerzo de cedencia de un material recocido hasta el esfuerzo de cedencia de un material endurecido por deformación [Mangonon, 2001].

En el caso práctico de la mecánica de materiales se consideran a los metales como materiales homogéneos, lineales, continuos e isotrópicos. Por este motivo, para la mayor parte de los fines de diseño, se supone que el esfuerzo de cedencia es el mismo cuando se le aplica una carga a tensión como cuando se le aplica a compresión, condiciones de isotropía.

II.2.2.- Ensayos mecánicos.

El éxito del empleo de materiales en aplicaciones de Ingeniería recae en la habilidad del material y en el diseño para satisfacer las necesidades de servicio. La capacidad de un material para satisfacer estos requerimientos es determinado por las propiedades mecánicas y físicas del material. Las propiedades físicas son; densidad, propiedades eléctricas, conductividad y difusión térmica, entre otros. Las propiedades mecánicas es la relación que existe entre las fuerzas que son aplicadas al material y la resistencia del material a la deformación y fractura. Ésta deformación puede o no ser visible en el material después de ser removida la carga aplicada [*Metals Handbook, 2000*].

Diferentes tipos de ensayos que usan la aplicación de fuerzas en el material, se emplean para medir propiedades tales como: módulo elástico, resistencia a la cedencia, deformación elástica y plástica, dureza, resistencia a la fatiga y fractura.

II.2.2.1.- Ensayo de tensión.

La prueba de tensión, es la prueba más comúnmente usada para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales. Una fuerza de tensión es aplicada por una máquina especialmente diseñada, resultando una gradual elongación y una eventual fractura al término de la prueba (Figura II.2). Con la prueba de tensión se pueden cuantificar importantes propiedades mecánicas de un material, estas propiedades son: [*Metals Handbook, 2000*]

- Propiedades de deformación elástica, como es el módulo de elástico (Modulo de *Young*) y razón de *Poisson*.
- Esfuerzo de cedencia y esfuerzo ultimo a la tensión.
- Propiedades de ductilidad, como es, elongación y reducción de área.
- Características de endurecimiento por deformación.



Figura II.2.- Máquina para ensayos de tensión.

II.2.2.2.- Ensayo de compresión.

El ensayo a compresión consiste en la deformación de un espécimen aplicando cargas de compresión, éste método es conveniente para determinar la curva esfuerzo deformación cuando esta sujeto a grandes deformaciones debido a que en esta prueba el espécimen no presenta un adelgazamiento como en la prueba de tensión [Hibbeler, 1997].

El ensayo a compresión es frecuentemente usado para evaluar la viabilidad del material debido a que muchos procesos de manufactura generan grandes esfuerzos a compresión como la forja. Existen dos dificultades inherentes a la prueba de compresión que debe ser superada por la técnica de ensayo: pandeo de la muestra y embarrilamiento de la muestra. Estas condiciones causan una no uniforme distribución de esfuerzo y deformación en el espécimen haciendo más difícil el análisis de resultados.

II.2.2.3.- Ensayo de flexión

Cuando un elemento es sometido a pares iguales y opuestos que actúan en el mismo plano longitudinal se dice que está sometido a flexión pura, es decir, que no actúan más fuerzas como lo son fuerzas cortantes y normales, en la sección de máxima flexión, que es la parte central de la viga.

Como el momento flector es el mismo en cualquier punto de la sección transversal, el elemento se flexará uniformemente como se muestra en la Figura II.3. Por lo tanto la línea AB tendrá una curvatura constante, lo mismo pasará con la línea A'B'. Con la flexión podemos notar que la línea AB disminuye en longitud y la línea A'B' incrementa su longitud, es decir, que en la parte superior se encuentra a compresión, mientras que en la parte inferior se encuentra a tensión [Beer y Johnson, 1998].

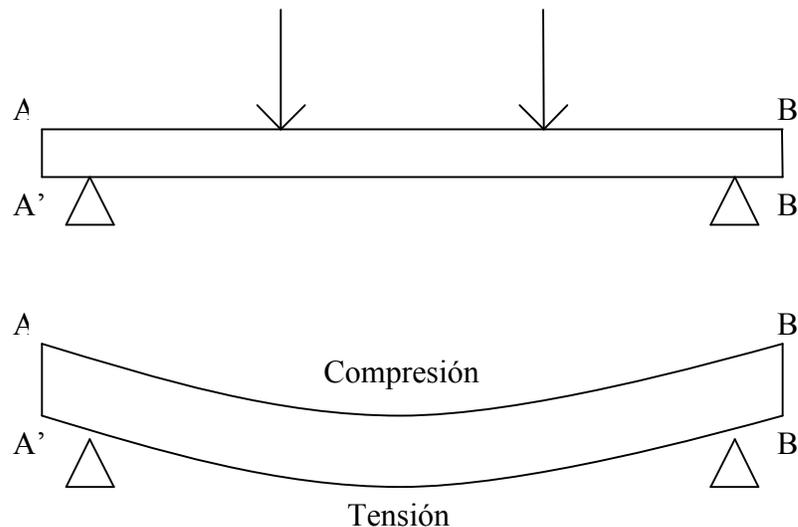


Figura II.3.- Barra flexionada bajo cuatro puntos de flexión.

Como en el ensayo a flexión se presenta tanto tensión como compresión, es un buen método para evaluar dichas propiedades mecánicas, teniendo así los dos comportamientos de la curva esfuerzo-deformación [Urriolagoitia-Sosa, 2004] de forma rápida y confiable (Figura II.4).

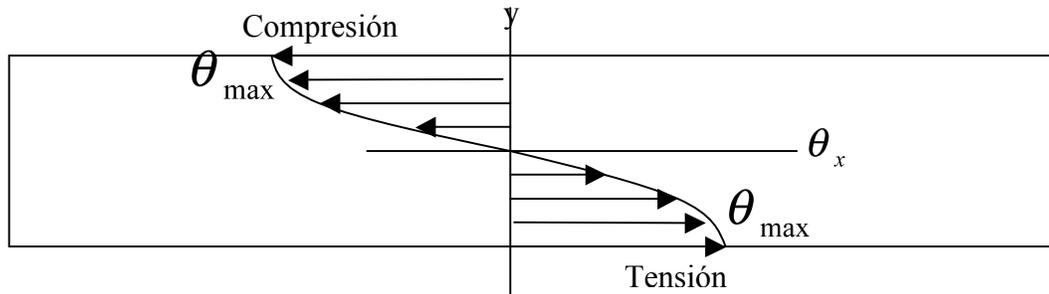


Figura II.4.- Diagrama tensión-compresión en una barra flexionada.

II.2.3.- Reforzamiento de materiales metálicos

La resistencia a la cedencia de los metales y sus aleaciones refleja la cantidad de esfuerzo necesario para mover las dislocaciones que hay en ellos. Por lo tanto, para aumentar su resistencia a la cedencia, se diseñan o crean obstáculos al movimiento de sus dislocaciones, los métodos principales son [Mangonon, 2001];

1. Solución sólida.
2. Disminución del tamaño de grano.
3. Fases o partículas dispersas.
4. Aumento en la densidad de las dislocaciones.

II.2.3.1.- Reforzamiento por solución sólida

El reforzamiento por solución sólida se lleva a cabo mediante la solución de un soluto en un material, el soluto puede ser intersticial o sustitucional. Los átomos intersticiales son relativamente pequeños y caben en los espacios abiertos (intersticios) de la estructura del anfitrión, en tanto que los átomos sustitucionales ocupan sitios de la red del anfitrión (Figura II.5). El efecto de los átomos de soluto se da por la interacción con el movimiento de las dislocaciones del material y retardándolas. La interacción con las dislocaciones puede producir ya sea anclaje de dislocaciones en reposo en el caso de solutos intersticiales o retardo de los movimientos de las dislocaciones para los solutos sustitucionales.

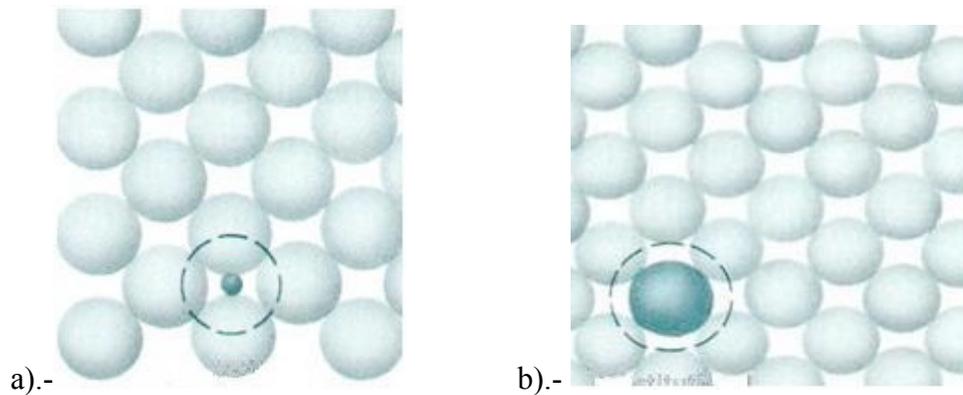


Figura II.5.- Reforzamiento por solución sólida a). Átomo intersticial, b). Átomo sustitucional.

II.2.3.2.- Reforzamiento por tamaño de grano

Este reforzamiento se debe principalmente a que cuando mayor es el número de límites de grano (tamaño de grano más pequeño), más obstáculos existen para el movimiento de las dislocaciones y así se tiene un esfuerzo de cedencia mayor.

II.2.3.3.- Reforzamiento por fases dispersas o partículas.

Además de ser policristalinos, todos los materiales de ingeniería son multifásicos o bien tienen partículas dispersas en su microestructura. Al producir un material que tenga dos o más fases se obtiene el endurecimiento por dispersión. En los materiales metálicos el límite entre las fases impide el movimiento de dislocaciones y mejora la resistencia mecánica.

II.2.3.4.- Reforzamiento por dislocaciones.

La presencia de otras dislocaciones en la estructura entorpece el movimiento de las dislocaciones y de esta manera aumenta la resistencia mecánica del material [Askeland, 1998]. Esto constituye la base del “Endurecimiento por Deformación” o endurecimiento por trabajo en frío. Se suele informar el contenido de dislocaciones como densidad de las dislocaciones en cm por cm^3 (Las mediciones de las densidades de dislocaciones se hacen con ayuda de la microscopía electrónica de transmisión). En los materiales recocidos se ha medido una densidad de dislocaciones de 10^6 cm/cm^3 . En una estructura totalmente deformada en frío se dice que tiene una densidad de

dislocación de 10^{12} a 10^{13} cm/cm^3 . Por lo tanto, a medida que un material se deforma plásticamente, la densidad de dislocaciones aumenta del estado recocido “suave” a la condición de dureza completa [Mangonon, 2001]. El aumento en la densidad de las dislocaciones aumenta la resistencia mecánica del material.

II.3- Endurecimiento por deformación

Este fenómeno es llamado así debido a que al deformar plásticamente un material hace más resistente a los materiales dúctiles. Su resistencia aumenta pero al mismo tiempo disminuye su ductilidad, es decir, su alargamiento en un ensayo a tensión. Este endurecimiento, efecto de la deformación plástica es debido a la elevación del punto de cedencia cuando el material se ha deformado más allá del valor inicial de dicho punto después de que se haya retirado la carga.

El fenómeno de endurecimiento por deformación plástica se presenta en muchos procesos de manufactura como laminado de barras o estirado de tubos y alambres a baja temperatura, cortado de placas, punzonado de agujeros, etc. Para recobrar la ductilidad de los materiales sometidos a endurecimiento por deformación plástica, el material es sometido a un tratamiento térmico de recocido, pero también se recupera el punto de cedencia inicial, eliminando así el endurecimiento por deformación. Al deformar plásticamente un material a fin de elevar el punto de cedencia y mejorar las propiedades elásticas del material, es necesario tener en cuenta: [Timoshenko, 1956]

1. El endurecimiento desaparece cuando el material es sometido a temperatura de recocido, por lo que hay que tener en cuenta la temperatura de trabajo.
2. La deformación uniaxial del material a tracción mejora la resistencia en dicha dirección, teniendo por consiguiente una disminución en la resistencia en la dirección contraria, es decir, en compresión.
3. Cuando un material ha experimentado cedencia en algún punto, es esta zona mucho más sensible a las acciones químicas y tiene tendencias a corroerse a lo largo de la superficie donde existe deslizamiento.

II.4.- Cuatro puntos de flexión en un material elastoplástico

Para tener una mejor visión del comportamiento plástico de un elemento sometido a flexión pura, se considera de un elemento hecho de un material elastoplástico. Primero considérese que el elemento tiene una sección rectangular de ancho b y altura $2c$ (Figura II.6). El diagrama esfuerzo-deformación para un material elastoplástico idealizado es tal como se muestra en la (Figura II.7) [Beer y Johnston, 1998].

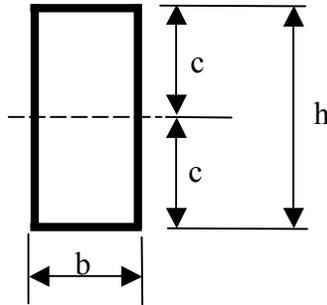


Figura II.6.- Elemento con sección rectangular.

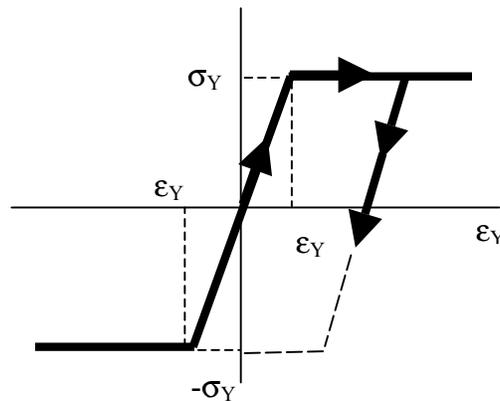


Figura II.7.- El diagrama esfuerzo-deformación para un material elastoplástico idealizado.

Siempre y cuando el esfuerzo normal σ_x no exceda la resistencia a la cedencia σ_y , se aplica la ley de *Hooke*, la distribución de esfuerzos en la sección es lineal (Figura II.8).

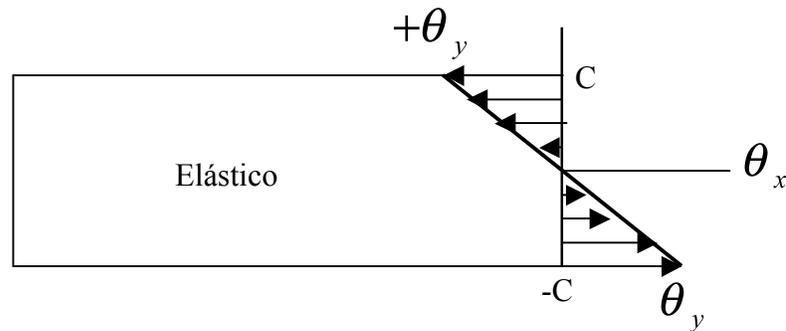


Figura II.8.- Distribución de esfuerzos en zona elástica.

El valor máximo del esfuerzo se obtiene de la ecuación

$$\sigma_m = \frac{Mc}{I} \quad \text{II.1}$$

Cuando el momento flector aumenta, θ_m eventualmente alcanza el valor de θ_y . Sustituyendo este valor en la Ecuación II.1 y despejando el valor correspondiente de M , obtenemos el valor de M_y del momento flector que inicia la cedencia

$$M_y = \frac{I}{c} \sigma_y \quad \text{II.2}$$

El momento M_y se llama el momento elástico máximo, puesto que es el mayor momento para el cual la deformación permanece totalmente elástica. Recordando que para la sección rectangular considerada se tiene.

$$\frac{I}{c} = \frac{b(2c)^3}{12c} = \frac{2}{3}bc^2 \quad \text{II.3}$$

$$M_y = \frac{2}{3}bc^2\sigma_y \quad \text{II.4}$$

A medida que el momento flector aumenta, se desarrollan zonas plásticas en el elemento, con el esfuerzo uniforme igual a $-\theta_y$ en la zona superior, y a $+\theta_y$ en la zona inferior (Figura II.9).

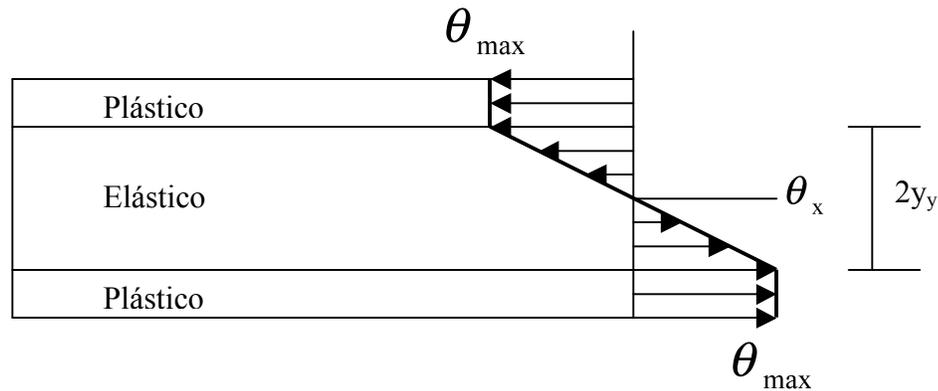


Figura II.9.- Comportamiento elastoplástico del material.

Entre las zonas plásticas, subsiste un núcleo elástico, en el cual el esfuerzo θ_x varía linealmente con y

$$\sigma_x = -\frac{\sigma_y}{y_y} y \quad \text{II.5}$$

Donde y_y representa la mitad del espesor del núcleo elástico

Cuando M aumenta, las zonas plásticas se expanden hasta que en el límite, la deformación es totalmente plástica (Figura II.10).

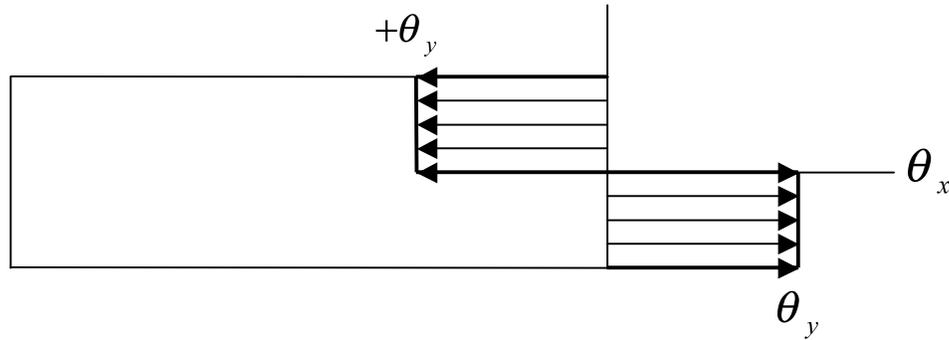


Figura II.10.- Comportamiento plástico del elemento.

Para determinar el valor del momento flexor M correspondiente a un espesor $2y_y$ del núcleo elástico se usa la ecuación.

$$M = -2b \int_0^c y \sigma_x dy \tag{II.6}$$

Recordando que θ_x esta dado por la Ecuación II.4 para $0 \leq y \leq y_y$, y es igual a $-\theta_y$ para $y_y \leq y \leq c$, se escribe.

$$M = -2b \int_0^{y_y} y \left(-\frac{\sigma_y}{y_y} y \right) dy - 2b \int_{y_y}^c y (-\sigma_y) dy$$

$$M = \frac{2}{3} b y_y^2 \sigma_y + b c^2 \sigma_y - b y_y^2 \sigma_y$$

$$M = b c^2 \sigma_y \left(1 - \frac{1}{3} \frac{y_y^2}{c^2} \right) \tag{II.7}$$

O, si se utiliza la ecuación II.3 se tiene.

$$M = \frac{3}{2} M_y \left(1 - \frac{1}{3} \frac{y_y^2}{c^2} \right) \tag{II.8}$$

Donde M_y es el máximo momento elástico. Se puede notar que cuando y_y se aproxima a cero, el momento flector se aproxima al valor máximo.

$$M_p = \frac{3}{2} M_y \quad \text{II.9}$$

Este valor del elemento flector corresponde a una deformación totalmente plástica.

La distribución de la deformación en la sección transversal permanece lineal después de la iniciación de la cedencia. Por lo tanto sigue siendo válida la ecuación de la elástica

$$M = \int (-y\sigma_x dA) \text{ y puede ser usada para determinar la mitad del espesor } y_y \text{ del núcleo elástico.}$$

Se tiene.

$$y_y = \varepsilon_y \rho \quad \text{II.10}$$

Donde ε_y es la deformación de cedencia y ρ es el radio de curvatura correspondiente a un momento flector $M \geq M_y$. Cuando el momento flector es igual a M_y , tenemos $y_y = c$ y la Ecuación II.11 se convierte en.

$$c = \varepsilon_y \rho_y \quad \text{II.11}$$

Donde ρ_y es el radio de curvatura correspondiente al momento elástico máximo M_y . Dividiendo II.11 con II.12 miembro a miembro, se obtiene la relación.

$$\frac{y_y}{c} = \frac{\rho}{\rho_y} \quad \text{II.12}$$

Sustituyendo $\frac{y}{c}$ de la Ecuación II.12 en la Ecuación II.8 expresamos el momento flector M como una función de radio de curvatura ρ de la superficie neutra:

$$M = \frac{3}{2} M_y \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\rho^2}{\rho_y^2} \right) \quad \text{II.13}$$

Notamos que la ecuación anterior es válida sólo después de la iniciación de la cedencia, es decir, para valores de M mayores que M_y . Para $M < M_y$, debe usarse la ecuación: $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$ que es usada en deformaciones en la zona elástica.

Según la ecuación (2.13), el momento flector alcanza el valor $M_p = \frac{2}{3} M_y$ solo cuando $\rho = 0$.

Puesto que claramente no se puede obtener un radio de curvatura cero en todos los puntos de la superficie neutra, se concluye que una deformación totalmente plástica no puede desarrollarse en flexión pura.

II.5.- Criterios de cedencia

Supóngase que un elemento está sujeto a un sistema de esfuerzos que se incrementa gradualmente, la deformación inicial de este elemento es completamente elástica y la forma original del elemento es recuperado cuando se retira la carga. Para determinada combinación de esfuerzos aplicados la deformación plástica aparece. La ley que define el comportamiento del límite elástico bajo posibles combinaciones de esfuerzos se llama “Criterios de cedencia”. Esta ley no sólo aplica a una carga aplicada en una sola dirección en un estado recocido, sino que también al recargar un elemento que ya había sido descargado de un estado plástico previo. Para desarrollar una teoría matemática, es necesario tener un número de idealizaciones [Chakrabarty, 1987].

- Primero. Se asume que las condiciones de carga tales como velocidad de deformación y efectos térmicos son despreciables.
- Segundo. Las uniformidades en el efecto Bauschinger y ciclo de histéresis a escala microscópica también son despreciados.
- Tercero. El material es asumido como isotrópico, es decir, el material tendrá las mismas propiedades mecánicas en todas direcciones.

II.6.- Curva esfuerzo deformación

Existen dos curvas esfuerzo-deformación elastoplásticas como se muestran en la (Figura II.11). Las fuerzas en el modelo son proporcionales al esfuerzo aplicado al elemento, y los desplazamientos son proporcionales a las deformaciones unitarias [Dowling, 1998].

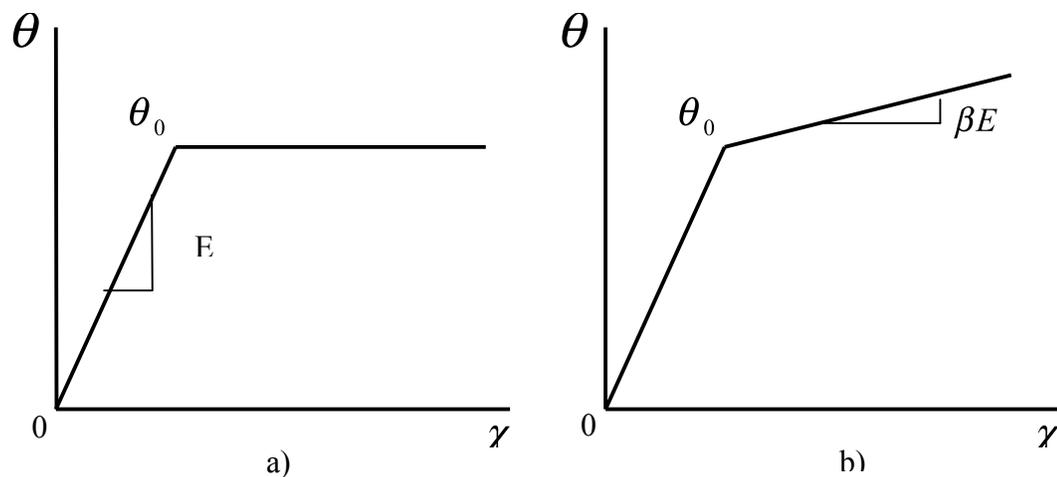


Figura II.11.- Curvas esfuerzo-deformación.

a) Comportamiento elastoplástico perfecto, b) Comportamiento elástico linealmente endurecido.

II.6.1.- Comportamiento Elastoplástico ideal del material.

Para comenzar el análisis el material se considera como un material elastoplástico perfecto. Un material elastoplástico se comporta primero de manera elástico lineal con módulo bien definido E [Gere, 2001]. Después, al haber superado el límite elástico, las deformaciones unitarias crecen a

un esfuerzo más o menos constante llamado esfuerzo de cedencia como se muestra en la (Figura II.11a) [Dowling, 1998].

$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon & (\sigma \leq \sigma_0) \\ \sigma &= \sigma_0 & \left(\varepsilon \geq \frac{\sigma_0}{E} \right) \end{aligned} \quad \text{II.14}$$

Donde σ_0 es el esfuerzo de cedencia. Esta forma es una aproximación inicial del comportamiento de cedencia de ciertos metales y otros materiales. También es frecuentemente usado como una simple idealización para hacer las estimaciones cuando la curva esfuerzo deformación es muy compleja.

Cuando la deformación es más allá del punto de cedencia, la deformación unitaria es la suma de las zonas elástica y plástica.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p \quad \text{II.15}$$

Donde ε_e es la deformación elástica y ε_p es la deformación plástica.

II.6.2.- Comportamiento elástico linealmente endurecido

El comportamiento elástico linealmente endurecido se muestra en la (Figura II.11b), es útil como una aproximación para la curva esfuerzo-deformación que tiene un apreciable incremento en cedencia, para esta relación se requiere un incremento constante de δ . δ Es un factor de reducción de la pendiente después de la cedencia, la pendiente antes de la cedencia es el módulo elástico E , y después de la cedencia es δE . Los valores de δ pueden variar desde cero hasta la unidad. Cuando $\delta = 0$ corresponde al caso de comportamiento elastoplástico perfecto [Dowling, 1998].

Una ecuación para cuando se excede el punto de cedencia puede ser obtenido tomando la pendiente entre dos puntos que se encuentren en esa porción de la curva.

$$\delta E = \frac{\sigma - \sigma_0}{\varepsilon - \varepsilon_0} \quad \text{II.16}$$

Podemos notar que el punto de cedencia de la curva esta dada por $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E$, resolviendo para esfuerzos tenemos.

$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon & (\sigma \leq \sigma_0) \\ \sigma &= (1 - \delta)\sigma_0 + \delta E\varepsilon & (\sigma \geq \sigma_0) \end{aligned} \quad \text{II.17}$$

En ocasiones es conveniente resolver la segunda ecuación con respecto a la deformación.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{(\sigma - \sigma_0)}{\delta E} \quad (\sigma \geq \sigma_0) \quad \text{II.18}$$

El responsable de este modelo es la suma de la deformación elástica E_1 y la deformación plástica (E_2, σ_0) en combinación paralela. La deformación plástica ocurre hasta que el esfuerzo excede la resistencia a la cedencia del material σ_0 y más allá de este punto la pendiente es E_2 , esto es igual a la deformación plástica. Podemos notar que más allá de la cedencia E_2 esta sujeto al esfuerzo $(\sigma - \sigma_0)$, la deflexión en la segunda zona puede ser dada obteniendo la suma de las deformaciones.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{(\sigma - \sigma_0)}{E_2} \quad (\sigma \geq \sigma_0) \quad \text{II.19}$$

Las ecuaciones 2.18 y 2.19 son equivalentes a.

$$E = E_1, \quad \delta E = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \quad \text{II.20}$$

La pendiente δE corresponde a la rigidez de las dos zonas E_1 y E_2 en serie.

II.6.3.- Relación Ramberg-Osgood

Una relación similar a la propuesta por Ramberg y Osgood en 1963 [Dowling, 1998] es frecuentemente usado. Aquí la deformación elástica ε_e y plástica ε_p son consideradas de forma separada y sumados después. Se usa una relación exponencial, pero es aplicado además a la deformación plástica.

$$\sigma = H \varepsilon_p^n \quad \text{II.21}$$

Donde n es también llamado exponente de endurecimiento por deformación. La deformación total es la suma de las deformaciones elásticas y plásticas, donde la deformación elástica esta relacionada con el esfuerzo y E , y la deformación plástica es la desviación de la pendiente elástica (Figura II.11b)

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p \quad \text{II.22}$$

La combinación de las ecuaciones anteriores nos da la relación entre esfuerzo y deformación total.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{II.23}$$

Esta ecuación no puede ser resuelta exclusivamente por esfuerzos. Esta provee una simple curva suave para cada uno de los valores de σ y no da distintos puntos de cedencia. Así, contrasta con la descripción de la forma elástica con endurecimiento potencial, el cual es discontinuo con distintos puntos de cedencia σ_0 .

La ecuación Ramberg-Osgood y la relación de endurecimiento potencial son esencialmente equivalentes si la deformación es suficientemente como la porción plástica dominante y que la porción elástica pueda ser considerada insignificante.

II.6.4.- Modelo reológico del endurecimiento no lineal

La curva esfuerzo-deformación de cualquier tipo elástico, endurecimiento potencial o Ramberg-Osgood pueden ser modelados por una serie de aproximaciones de líneas segmentadas como se ilustra en la Figura II.12. El final del primer segmento que es el punto de cedencia elástico, el caso de endurecimiento potencial, y los bajos esfuerzos donde la deformación plástica es pequeña para el caso Ramberg-Osgood. El correspondiente modelo reológico tiene un comportamiento lineal en la pendiente inicial elástica, y una serie de combinaciones de deslizamientos paralelos que causan un comportamiento no lineal. El esfuerzo de cedencia para varios deslizamientos tiene un alto incremento en sus valores y corresponde al fin del segmento de la línea en la curva esfuerzo-deformación. La pendiente en cualquiera de los segmentos corresponde a la rigidez de todos los segmentos en serie con todos los deslizamientos que tiene la cedencia.

$$\delta_j E = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3} + \dots + \frac{1}{E_j}} \quad \text{II.24}$$

Donde δ_j es el factor de reducción de la pendiente segmentada que comienza en σ_{oj}

La deformación en el modelo es la suma de las deformaciones de cada segmento.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_j \quad \text{II.25}$$

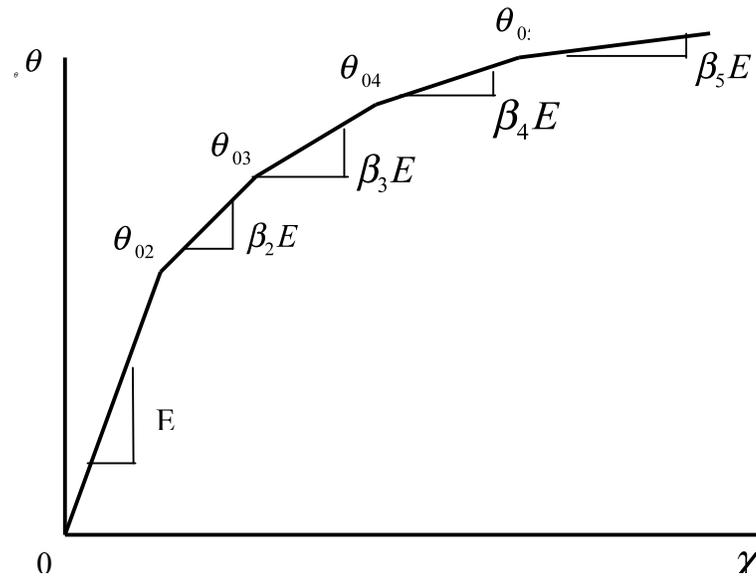


Figura II.12.- Modelo de endurecimiento no lineal de la curva esfuerzo deformación.

El esfuerzo total cuando es rebasado el esfuerzo de cedencia en cada uno de los segmentos se puede calcular con la ecuación.

$$\sigma = \sigma_{oi} + E_i \varepsilon_i \quad (\sigma > \sigma_{oi}) \quad \text{II.26}$$

Resolviendo la ecuación para deformaciones nos da.

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma - \sigma_{oi}}{E_i} \quad (\sigma > \sigma_{oi}) \quad \text{II.27}$$

La aplicación de esta ecuación para cualquier segmento con cedencia es:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_{o2}}{E_2} + \frac{\sigma - \sigma_{o3}}{E_3} + \dots + \frac{\sigma - \sigma_{oj}}{E_j} \quad \text{II.28}$$

II.7.- Reglas de endurecimiento.

Las reglas de endurecimiento es un concepto fundamental que describe los cambios, los cuales toman lugar en la superficie de cedencia. Esto prescribe la condición para el inicio del flujo plástico como un resultado de la deformación plástica. En general, la superficie de cedencia puede cambiar en forma (distorsión de la superficie de cedencia), tamaño (endurecimiento isotrópico) y/o localización de centro (endurecimiento cinemático) como una consecuencia de deformación plástica.

II.7.1.- Endurecimiento isotrópico

Se ha visto que un elemento de material cede cuando la magnitud del esfuerzo incrementa su valor hasta que el punto de cedencia es rebasado. Si el material es no endurecido, el estado de esfuerzo en la zona plástica puede cambiar de tal manera que el punto de cedencia pueda caer siempre en el mismo punto. Pero si el material es endurecido por deformación, la magnitud y la forma del punto de cedencia depende completamente de la historia de la deformación plástica. Podemos asumir que el material es isotrópico en su estado recocido y que el desarrollo del efecto Bauschinger en el trabajo en frío puede ser despreciado. Los criterios de cedencia son apropiados para cualquier estado de endurecimiento del material [*Chakrabarty, 1987*].

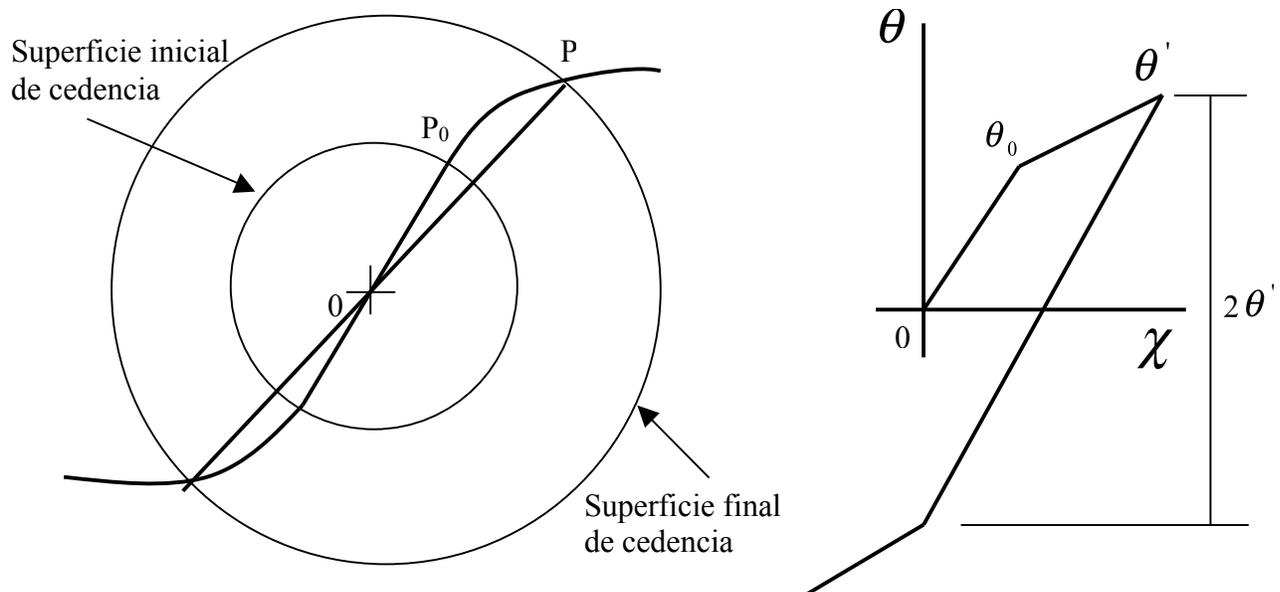


Figura II.13.- Representación de la regla de endurecimiento isotrópico.

Una conveniente formulación matemática para el endurecimiento por deformación isotrópico se obtiene que más allá de la superficie de cedencia se expande uniformemente sin cambio de forma y sin importar en que dirección está aplicada la carga ya sea tensión o compresión [Davenport, Higginson, Sellars, 1999 y Zeng y Xia, 2007], como el estado de esfuerzos cambia a lo largo de POP (Figura II.13), la cantidad de endurecimiento esta dado por el estado plástico final. Desde que el punto de cedencia es aumentado en tamaño, cualquier estado de endurecimiento puede ser definido por el actual esfuerzo de cedencia en tensión uniaxial. Por lo tanto, es necesario relacionar el actual límite elástico a la cantidad de deformación plástica después de un determinado estado inicial de cedencia [Reynolds y Lyons, 1997].

II.7.2.- Endurecimiento cinemático

También se puede considerar la regla de endurecimiento tomando en cuenta la anisotropía y el efecto Bauschinger que exhibe el material cuando es endurecido por deformación [Chakrabarty, 1987]. Se ha asumido que el material es inicialmente isotrópico, teniendo idénticos puntos de cedencia en tanto en tensión como en compresión. En la regla de endurecimiento cinemática, asume que la superficie inicial de cedencia se traslada rígidamente en el espacio del esfuerzo sin cambiar su forma [Stouffer y Dame, 1996], esto significa el rango elástico es preservado (Figura II.14).

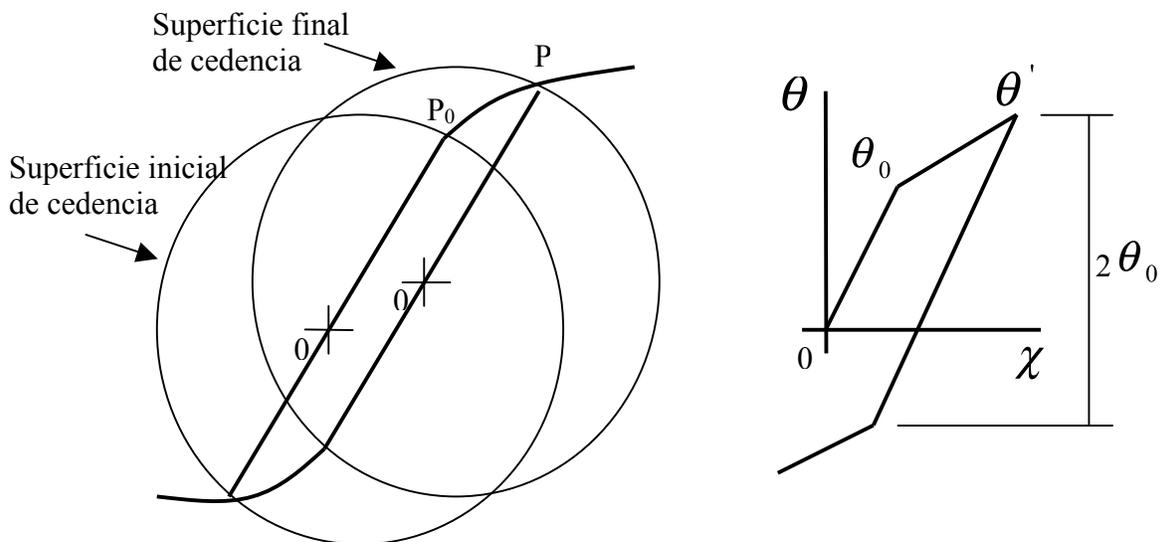


Figura II.14.- Representación de la regla de endurecimiento cinemática.

II.8.- Esfuerzos residuales

Si un elemento hecho de material elastoplástico se le aplica un momento flector suficientemente grande para que se desarrolle zonas plásticas. Cuando el momento flector se reduce a cero, el valor final del esfuerzo y deformación en un punto del elemento no será cero, habrá un esfuerzo residual en casi todos los puntos.

Puesto que la relación lineal entre σ_x y ϵ_x se aplica a todos los puntos del elemento durante la fase de descarga, la Ecuación II.1 puede usarse para obtener el cambio del esfuerzo en cualquier punto dado. En otras palabras la fase de descarga puede manejarse suponiendo que el elemento es completamente elástico.

$$\sigma'_m = \frac{Mc}{I} \quad \text{II.29}$$

Los esfuerzos residuales se obtienen aplicando el principio de superposición. Se analiza por una parte, los esfuerzos debidos a la aplicación del momento flector M_y , por otra, los esfuerzos contrarios debido al momento igual y opuesto $-M$ que se aplica para la descarga del elemento. El primer grupo de esfuerzos refleja la conducta elastoplástica del material durante la fase de carga, y el segundo grupo la conducta lineal del material durante la fase de descarga. Sumando los grupos de esfuerzos, se obtiene la distribución de esfuerzos residuales en el elemento (figura II.15) [Beer y Johnston, 1981] [Hibbeler, 1997].

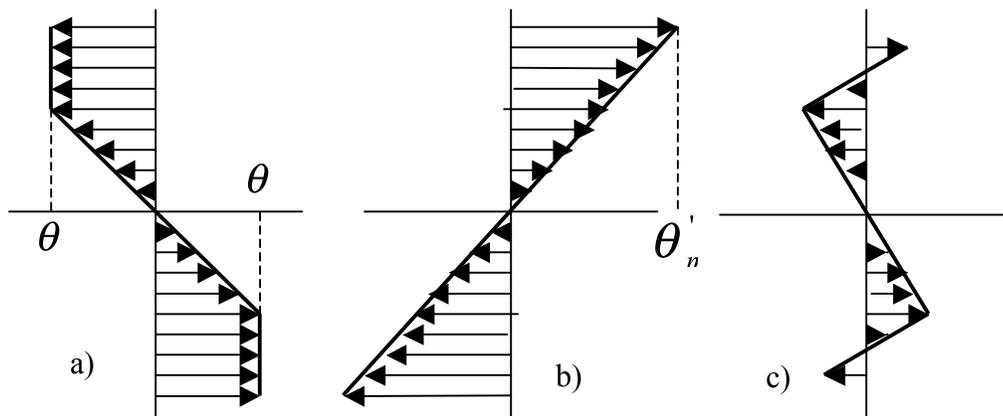


Figura II.15.- Obtención de los esfuerzos residuales, a). Fase de carga, b). Fase de descarga, c). Método de superposición.

II.10 Sumario.

En el capítulo anterior y en este se hace énfasis en que las propiedades mecánicas de los materiales varían cuando estos son sometidos a deformaciones, para determinar que tanto varían dichas propiedades es necesario conocer la naturaleza de las deformaciones, es decir, si estas son producidas por agentes externos aplicados de forma homogénea o no homogénea.

En el siguiente capítulo se realizará el desarrollo experimental de esta investigación por lo que en este capítulo se presenta el marco teórico, así como también los diferentes ensayos a realizar para analizar el cambio en el comportamiento mecánico del material sometido a deformaciones plásticas.

El desarrollo experimental comprende, la manufactura de las probetas, su preparación (recocido de probetas), pegado de galgas extensométricas, preparación de los bancos de trabajo y desarrollo de los diferentes ensayos mecánicos para la determinación de la variación del comportamiento mecánico del material y obtener la curva esfuerzo deformación.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS NUMÉRICO

III.1.- Introducción

En esta sección se presenta el desarrollo de la evaluación numérica sobre la simulación por endurecimiento por deformación e inducción de esfuerzos residuales en una viga de sección transversal rectangular. Inicialmente, es necesario obtener las propiedades mecánicas del material que será utilizado, lo cual se realizará por medio de la teoría de flexión pura y el ensayo de cuatro puntos de flexión. La decisión de realizar la caracterización por medio de esta metodología se basó en que por lo regular los materiales se consideran en condiciones ideales (sin historia previa), sin embargo esto no es así. Los materiales por lo regular tienen una historia previa, la cual sólo puede ser removida por medio de un tratamiento térmico de recocido para relevado de esfuerzos. En este trabajo es necesario asegurarse que el material utilizado no cuente con esta historia previa, ya que se desea introducir un campo de esfuerzos que esté controlado y este sólo puede realizarse si se conoce que el material está libre de un estado de esfuerzos. La inducción del campo de esfuerzos residuales se realizará después de aplicar un tratamiento térmico. Así, al aplicar las pruebas de flexión, se puede asegurar que no existe historia previa, ya que los comportamientos de compresión y tensión serán similares.

La simulación que aquí se presenta, está basado en introducir un campo de esfuerzos residuales en vigas pre-deformar y romper la axi-simetría de campo de esfuerzos residuales inducido. Asimismo, lo que se busca en esta investigación, es aprovechar los procesos mecánicos convencionales y fortalecer la resistencia mecánica del material. De esta manera, tratar de encontrar una aplicación en el ámbito de la industria.

En este trabajo, también en esta sección, se evalúa numéricamente el Método de Respuesta de Grieta (*CCM*). El cual será utilizado de manera experimental para determinar y evaluar los campos de esfuerzos residuales inducidos. Para la realización del análisis numérico se utilizó el Método de Elementos finitos (*MEF*) por medio de un paquete computacional comercial [*ANSYS 11.0, 2007*].

III.2.- Consideraciones para el análisis numérico

III.2.1.- Descripción de problema

El problema principal del análisis numérico propuesto en este trabajo de investigación, es caracterizar el material mediante una configuración de cuatro puntos de flexión, cuando éste

se encuentra con diferentes estados de historia previa (sin historia previa, pre-deformado ligero de $3\varepsilon_Y$ y pre-deformado severo de $7\varepsilon_Y$), cuantificando los cambios en los puntos de cedencia, tanto en tensión como en compresión de forma simultánea. Además, evaluar los campos de esfuerzos residuales que origina la aplicación de las cargas no homogéneas que sobrepasan el punto de cedencia.

Para la evaluación numérica, se propone una viga prismática de sección transversal rectangular (Figura III.1). Se utilizó el elemento *Plano 183* [ANSYS 11.0, 2007]. Está definido como un elemento plano (parabólico), tiene una conducta de desplazamiento cuadrático y se ajusta para modelar mallas irregulares. Este elemento se define por 8 nodos y tiene dos grados de libertad para cada nodo; traslación en x y y (permite rotación en z). Asimismo, tiene capacidad para realizar estudios de plasticidad, hiperplasticidad, creep, rigidez, grandes deflexiones y grandes capacidades de deformación.

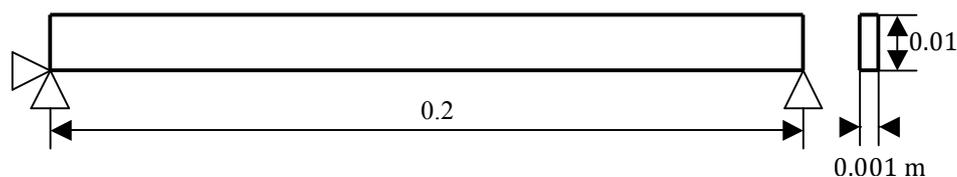


Figura III.1.- Viga prismática propuesta para la evaluación numérica.

El mallado de la viga fue mapeado con diferentes densidades, es decir, es más fino en el centro de la viga debido a que es la zona sometida a flexión pura constante y es donde se presentan los máximos esfuerzos, conforme se va haciendo a los extremos el mallado fue más burdo debido a que estas son zonas que están fuera del área de estudio (figura III.2). Además se usaron condiciones de esfuerzo plano para realizar el análisis numérico de la deformación plástica [Guerra-Loeza et al, 2001].



Figura III.2.- Discretización de la viga.

III.2.2.- Datos de la viga para el análisis

Para realizar esta investigación se seleccionó un acero inoxidable *AISI 316L*, el cual es utilizada para la manufactura de implantes biomecánicos. Las propiedades mecánicas generales que se obtuvieron de manera experimental se presentan en la Tabla III.1.

Tabla III.1.- Propiedades mecánicas del acero inoxidable *AISI 316L*.

Propiedades Mecánicas	Sistema Métrico
Esfuerzo de cedencia (σ_y)	370 MPa
Módulo Elástico (E)	190 GPa
Razón de Poisson (ν)	0.28

De la misma manera en la Tabla III.2 se presentan los datos más significativos obtenidos por la prueba experimental de cuatro puntos de flexión y que serán utilizados como caracterización del material en la simulación numérica.

Tabla III.2.- Comportamiento del material obtenido de forma experimental.

Datos de la curva esfuerzo-deformación	
Esfuerzo (MPa)	Deformación unitaria
370	0.001947
425	0.005104
471	0.008171
491.7	0.009828
513.5	0.011726
525	0.012756
546	0.015000
558	0.016500
567	0.018000
575.8	0.019500
584.5	0.021000
590.5	0.022500
596.85	0.024000

En la Figura III.3 se puede observar la gráfica de caracterización utilizada en la simulación numérica.

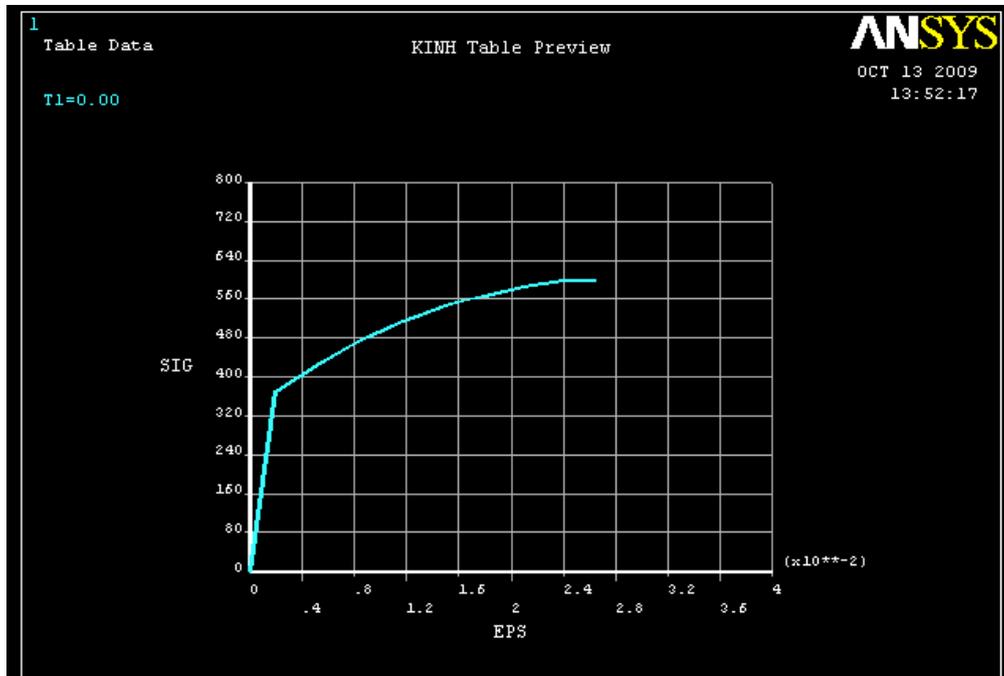


Figura III.3.- Comportamiento mecánico del material obtenido experimentalmente.

III.2.3.- Procedimiento

La solución para este tipo de problemas se establece mediante diversos pasos de carga y descarga. En el primer análisis que se realiza en este trabajo de investigación se efectuará un caso de corroboración, donde en una viga de sección transversal cuadrada se le aplicará una carga no homogénea (flexión, mediante la configuración de cuatro puntos). La fuerza será aplicada será lo suficientemente grande para deformar plásticamente al componente. Posteriormente se realiza un segundo análisis, en el cual se remueven la carga aplicada (descarga) y con el cual se induce un campo de esfuerzos residuales. Este primer caso se efectuó para evaluar la eficiencia y exactitud del método numérico, ya que el campo de esfuerzos residuales inducido es muy fácil de evaluar por medios analíticos [Urriolagoitia-Sosa, 2005].

La simulación numérica para todos los casos de estudio, se realizará la inducción de un campo de esfuerzos residuales por medio de cuatro puntos de flexión. Los casos de estudio variarán dependiendo si les fue inducidas una historia previa por medio de una carga homogénea (carga axial en tensión o compresión). La viga propuesta se le aplican condiciones de frontera en los nodos externos de la parte inferior, en el nodo externo izquierdo se restringió en los ejes x y y , mientras que en el nodo externo derecho se restringió sólo en el eje y (Figura III.4).

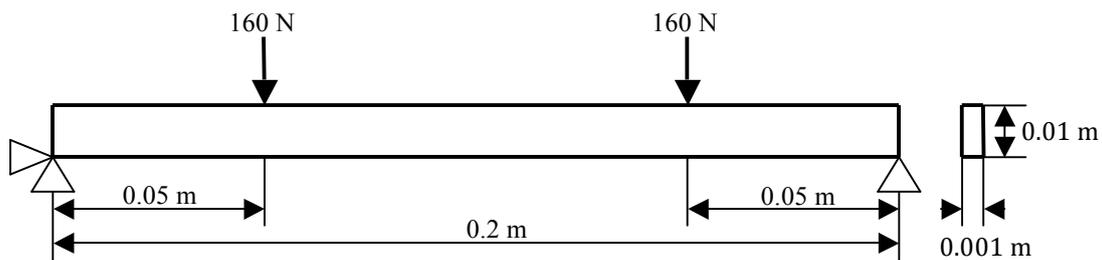


Figura III.4.- Modelo de cuatro puntos de flexión.

Todos los nodos se dejaron con libertad de rotación en el eje z . Las cargas se localizan sobre dos nodos separados (Figura III.4). La carga aplicada fue de 160 N en dirección negativa con respecto al eje y y a una distancia sobre los nodos ubicados en la parte superficie superior a 0.05 m. Por lo que se genera un momento de 8 Nm.

Para los casos en los que se considero historia previa, se realiza un análisis previo aplicando una pre-deformación homogénea en forma axial a la viga antes de realizar la operación de cuatro puntos de flexión (Figura III.5). La pre-deformación se realizó en dos niveles; ligero y severo, en ambos casos se realizaron pre-deformaciones tanto en tensión como en compresión, por separado.

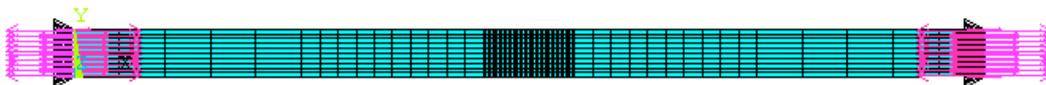


Figura III.5.- Pre-deformado de la viga en ANSYS.

La pre-deformación tiene una relación directa con la deformación unitaria del punto de cedencia, para el caso de deformación ligera se aplica tres veces la deformación de cedencia ($3\varepsilon_Y$) y para el caso de deformación severa se aplica siete veces la deformación de cedencia ($7\varepsilon_Y$). Además se aplicó la regla de endurecimiento Cinemático para determinar el comportamiento mecánico del componente. Se eligió esta regla de endurecimiento ya que es la que se más acerca al comportamiento del material de forma elasto-plástica [Urriolagoitia-Sosa, 2006].

III.3.- Casos de estudio

III.3.1.- Primer caso de estudio (material sin historia previa)

El desarrollo de esta investigación inicia con un caso de estudio para corroborar la eficacia de la simulación numérica. En este sentido se eligió deformar por medio de flexión pura una viga e inducir un campo de esfuerzos. Asimismo, se puede evaluar el comportamiento de la regla de endurecimiento.

Simulando al componente en un estado ideal (sin historia previa), se somete a un ensayo de cuatro puntos de flexión mediante el procedimiento anteriormente descrito. Tal y como se esperaba, se presentan los máximos esfuerzos en la parte central de la viga donde el mallado fue más fino, presentando esfuerzos de compresión en la superficie superior de la viga y esfuerzos de tensión en la superficie inferior de la viga para la etapa de carga (Figura III.6).

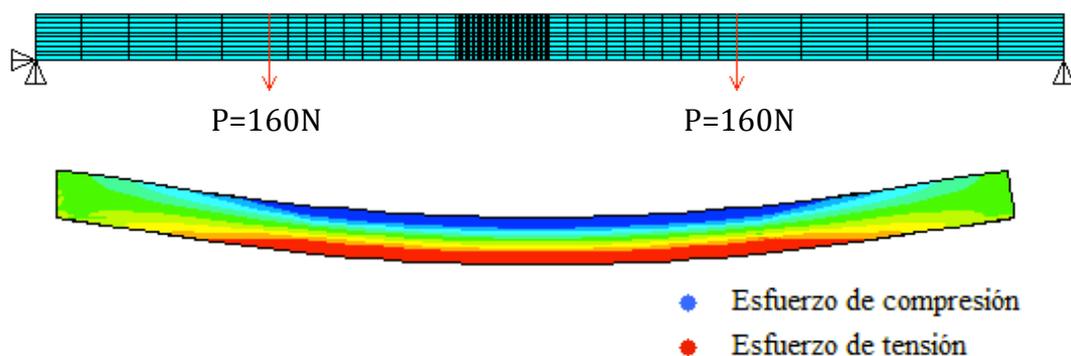


Figura III.6.- Simulación de viga flexionada en ANSYS.

En la Figura III.7 se presenta la secuencia de carga y se puede observar gráficamente el comportamiento elastoplástico a lo largo de la altura de la viga en su zona central. Claramente se puede evaluar el comportamiento en tensión como en compresión del material al ser cargado por un momento flexionante constante y puro.

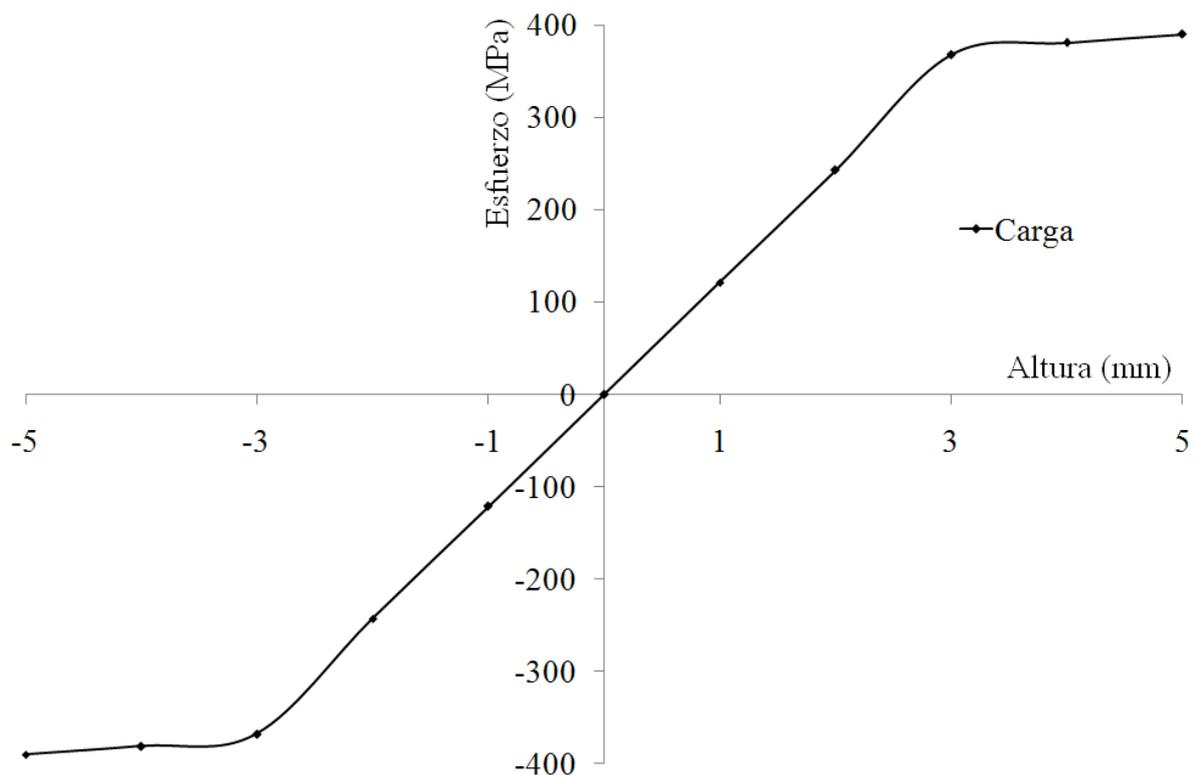


Figura III.7.- Aplicación de carga en material sin historia previa.

En la segunda etapa, se descarga al componente mecánico y se observa que debido a que se sobrepasó el punto de cedencia mediante la aplicación de una carga no homogénea, el material queda deformado permanentemente e inducido con un campo de esfuerzos residuales (Figuras III.8 y III.9).

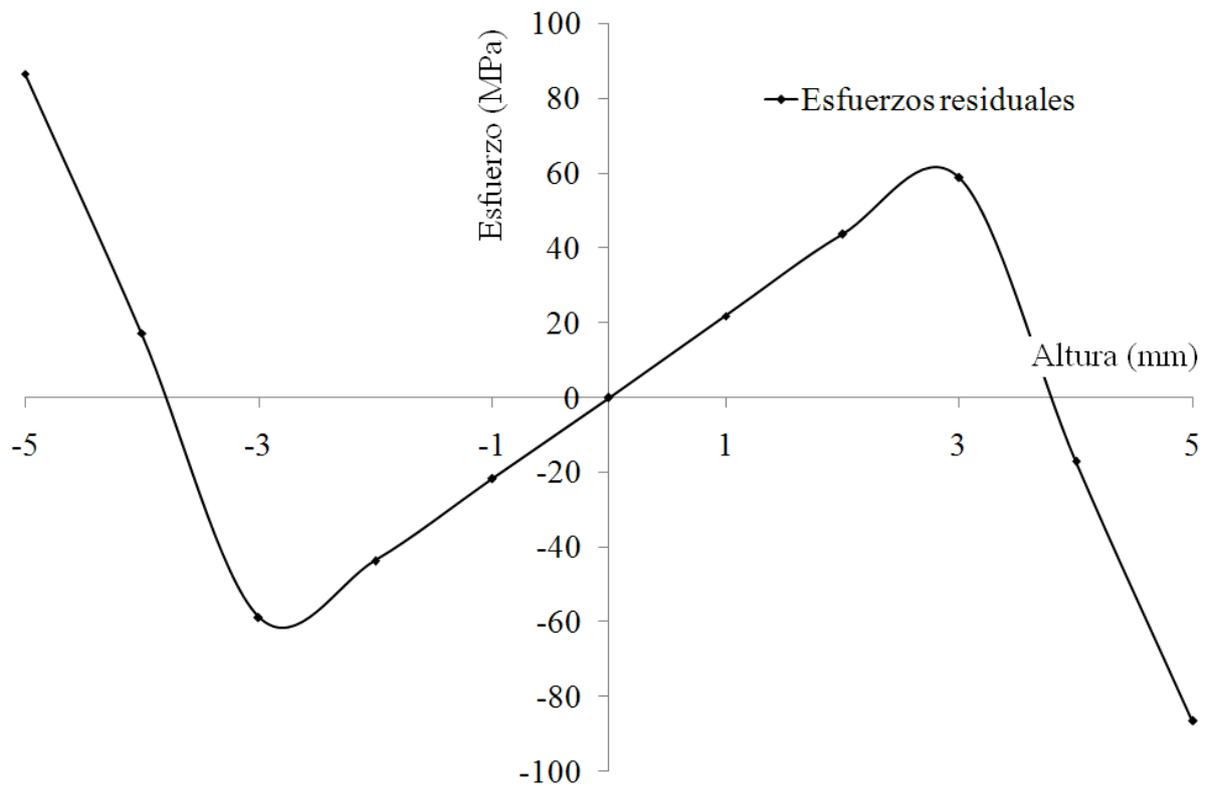


Figura III.8.- Esfuerzos residuales en material sin historia previa.

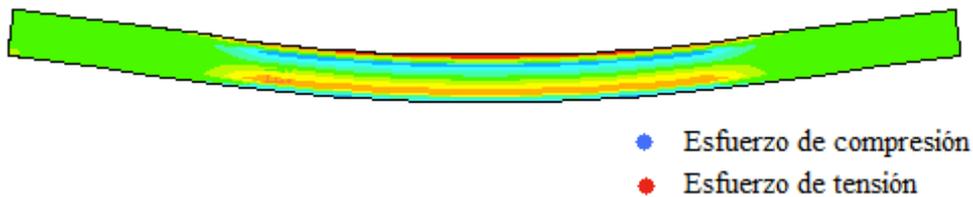


Figura III.9.- Esquema de los esfuerzos residuales por el MEF.

Las Figuras III.7 y III.8 sirven como referencia para observar el cambio en los puntos de cedencia del material y la manipulación de los campos de esfuerzos residuales mediante el pre-deformado axial en tensión o en compresión.

III.3.2.- Segundo caso de estudio (material pre-deformado ligero en tensión ($3\epsilon_y$))

El cambio en las propiedades mecánicas del material y manipulación de los campos de esfuerzos residuales se puede realizar por medio del endurecimiento por deformación. Para esto, se somete a la viga a un pre-deformado axial homogéneo en tensión (Figura III.10) que supere el punto de cedencia. Como se puede ver en la Figura III.10, el endurecimiento por deformación se llevó a cabo de buena manera, ya que todo el material muestra la aplicación de un esfuerzo homogéneo y constante.



Figura III.10.- Deformación homogénea del material.

Para este caso de estudio se decidió realizar un endurecimiento ligero que equivale a $3\varepsilon_Y$. Primeramente la pre-deformación se realiza en tensión. Para posteriormente aplicar la configuración de cuatro puntos de flexión e inducir un campo de esfuerzos residuales (Figura III.11). También en esta figura se presenta el estado final de deformación que se obtuvo por medio de la simulación numérica en la etapa de carga.

Esta configuración de pre-deformado ligero en tensión y cuatro puntos de flexión, puede mostrar una alteración de la inducción del campo de esfuerzos residuales. Desde la etapa de carga se puede observar una ruptura de la condición de axisimetría en el espécimen. Esto es evidente en la figura III.11a, ya que la condición de flexión no se encuentra, su inicio para tensión y compresión, en cero. Lo que infiere que en el material existe historia previa. Lo anterior se entiende como que la resistencia a la cedencia de material se incrementó en tensión, mientras que en compresión disminuyó (Figura III.11a).

En la Figura III.12 se presentan los resultados obtenidos de la segunda etapa (descarga). Se puede observar en la Figura III.12, el campo de esfuerzos residuales no es benéfico para el

material, debido a su alto valor de esfuerzos residuales en tensión (ya que estos favorecen la propagación de grietas en el material) [Urriolagoitia-Calderon y Hernández-Gómez, 1996] [Urriolagoitia-Calderon y Hernández Gómez, 1997]. Por lo que se decide invertir la dirección del pre-deformado ligero inicial a compresión. En esta figura se puede notar fácilmente el cambio de la configuración del campo de esfuerzos residuales donde este ya no es axisimétrico.

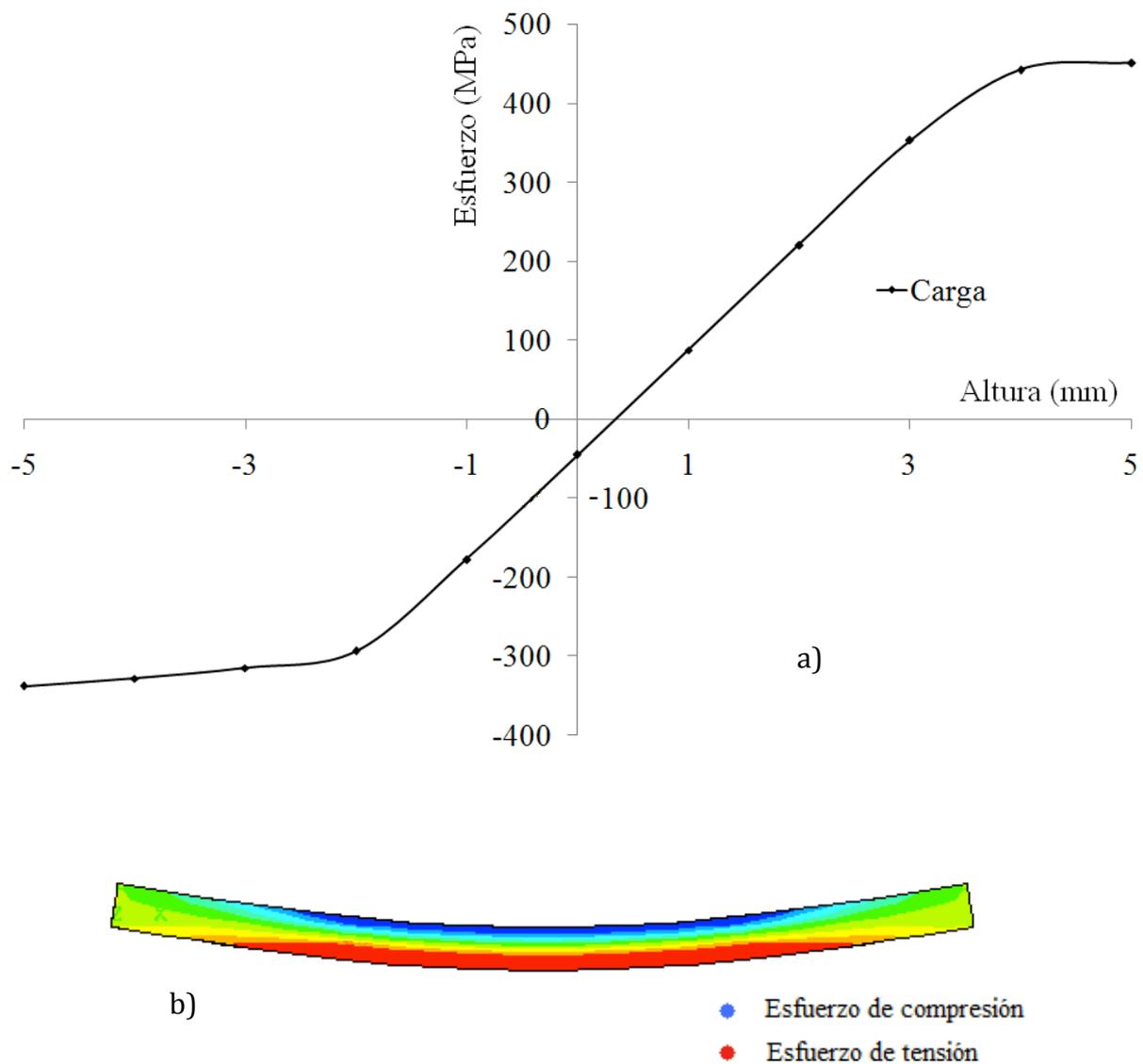


Figura III.11.- Segundo caso de estudio
 a) Aplicación de carga en el material con pre-deformado axial ligero en tensión.
 b) Correspondiente simulación de viga flexionada con historia previa.

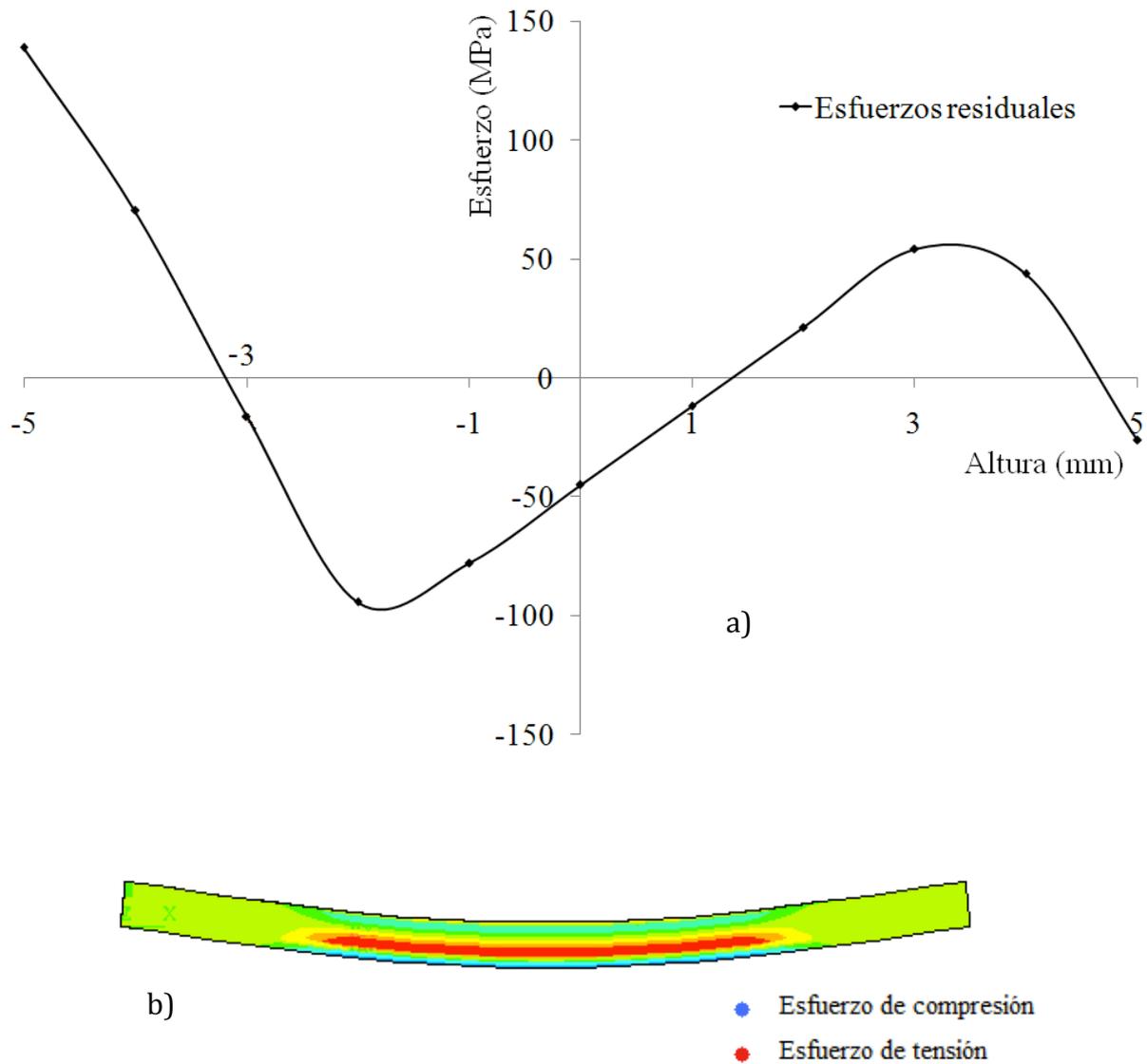


Figura III.12.- Descarga del segundo caso de estudio
 a) Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado ligero en tensión.
 b) Correspondiente simulación de esfuerzos residuales por MEF.

En la Figura III.13 se puede observar el cambio en las propiedades mecánicas que son favorecidas por la pre-compresión del material, Donde se puede ahora observar que el punto de cedencia en compresión tuvo un incremento, mientras que la condición elástica en tensión

disminuyo. En este caso de pre-deformado, se observa una manipulación en el campo de esfuerzos residuales benéfico para el material (Figura III.14), debido a que prebalecen los esfuerzos residuales en compresión en las superficies de la viga, que es en donde se presentan los grietas [Urriolagoitia-Calderon y Hernández-Gómez, 1997] [Sauceda-Meza et all, 2001].

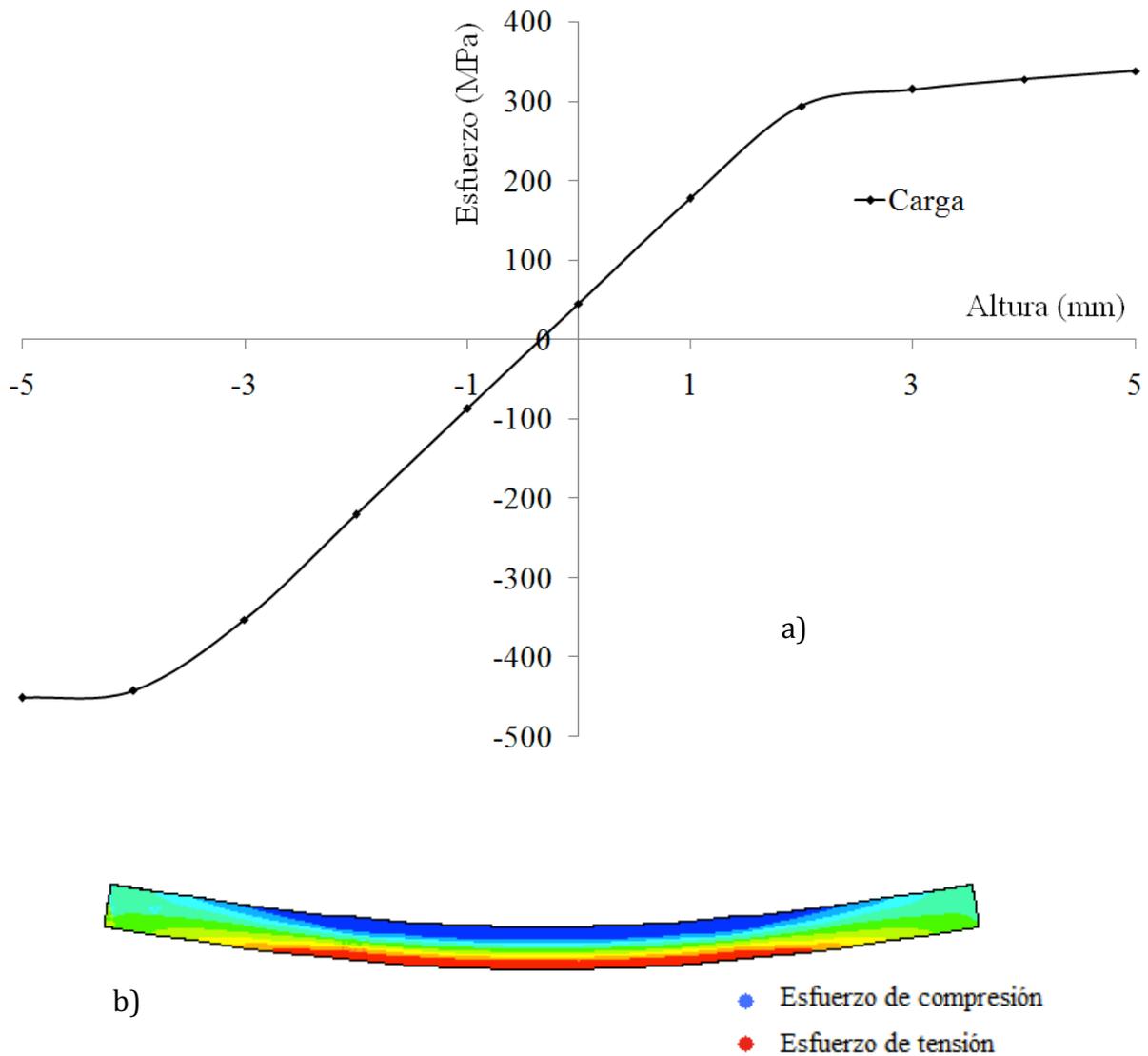


Figura III.13.- Segundo caso de estudio con pre-carga en compresión.
 a) Aplicación de carga en material con pre-deformado axial ligero en compresión.
 b) Correspondiente simulación de viga flexionada con historia previa.

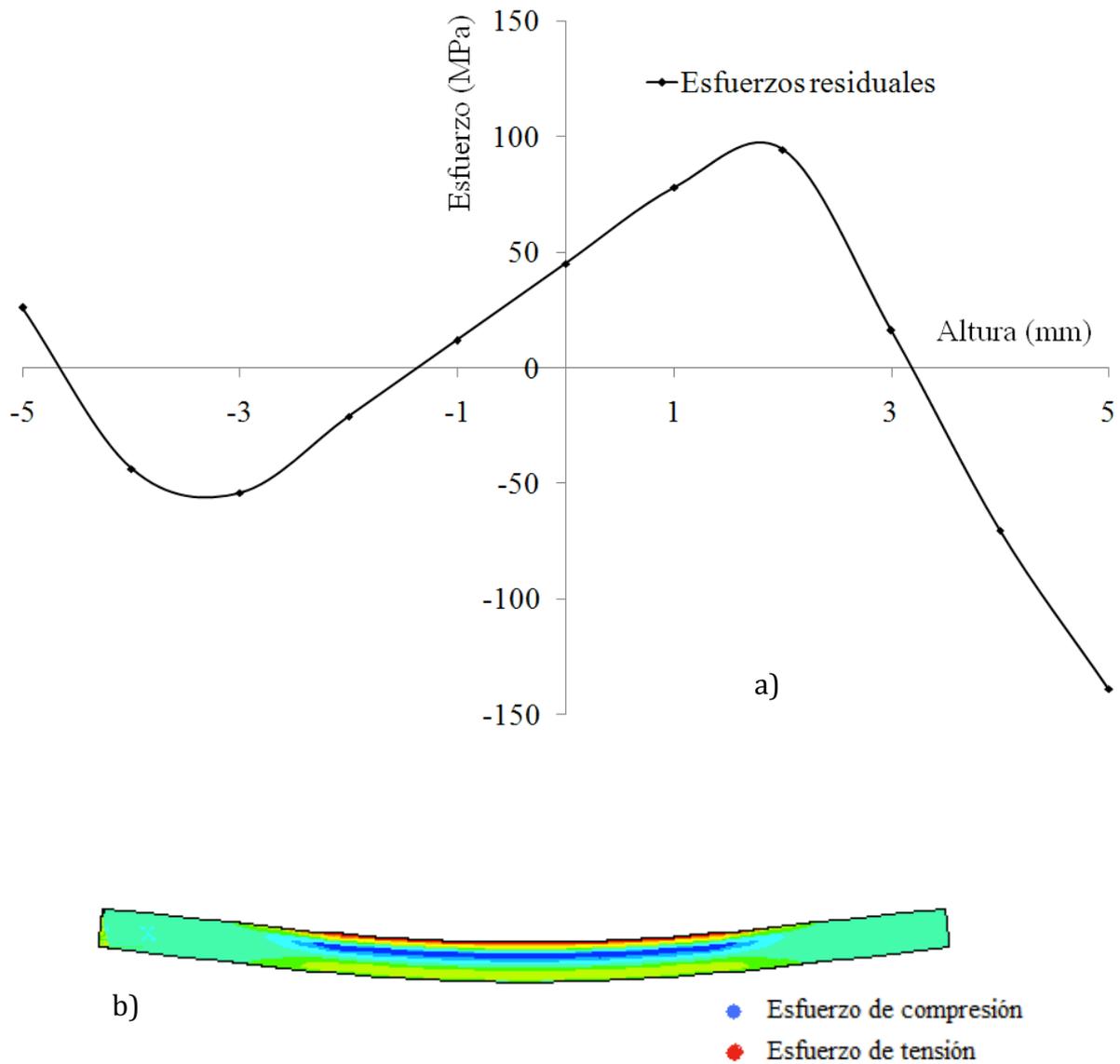


Figura III.14.- Descarga del segundo caso de estudio con pre-carga en compresión
 a) Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado ligero en compresión.
 b) Correspondiente simulación de esfuerzos residuales por MEF.

III.3.3.- Tercer caso de estudio (material pre-deformado severo en tensión ($7\epsilon_Y$))

Para el último caso de estudio, se incrementa la pre-deformación axial en tensión de ligero a severo (siete veces la deformación de cedencia). Así, se pretende incrementar el efecto de la historia previa y poder visualizar el cambio del estado axisimétrico en el campo de los esfuerzos residuales. En la Figura III.15, se presenta el diagrama de carga a flexión del

material pre-deformado a tensión con una deformación de siete veces la deformación de cedencia.

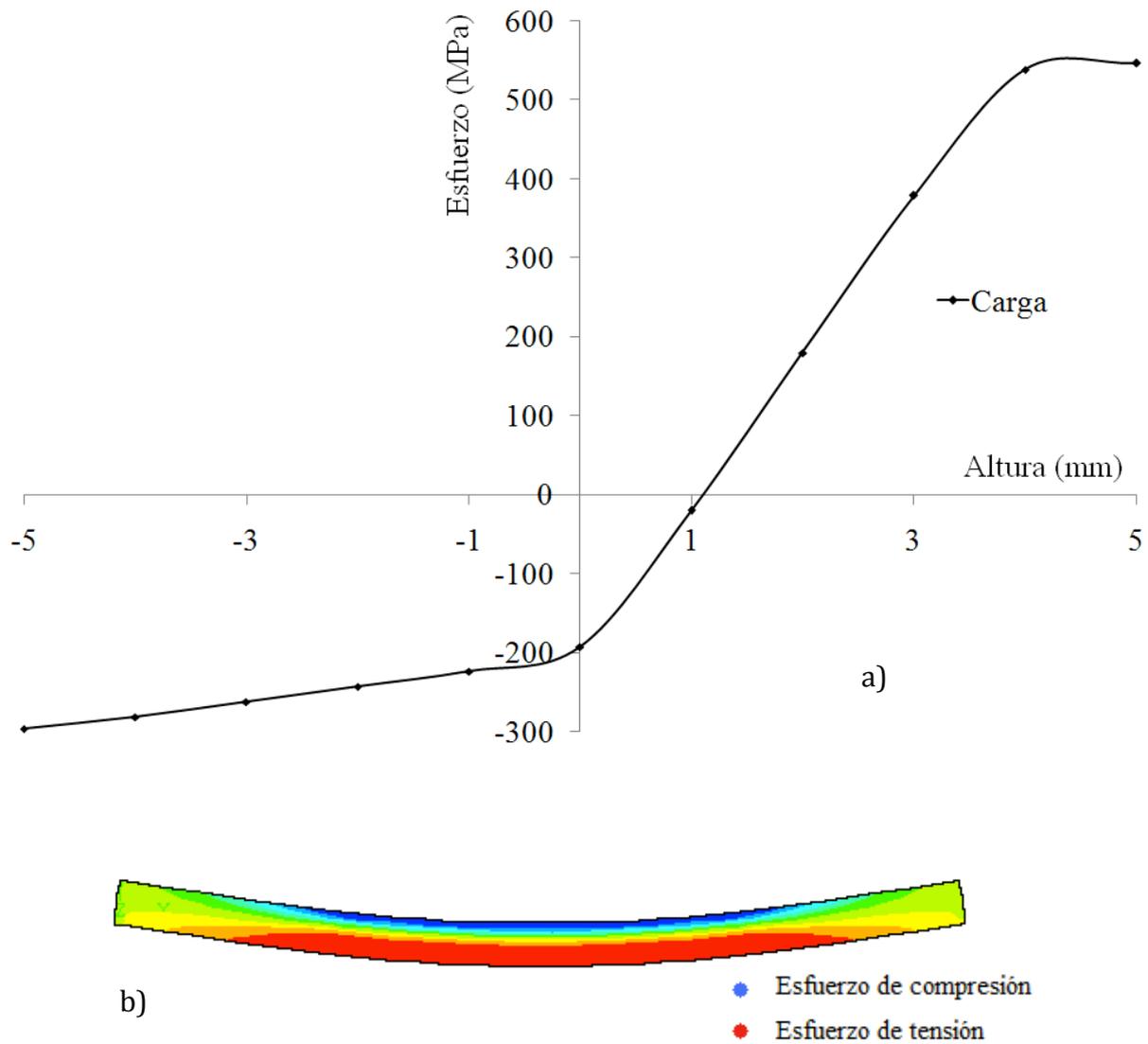


Figura III.15.- Tercer caso de estudio

- a) Aplicación de carga en el material con pre-deformado axial severo en tensión.
- b) Correspondiente simulación de viga flexionada con historia previa.

En la Figura III.16, se observa e campo de esfuerzos residuales para el mismo caso de pre-deformado. Como en el caso de endurecimiento ligero, se puede observar en el caso de endurecimiento severo, que el campo de esfuerzos residuales es detrimental, ya que ambas

superficies se encuentran a tensión. Lo anterior beneficiará a la nucleación y propagación de grietas. Por lo que nuevamente se reinvierte el sentido del pre-deformado a compresión y se induce esfuerzos residuales mediante cuatro puntos de flexión (Figuras III.17 y III.18).

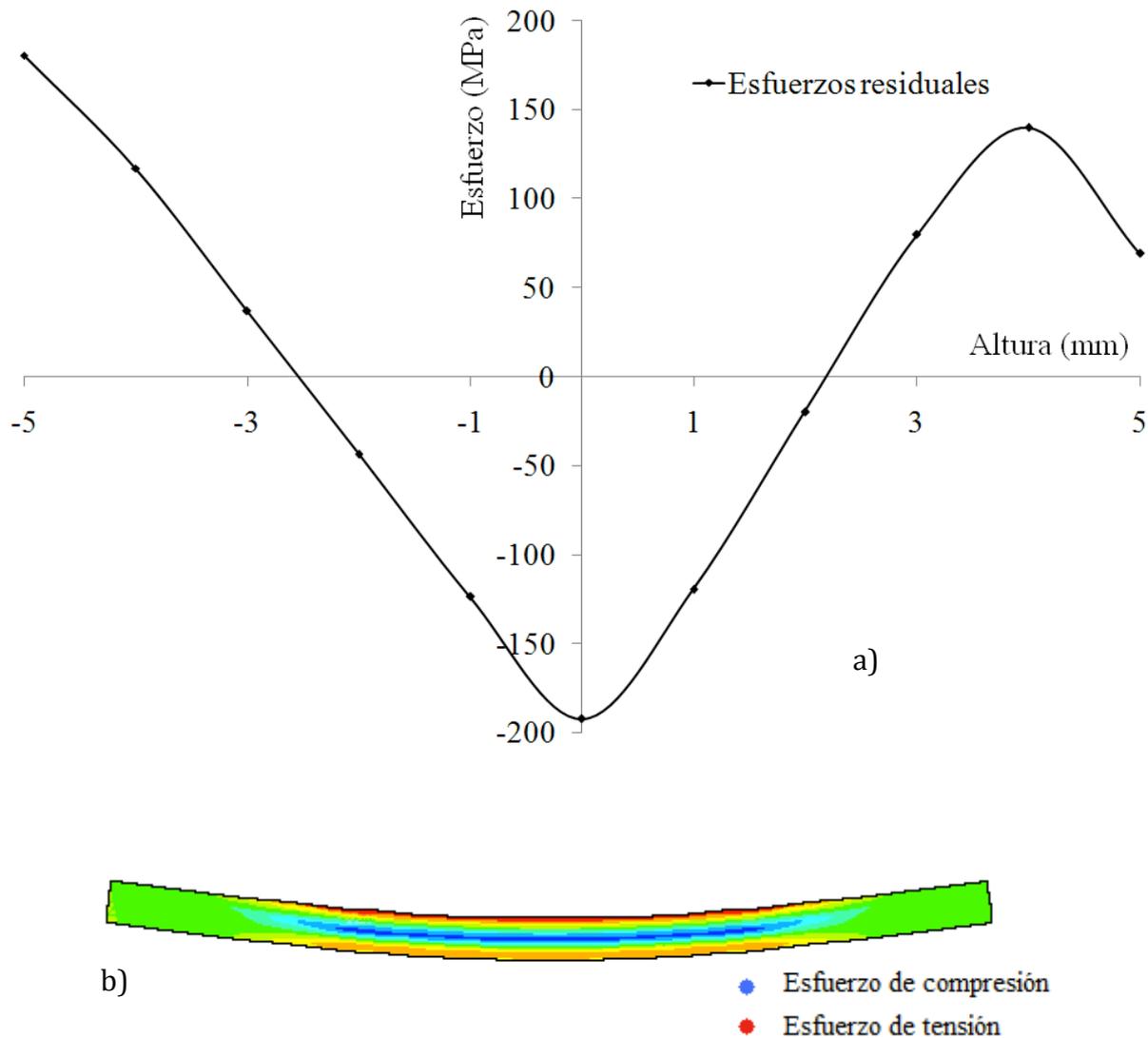


Figura III.16.- Descarga del tercer caso de estudio
 a) Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado severo en tensión.
 b) Correspondiente simulación de esfuerzos residuales por MEF.

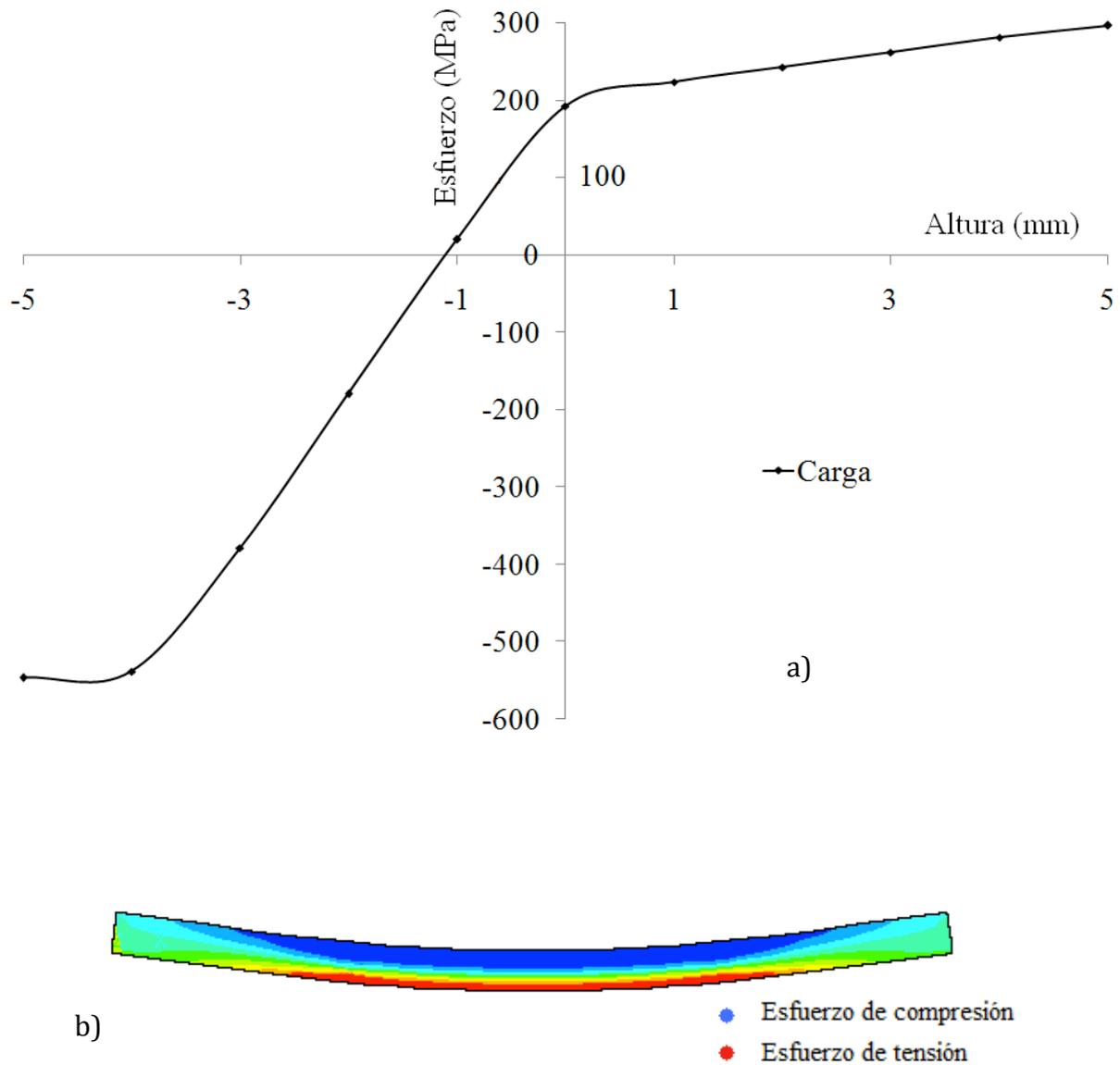


Figura III.17.- Tercer caso de estudio con pre-carga en compresión.
 a) Aplicación de carga en material con pre-deformado axial severo en compresión.
 b) Correspondiente simulación de viga flexionada con historia previa.

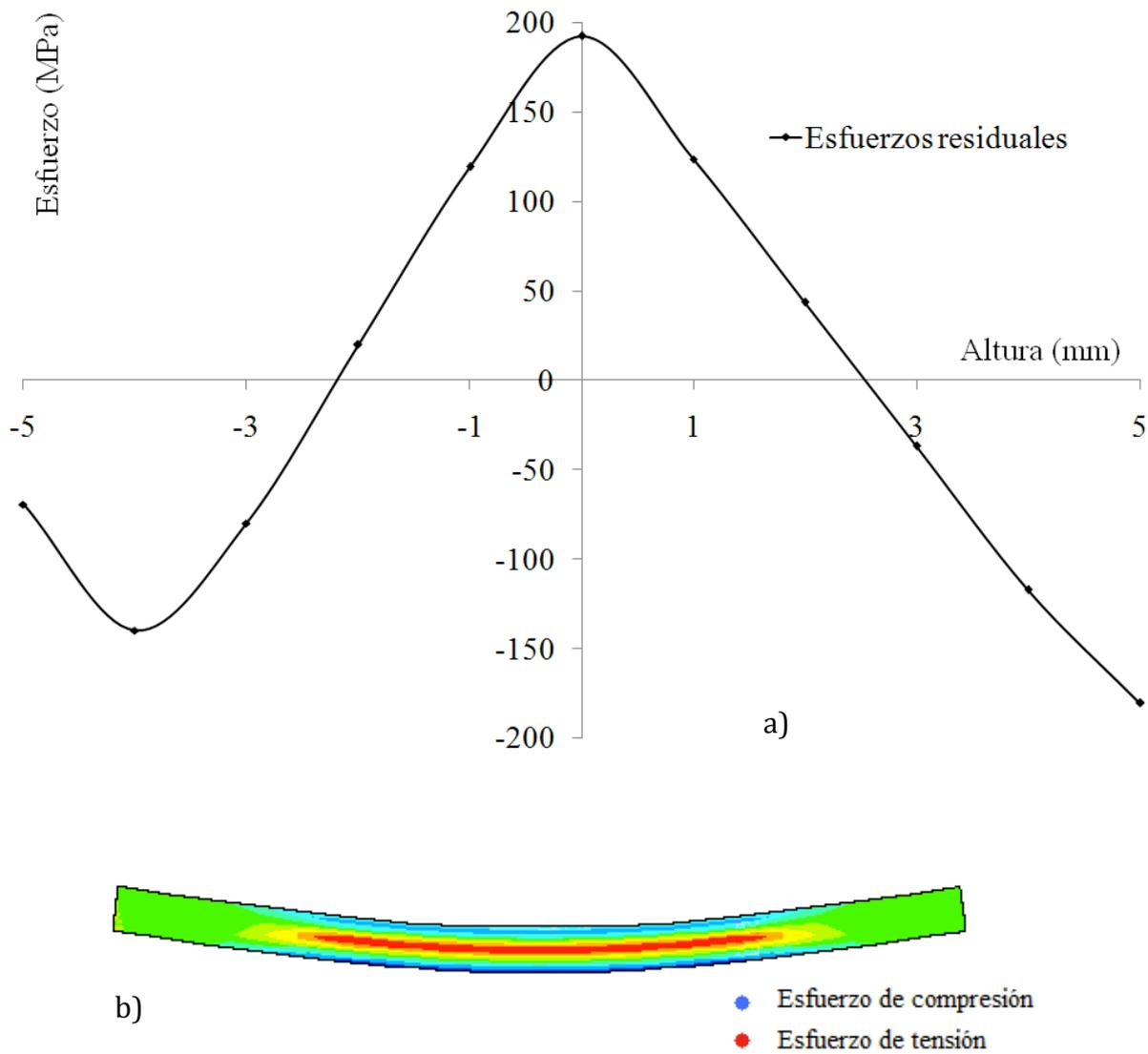


Figura III.18.- Descarga del tercer caso de estudio con pre-carga en compresión
 a) Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado severo en compresión.
 b) Correspondiente simulación de esfuerzos residuales por MEF.

Como se puede observar en las figuras donde se presentan los campos de esfuerzos residuales, con respecto al sentido de la simulación de la historia previa se tiene fortalecimiento en la misma dirección en el campo de los esfuerzos residuales. Si el material se pre-deforma en tensión, el campo de esfuerzos residuales que se encuentran en la superficie tenderá a ser en tensión. Por el contrario, si el material se pre-deforma en compresión, el material tenderá a

tener un benéfico campo de esfuerzos residuales de compresión en la superficie. Además, entre más severa sea la inducción de la historia previa a la que es sometido el material, más elevado serán los picos en esa dirección del campo de esfuerzos residuales.

III.4.- Cálculo de los esfuerzos residuales

Debido a que los esfuerzos residuales influyen en el comportamiento mecánico de los componentes mecánicos durante su vida útil, es importante conocer la magnitud de dichos esfuerzos, para esto, se tienen distintos métodos, los cuales se mencionan en el capítulo I.

En esta investigación se utilizó el Método de Respuesta de Grieta (CCM por sus siglas en inglés, Crack Compliance Method). Este método se fundamenta en la determinación del factor de intensidad de esfuerzos causados por la introducción de una grieta o corte de crecimiento progresivo en un componente mecánico. Esta grieta o corte, tiende a romper el equilibrio existente entre los esfuerzos residuales inducidos, provocando un relajamiento que resultará en un cambio estructural del componente [*Cheng y Finnie, 1986*].

Para el desarrollo de la solución analítica del CCM se reportan dos metodologías de solución: la solución de avance o directa y la solución inversa [*Prime, 1999*]. La solución de avance o directa calcula las deformaciones al introducir una grieta incremental en un componente con un campo de esfuerzos residuales conocido. La solución inversa calcula el campo de esfuerzos residuales original, correspondiente a las deformaciones medidas por la inducción de la grieta. En esta investigación se utilizó la solución inversa.

III.4.1.- Método inverso incremental para medir el campo de esfuerzos residuales

El factor de intensidad de esfuerzos (*FIE*) $K_{Irs}(a)$ debido al campo de esfuerzos residuales para la punta de la grieta inducida, puede obtenerse cortando progresivamente y registrando la medición de deformación, como se muestra en la Figura III.19, [*Schindler y Landolt, 1996*].

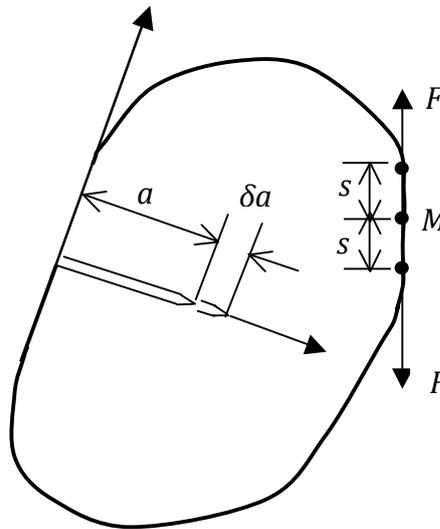


Figura III.19.- Cuerpo en 2D con un corte profundo para liberar esfuerzos residuales. El cambio de deformación se mide en el punto *M* [Schindler y Landolt, 1996]

El cambio de deformación en cualquier ubicación de la superficie del cuerpo debido al corte, contiene información sobre los esfuerzos liberados en el plano de corte. Estos se puede medir por medio de una galga extensométrica colocada en el punto de interés (que por lo regular deberá de ser en el plano por donde crece la grieta), que en este caso es *M*, como se muestra en la Figura III.19. En una consideración general del sistema elástico, una ranura estrecha producida por corte, es equivalente a una grieta. Así la ecuación básica de Mecánica de la Fractura lineal se puede utilizar para establecer la relación matemática requerida. Por simplicidad, para sistemas simétricos, el incremento de deformación $\delta\epsilon_M$ como se mide en *M* debido a un incremento en la prolongación del corte δa , puede ser expresado como:

$$\delta\epsilon_M = \frac{B}{E' F} K_{Irs} \left. \frac{\partial K_{IF}}{\partial s} \right|_{s=0} \delta a \quad \text{III.1}$$

Donde K_{Irs} denota el factor de intensidad de esfuerzos (*FIE*) debido al esfuerzo residual y K_{IF} el que debido a un par de fuerzas virtuales *F* que actúa tangencialmente en el punto *M* de

medición de deformación, las cuales se representan en el teorema de *Castigliano* [Gere, 2002] para calcular la deformación en el punto M .

$$\delta \varepsilon_M = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \delta U}{\partial F \partial s} \Big|_{\substack{F=0 \\ s=0}} \quad \text{III.2}$$

En la Ecuación III.1, B es el espesor del componente (el cual deberá ser esencialmente plano) y E' el módulo de Young generalizado, lo cual significa que $E' = E$ para condiciones de esfuerzo plano y $E' = E / (1 - \nu^2)$ para deformación plana. Sustituyendo la relación $\delta \varepsilon / \delta a$ por la derivada correspondiente $d\varepsilon / da$, se obtiene la relación deseada entre el cambio de deformación para M y el FIE para la grieta prolongada en forma incremental, o punta del corte, esto es:

$$K_{Irs}(a) = \frac{E'}{Z(a)} \frac{d\varepsilon_M}{da} \quad \text{III.3}$$

Donde,

$$Z(a) = \frac{B}{F} \left(\frac{\partial K_{IF}}{\partial s} \Big|_{s=0} \right) \quad \text{III.4}$$

$Z(a)$ en la Ecuación III.4 es una función dependiente de la geometría la cual refleja la sensibilidad de la deformación para M con respecto a los esfuerzos alcanzados en la punta de la grieta, $Z(a)$ llamada función de influencia o geométrica, puede ser determinada por métodos analíticos o numéricos.

Debe establecerse claramente, que la función de influencia $Z(a)$ es una función única que depende de la geometría de la parte, el plano de la grieta y la medición del punto M . Sin embargo, no depende de la distribución y magnitud de los esfuerzos residuales.

La función $Z(a)$ también provee información sobre la sensibilidad de la medición para el punto M con respecto a la relajación del esfuerzo para la punta de la grieta. Entre más alto sea

el valor de $Z(a)$, más sensible será su medición, $Z(a)$ y como es independiente de la distribución de esfuerzos, así que sólo se necesita determinarse una vez para una configuración dada.

III.4.2.- Método inverso, polinomial global para determinar el campo de esfuerzos residuales

El caso que se desea analizar es mostrado en la Figura III.20, se tiene el problema inverso en el cual el esfuerzo $\sigma_y(x)$ sobre la cara de la grieta se desconoce y se tiene que deducir de las mediciones de deformación ε para ciertos puntos, es decir $x = 0, y = s$, como una función de la profundidad de la grieta a [Cheng y Finnie, 1994]. La distribución de esfuerzos desconocida se puede representar por la serie:

$$\sigma_y(x) = \sum_{i=0}^n A_i P_i(x) \tag{III.5}$$

Los coeficientes A_i deben ser determinados y los coeficientes P_i son las serie de fuerza $x^0, x^1, x^2, \text{ etc.}$, son las funciones polinomiales de Legendre u otras funciones.

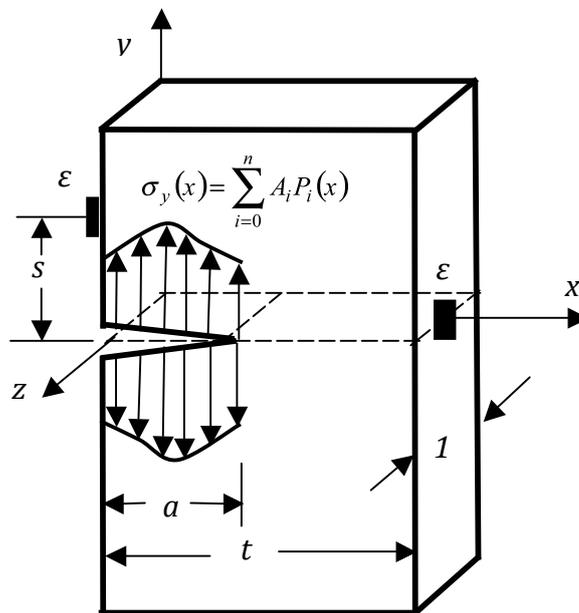


Figura III.20.- Medición de la deformación ε cerca del corte en la cara superior y sobre la cara posterior [Cheng y Finnie, 1994].

II.4.3.- Cálculo de las respuestas

Para ilustrar la determinación de las funciones de respuesta se considera la misma tira metálica de altura y ancho unitario (sobre el eje z , fuera del plano) con una grieta en el borde de longitud a como se muestra en la Figura III.21. Para obtener los desplazamientos horizontales para puntos a una distancia s de la grieta, se introduce un par de fuerzas F en la dirección horizontal a esos puntos, las fuerzas se pueden localizar para la superficie superior e inferior. Denotando el FIE debido a la superficie en tensión y la fuerza virtual por K_I y K_I^f respectivamente, el cambio de la energía de deformación debido a la presencia de la grieta esta dada por:

$$U = \frac{I}{E'} \int_0^a (K_I + K_I^f)^2 da \tag{III.6}$$

En la cual $E' = E$ para esfuerzo plano y $E' = E/(1- \nu^2)$ para deformación plana donde E es el módulo de *Young* y ν es la relación de *Poisson*.

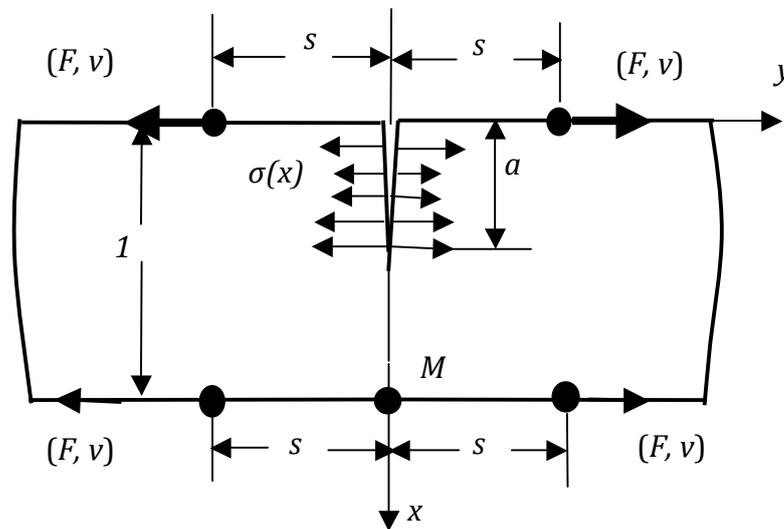


Figura III.21.- Tira metálica sometida a una grieta en el borde para la superficie de carga y fuerzas virtuales [Cheng, Finnie y Prime, 1997].

Del teorema de *Castigliano* el desplazamiento $u(a, s)$ se puede obtener tomando la derivada con respecto a la fuerza virtual F y entonces igualando a cero, esto es:

$$u(a,s) = \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial F} \Big|_{F=0} = \frac{1}{E'} \int_0^a K_I(a) \frac{\partial K_I^f(a,s)}{\partial F} da \quad \text{III.7}$$

Tomando otra derivada con respecto a la distancia s , la deformación en la dirección y se obtiene:

$$\varepsilon(a_j,s) = \frac{1}{E'} \int_0^a K_I(a) \frac{\partial^2 K_I^f(a,s)}{\partial F \partial s} da \quad \text{III.8}$$

Esta deformación $\varepsilon(a,s)$ debido al esfuerzo $Pi(x)$ se conoce como la función de compliansa o función de respuesta $Ci(a,s)$, por lo que se tiene:

$$Ci(a_j,s) = \frac{1}{E'} \int_0^{a_j} K_I(a) \frac{\partial^2 K_I^f(a,s)}{\partial F \partial s} da \quad \text{III.9}$$

Debido a la linealidad de K_{IF} con F , el segundo término bajo la integral en la Ecuación III.9 es la misma que la Ecuación III.4, la cual se estudiará más adelante, con $B = I$, por lo tanto, se puede escribir:

$$C_i(a_j,s) = \frac{1}{E'} \int_0^{a_j} K_I(a) Z(a) da \quad \text{III.10}$$

De acuerdo a [Schindler y Bertschinger, 1997, Kang, Song, y Earmme, 1989], para el caso de una viga, en la cual se mide la deformación en el punto M , $K_I(a)$ y $Z(a)$ se pueden expresar como:

$$K_I(a) = \int_0^a h(x,a) \sigma_y(x) dx \quad \text{III.11}$$

$$Z(a) = 4.283 \int_0^a h(x,a) (l - 2x) dx \quad \text{III.12}$$

Donde $\sigma_y(x) = P_i(x)$ y $h(x, a)$ se conoce como la función de peso. Esta referencia contiene valores tabulados de $h(x, a)$ para valores dados de a y x . Por lo tanto se puede determinar $C_i(a_j, s)$ de la Ecuación III.12 por integración numérica. Una vez que se tienen las soluciones para $C_i(a_j, s)$, se pueden obtener las deformaciones esperadas debido a las componentes de esfuerzos en la Ecuación III.1 como [Cheng y Finnie, 1994]:

$$\varepsilon(a_j, s) = \sum_{i=0}^n A_i C_i(a_j, s) \quad \text{III.13}$$

En primer lugar se pueden determinar los valores para A_i , obteniendo las respuestas $C_i(a_j, s)$ de la galga extensométrica localizada en un punto s cuando la distribución de esfuerzos $P_i(x)$ se aplica a la longitud a_j de la grieta. Estas cantidades $C_i(a_j, s)$ se refieren a las *respuestas* y se pueden obtener de los procedimientos basados sobre mecánica de la fractura lineal elástica. Una vez que las soluciones para $C_i(a_j, s)$ se han obtenido, se tiene la Ecuación III.14.

$$\varepsilon(a_j, s) = \sum_{i=0}^n A_i C_i(a_j, s) \quad \text{III.14}$$

En la cual las incógnitas A_i tienen que ser determinadas. Para minimizar el error promedio sobre todos los puntos para la aproximación del número de orden n^n , se puede usar el método de los mínimos cuadrados para obtener los valores A_i . Por lo tanto el número de incrementos de corte m se elige a menudo por ser mayor que el orden de las polinomios P_i , por ejemplo $m > n$. Generalmente se usa $m = n + 1$. En este trabajo se usa $n = 8$ y $m = 9$, la solución por mínimos cuadrados se obtiene minimizando el cuadrado del error relativo a la constante desconocida A_i , por ejemplo como en la Ecuación III.15 [Cheng y Finnie, 1994]:

$$\frac{\partial}{\partial A_i} \sum_{j=1}^m \left[\varepsilon(a_j, s)_{\text{actual}} - \sum_{h=0}^n A_h C_h(a_j, s) \right]^2 = 0 \quad i = 0, \dots, n \quad \text{III.15}$$

Lo anteriormente desarrollado conduce a:

$$[H] \{A\} = \{J\} \quad \text{III.16}$$

Donde $[H] = [C]^T [C]$ y $\{J\} = [C]^T \{\varepsilon\}_{actual}$ [Press, et. al., 1987]. La Ecuación III.14 lleva a un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas. Para problemas considerados en esta tesis, $[H]$ es una matriz de 8 x 8. El procedimiento numérico se resolvió aplicando el programa FORTRAN, se usó el paquete Compac Visual FORTRAN y la Ecuación III.8 se resolvió usando el LU Decompositor (LUDCMP) and Backsubstitution (LUBKSB) rutinas. La distribución de esfuerzos residuales real, se determinó usando la Ecuación III.5.

Existen varios elementos que deben ser cuidados en el momento de realizar el corte de una pieza de manera experimental. Se debe tener cuidado en la selección de la herramienta utilizada para realizar el corte, ya que esta puede introducir esfuerzos adicionales a la pieza lo cual alteraría el campo original de esfuerzos. Cheng y Finnie [1994] realizaron una serie de estudios para saber cual de las herramientas de corte es la más adecuada en esta situación. Llegaron a la conclusión de que el corte por arranque de viruta realizado por descarga eléctrica (electro-erosión) es la más adecuada.

III.5.- Evaluación numérica del CCM

Con el propósito de validar la aplicación del CCM en la determinación de la inducción de esfuerzos residuales, en esta sección se validó por medio del MEF. Para obtener el campo de esfuerzos residuales mediante la aplicación del Método de Respuesta de Grieta, se simula la inducción de la grieta mediante la aplicación del comando de vida y muerte de elementos. Una vez que se elaboró la etapa de descarga en la simulación numérica y que el campo de esfuerzos residuales quedó en el material, se simulan la introducción de una muesca (corte) por medio del comando *Birth and Kill*. La simulación de la muesca tiene una geometría que cubre un espacio de 1 mm por 1 mm en la superficie superior de la viga. La inducción de la muesca se realiza de 1 mm de longitud hasta 1 mm antes de llegar a seccionar la viga por completo. Lo anterior equivale a 9 cortes y es 9 mm totales. Al simular el corte de los elementos y terminar cada uno de ellos, se mide la relajación de la deformación elástica (Figura III.22). La ecuación de la curva de relajación de la deformación se aplica en el CCM para obtener el campo de esfuerzos residuales original en el componente.

Con los datos de las deformaciones unitarias producidas por la relajación, se grafica la curva correspondiente. El comportamiento de la curva varía en función de la profundidad de la

grieta y del campo de los esfuerzos residuales existentes en la profundidad que se está realizando el corte.

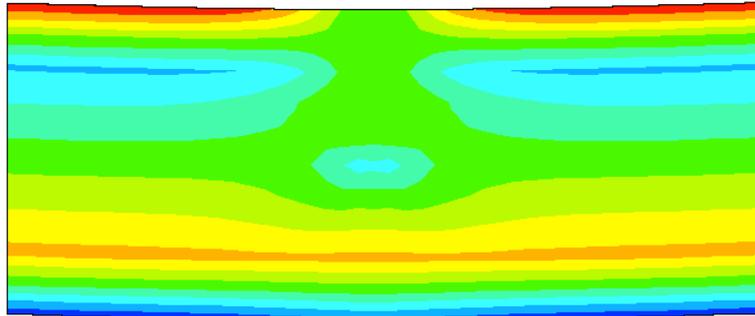


Figura III.22.- Relajación de los esfuerzos mediante *CCM*.

III.5.1.- Primer caso para la evaluación numérica del *CCM*

En el primer caso de estudio se simuló la inducción del campo de esfuerzos residuales cuando el material se encuentra sin historia previa. Una vez inducido el campo de esfuerzos residuales se simula el corte en la viga y se obtiene la curva que representa la relajación de los esfuerzos residuales debido al corte (Figura III.23).

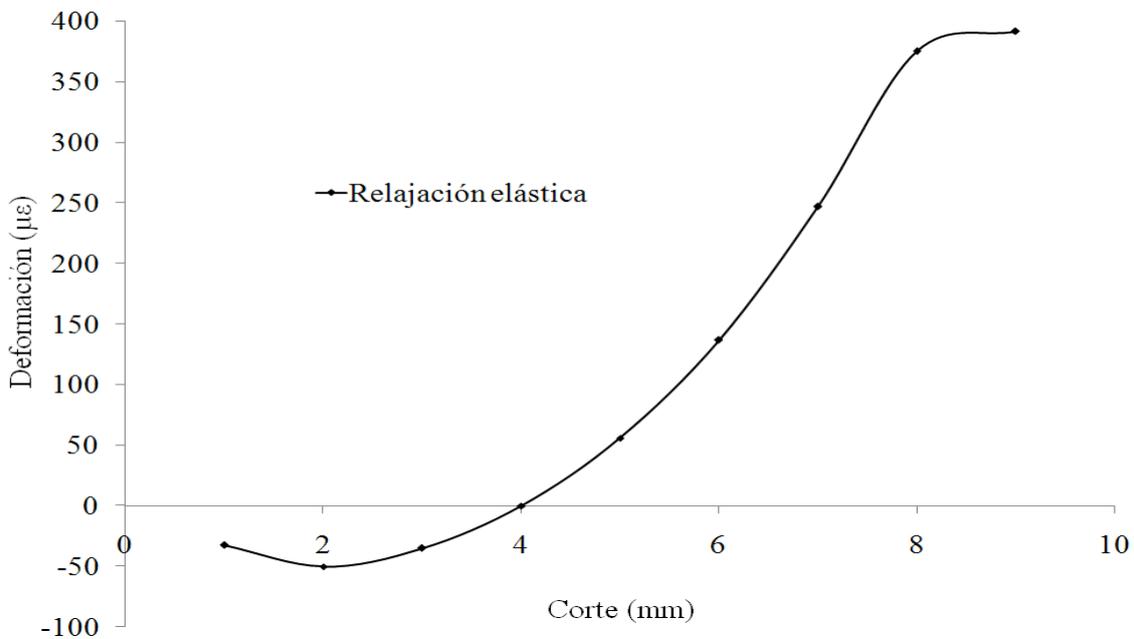


Figura III.23.- Curva obtenida del relajamiento de la deformación, sin historia previa.

En la Figura III.24 se grafica y compara el campo de esfuerzos residuales obtenidos por la relajación de la deformación elástica mediante el Método de Respuesta de Grieta y el campo de esfuerzos residuales aplicando el Método de Elementos Finitos.

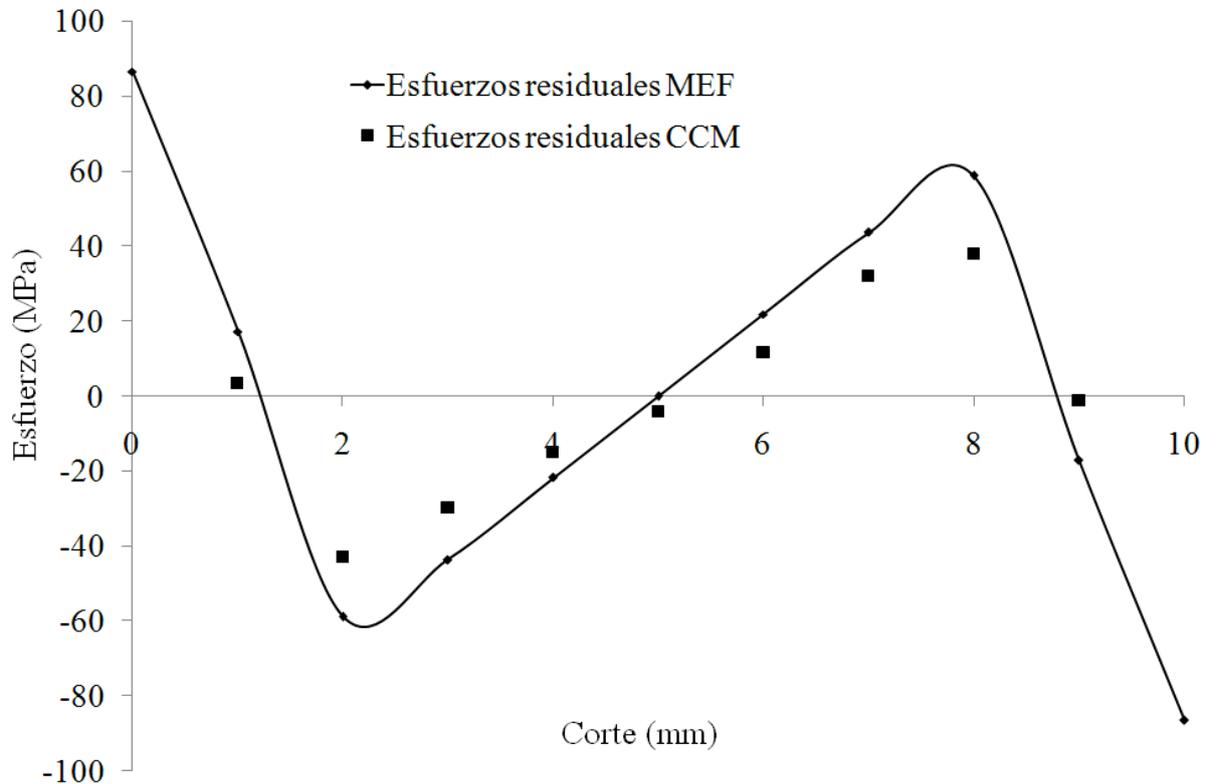


Figura III.24.- Comparación del campo de esfuerzos residuales, sin historia previa.

III.5.2.- Segundo caso para la evaluación numérica del *CCM* en un viga con pre-deformado ligero ($3\epsilon_Y$)

Para el segundo caso de análisis, se obtiene el campo de esfuerzos residuales aplicando el Método de Respuesta de Grieta, cuando el material se encuentra sometido a un pre-deformado homogéneo ligero en tensión o en compresión. En la Figura III.25 se muestra las curvas obtenidas por la relajación de la deformación y sus ecuaciones polinomiales correspondientes.

En las Figuras III.26 y III.27 se grafica y compara el campo de esfuerzos residuales obtenidos por *CCM* y por *MEF* cuando la viga es sometida a pre-deformado ligero en tensión y cuando la viga es sometida a pre-deformado ligero en compresión.

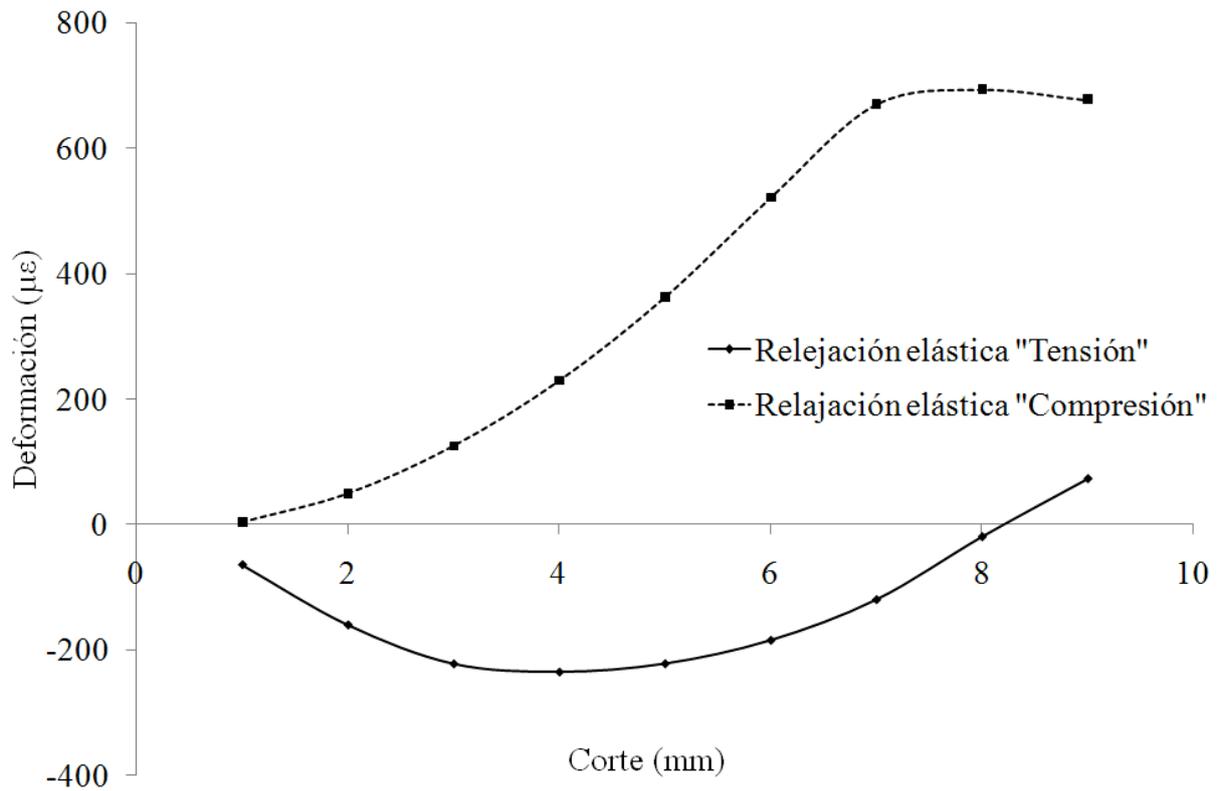


Figura III.25.- Curvas obtenidas del relajamiento de la deformación, pre-deformado ligero.

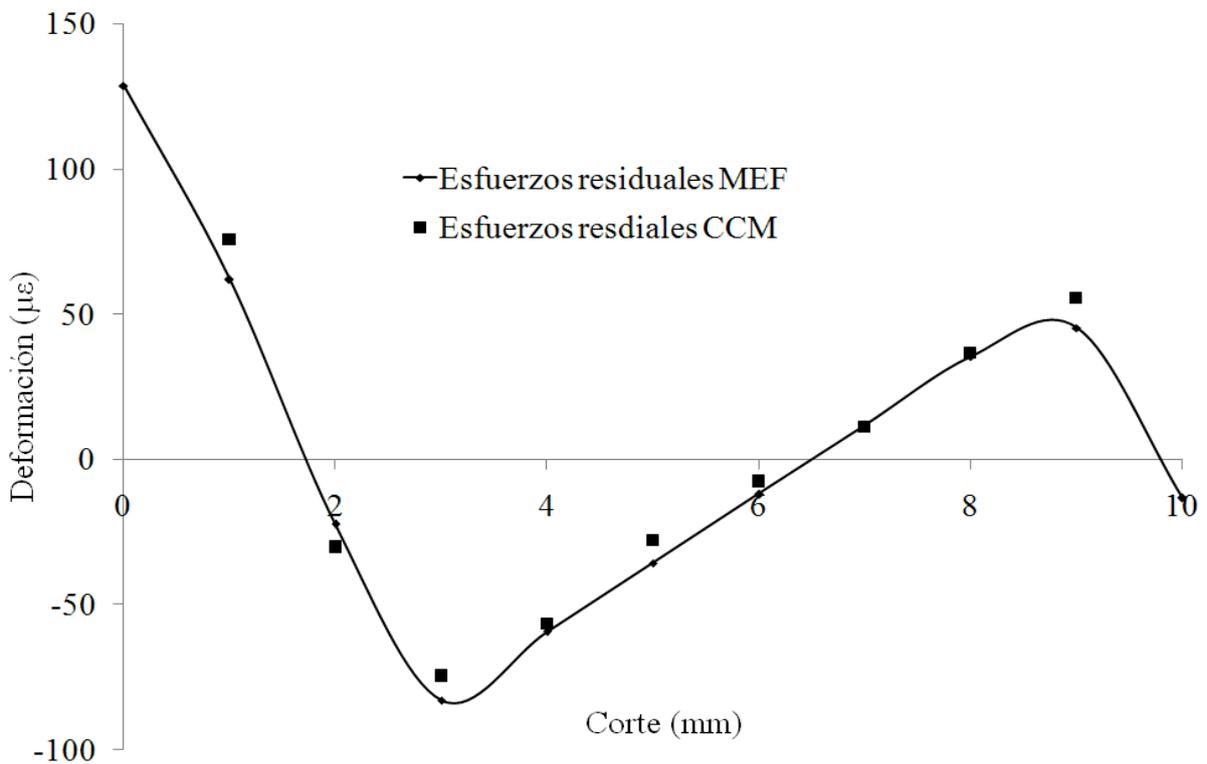


Figura III.26.- Comparación del campo de esfuerzos residuales, pre-deformado ligero en tensión.

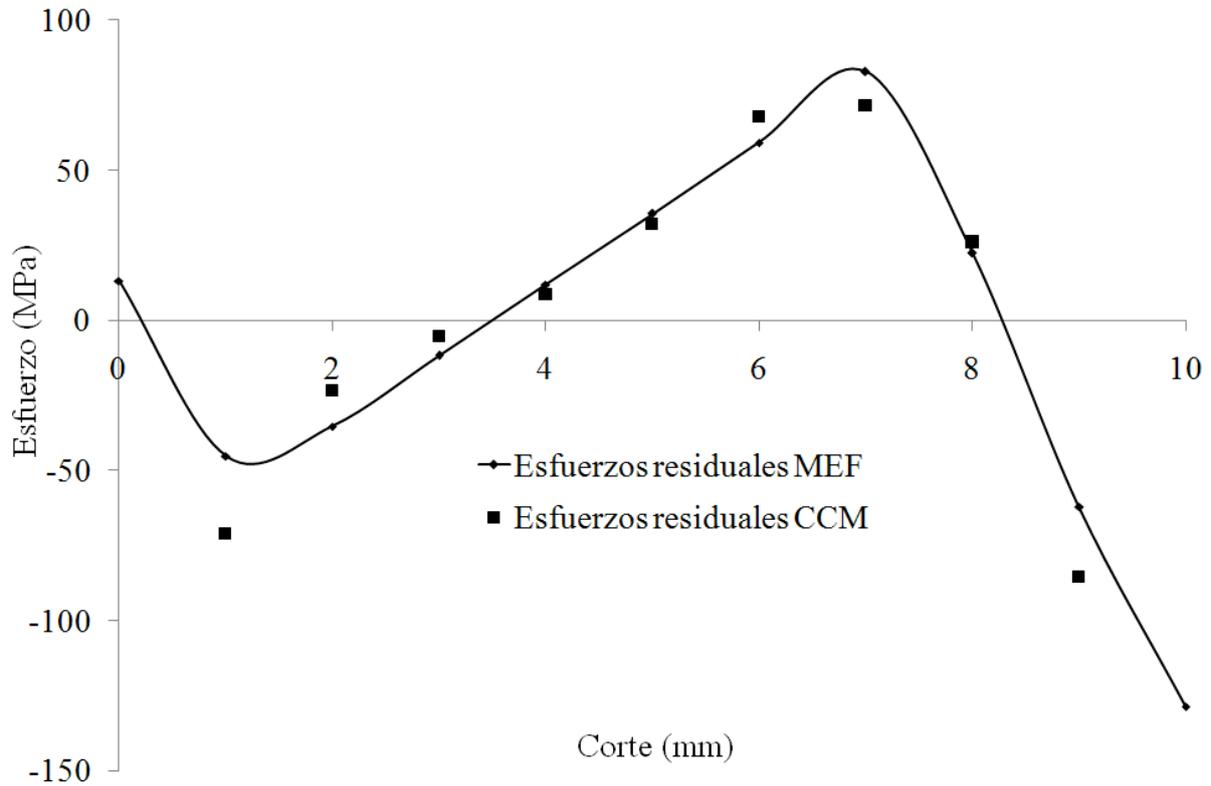


Figura III.27.- Comparación del campo de esfuerzos residuales, pre-deformado ligero en compresión.

III.5.3.- Tercer caso para la evaluación numérica del CCM en viga con pre-deformado severo ($7\varepsilon_y$)

Al igual que en los casos anteriores se evalúa el campo de esfuerzos residuales mediante la aplicación del Método de Respuesta de Grieta, en este caso se le aplicó un pre-deformado severo. En la Figura III.28 se muestra las curvas obtenidas por la relajación de la deformación y sus ecuaciones polinomiales correspondientes.

En las Figuras III.29 y III.30 se grafica y compra el campo de esfuerzos residuales obtenidos por CCM y por MEF cuando la viga es sometida a un pre-deformado ligero en tensión y cuando la viga es sometida a un pre-deformado en compresión.

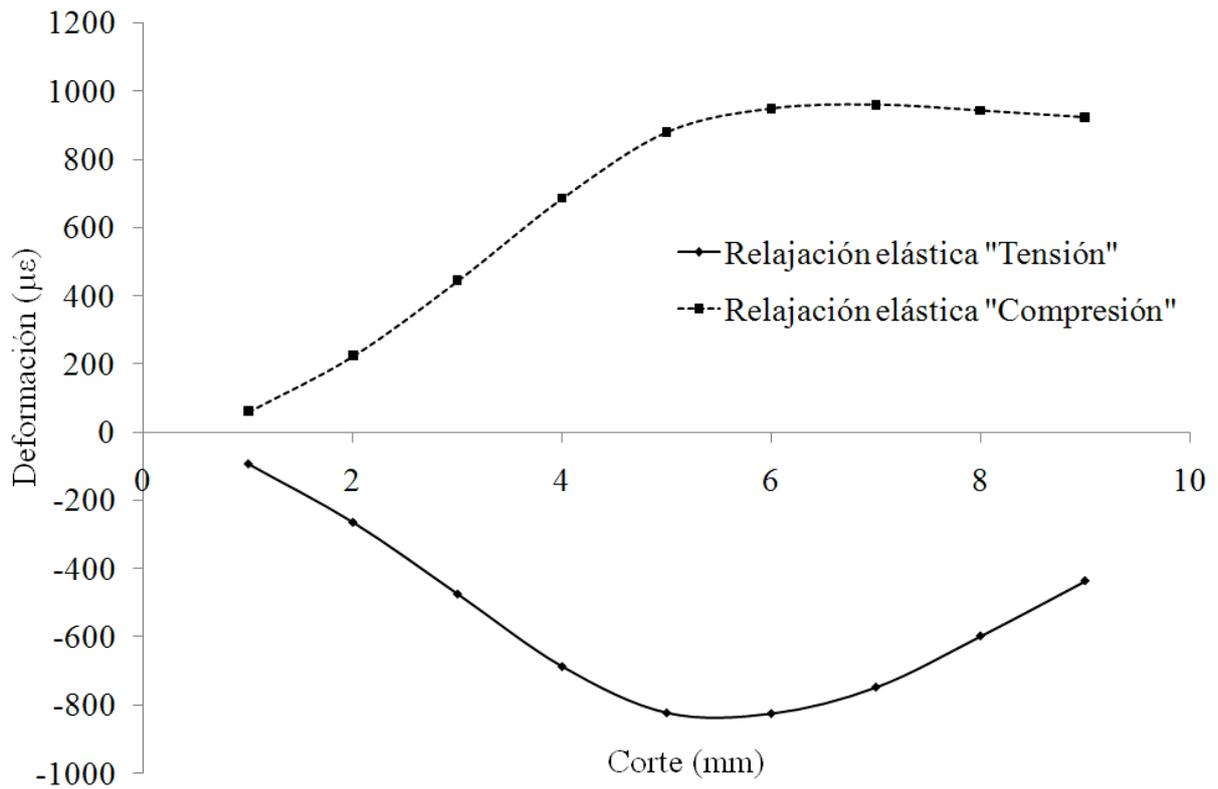


Figura III.28.- Curvas obtenidas del relajamiento de la deformación, pre-deformado severo.

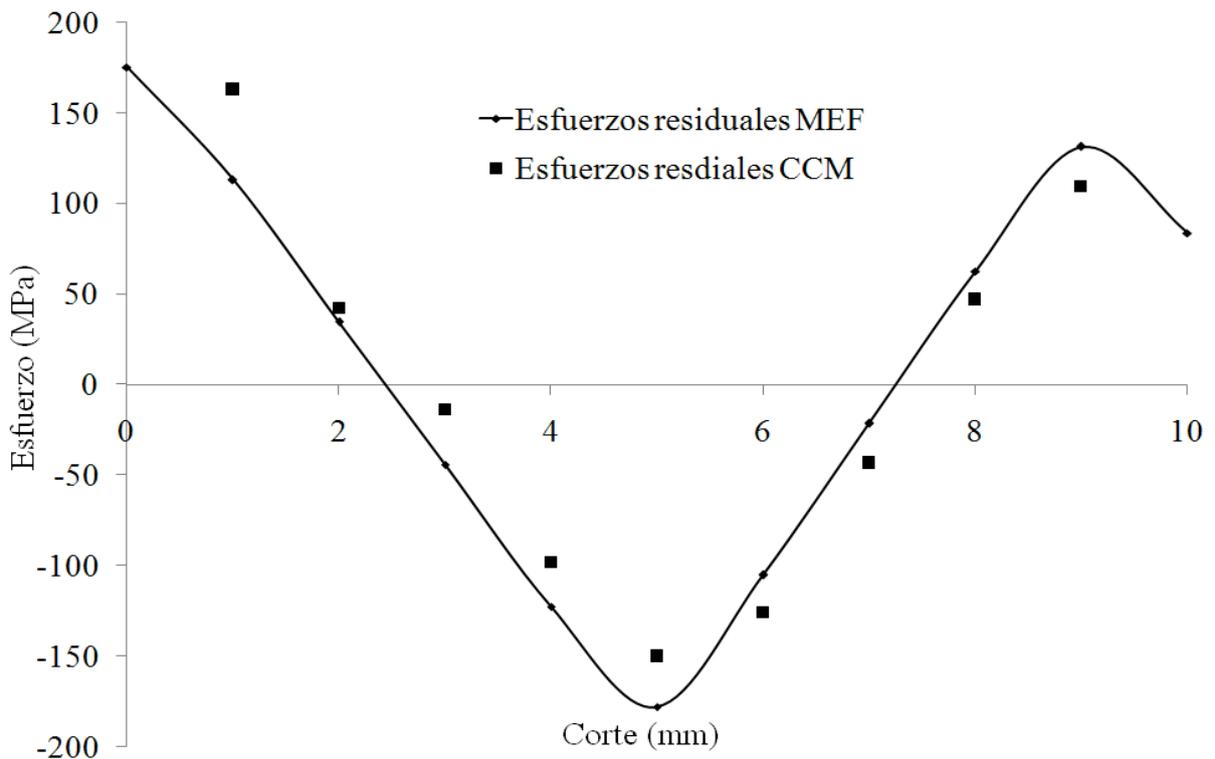


Figura III.29.- Comparación del campo de esfuerzos residuales, pre-deformado severo en tensión.

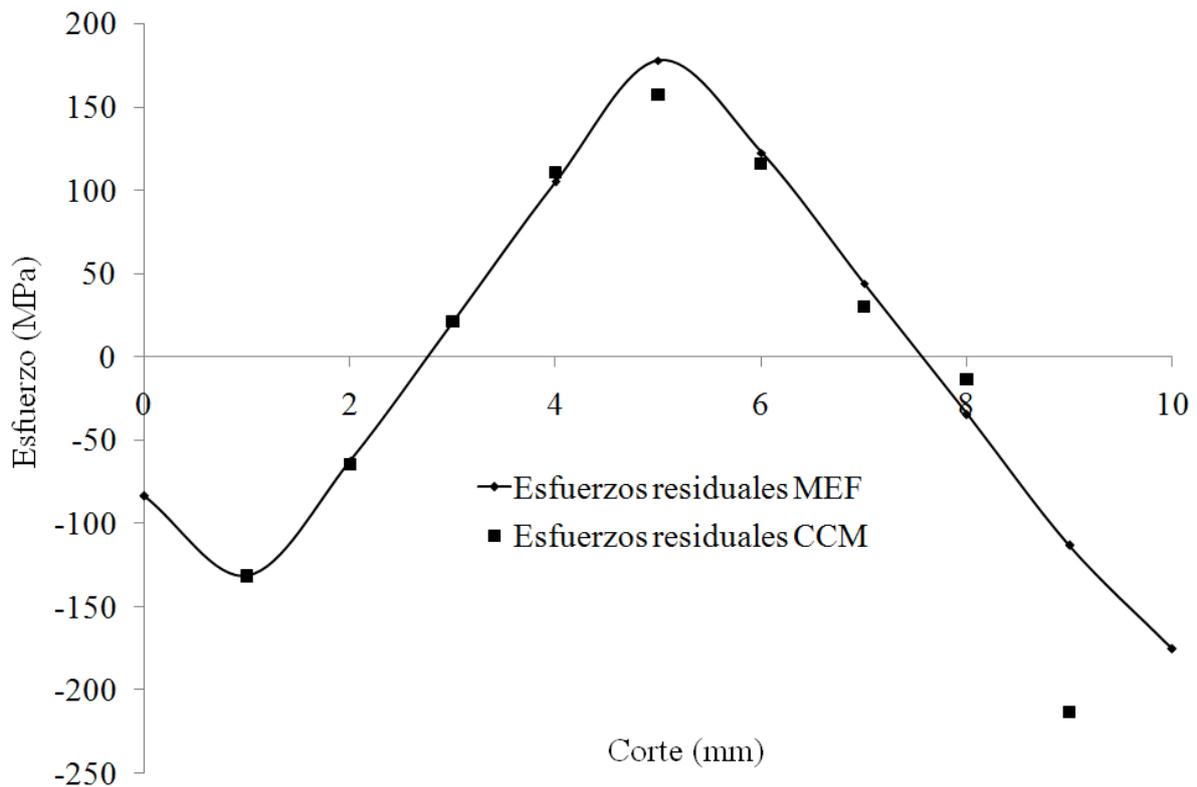


Figura III.30.- Comparación del campo de esfuerzos residuales, pre-deformado severo en compresión.

Como se puede observar por los resultados, se puede validar al Método de Respuesta de Grieta (*CCM*) como un buen método capaz de medir los esfuerzos residuales a los que está sometido el material.

III.6.- Sumario.

En este capítulo se desarrolló y explica todo lo relacionado con la simulación numérica mediante la configuración de cuatro puntos de flexión como mecanismo de ensayo de materiales y el Método de Respuesta de Grieta para evaluar el campo de esfuerzos residuales, así como también, la importancia que tiene el endurecimiento por deformación y el efecto que tiene la magnitud y la dirección del pre-deformado uniaxial sobre el campo de los esfuerzos residuales.

Se estableció el tipo de análisis, datos del material, las cargas a aplicar, el mallado, el tipo de material (especificando su comportamiento), las restricciones y el procedimiento a realizar para que posteriormente pasar a la solución.

En el Capítulo IV se describe y desarrolla la metodología a seguir para realizar el análisis experimental. Se describe la manufactura de las probetas, el tratamiento térmico de recocido que se aplica a todas las probetas para eliminar la historia previa generada por los procesos de manufactura, la instrumentación y realización de ensayos experimentales como; ensayos de tensión, compresión y flexión.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

IV.1.- Introducción

Para llevar a cabo una selección de materiales de forma correcta, el Ingeniero debe conocer los atributos de los materiales que son importantes para el diseño de la estructura o el componente. Tales como; propiedades físicas, químicas y mecánicas [Mangonnon, 2001]. Para el caso de esta investigación, se toma en cuenta exclusivamente las propiedades mecánicas del material. Por lo general, la única manera de establecer el comportamiento mecánico de los materiales cuando están sometidos a cargas, es llevar a cabo ensayos experimentales. Entre ellos, los más empleados son los de tensión y compresión. Por otro lado, en el desarrollo experimental de esta tesis se empleo una configuración de cuatro puntos de flexión para la caracterización mecánica del material, ya que se puede obtener el comportamiento tanto en tensión como en compresión de forma simultánea en una sola prueba [Urriolagoitia, 2004].

En esta investigación se realizó la caracterización mecánica de un acero Inoxidable *AISI 316L* que es utilizado en la manufactura de prótesis biomecánicas, según normas [*ASTM F139-03* y *ASTM A276-92*] en las que se especifican las características químicas, metalúrgicas y mecánicas que deben cumplir las barras, placas y alambres de acero Inoxidable.

La caracterización se lleva a cabo mediante la aplicación de la combinación de cargas homogéneas y no homogéneas, para lo cual se utiliza la teoría de la flexión pura y el método de respuesta de grieta (*CCM*) que es un método destructivo empleado para la evaluación del campo de esfuerzos residuales, el material se analiza en diferentes estados de pre-deformado.

VI.2.- Manufactura de probetas

El material seleccionado para esta investigación fue un acero Inoxidable *AISI 316L* que es empleado en la manufactura de prótesis biomecánicas. Como lo es, en copa acetabular de un implante total de cadera [Dowling, Atkinson, Dowson y Charnley, 1978].

Para la fabricación de las probetas se adquirió una placa cuadrada de 1m x 1m con un espesor de 6.35mm (1/4in), la cual se sometió a diversos procesos de manufactura para adquirir la forma geométrica y las dimensiones propuestas para realizar los ensayos a flexión (Tabla IV.1 y Figura IV.1).

Tabla IV.1.- Dimensiones de la probeta para el ensayo a flexión

Dimensiones de la probeta	Unidades S.I.
Largo	200 mm
Alto	10 mm
Ancho	6.35 mm

**Figura IV.1.-** Probeta utilizada en la investigación

Debido a las dimensiones de la placa, primero se realizó un corte con plasma a una distancia de 20.5 cm por la longitud total de la placa que es 1 m. Posteriormente se realizaron cortes utilizando un arco con segueta de 10.5 mm por el ancho de la placa que ahora es de 20.5 mm. En esta ocasión no se realizó el corte con plasma, ya que las altas temperaturas que se utilizan producen una distorsión en la geometría de la probeta.

Tomando en cuenta que el corte con segueta es un proceso de manufactura que depende mucho de la habilidad de quien lo realiza y que deja un acabado superficial muy irregular, las superficies de la probeta fueron maquinadas en una fresadora Universal marca ODIMSA FUX-120. Dándole así, la geometría rectangular y una aproximación a las dimensiones propuestas para llevar a cabo este análisis. Para tener una mayor exactitud en las medidas de las probetas, se utilizó una rectificadora plana marca GER 1200x40.

En total se fabricaron 26 probetas para poder llevar a cabo el análisis experimental de la tesis. En la Figura IV.2 se muestra los procesos de manufactura realizados para la obtención de las probetas.



Figura IV.2.- Procesos de manufactura de las probetas

IV.3.- Tratamiento térmico

Como se mencionó en el Capítulo I, los procesos de manufactura a los que se someten los materiales para llegar a fabricar elementos mecánicos como vigas, engranes, etc., producen esfuerzos residuales. Por lo que fue necesario someter a la probeta a un tratamiento térmico de recocido para el relevado de esfuerzos y eliminar la historia previa que presenta el material. Esto se hace con el fin de que el material presente un estado ideal, es decir, libre de esfuerzos internos, y mediante el ensayo de cuatro puntos de flexión es posible determinar las propiedades mecánicas reales del material. Además, partiendo de este estado, mediante deformaciones axiales controladas se pueden manipular las propiedades mecánicas y el campo de esfuerzos residuales en el material.

Con frecuencia, durante el calentamiento de los aceros a altas temperaturas se modifica la capa superficial de la pieza debido a la acción del Oxígeno presente en el aire. Esto hace que se presente una oxidación en el material y por consiguiente una descarburación superficial.

Este fenómeno es de poca importancia en los aceros de bajo Carbón, en el caso de esta investigación el acero inoxidable *AISI 316L* contiene un bajo porcentaje de Carbón (Como se puede observar en la Tabla IV.2). Aún así, las probetas fueron envueltas en una lamina de acero de Carbón medio, con espesor de 0.05mm para evitar la oxidación de las probetas cuando se lleve acabo el proceso de recocido (Figura IV.3), ya que, se pretende conservar íntegra la estructura original del material.

Tabla IV.2.- Composición química del material [*ASTM F139-03* y *ASTM A276-92*]

Elemento	%, Composición
Carbono	0.030 máximo
Magnesio	2.00 máximo
Fósforo	0.025 máximo
Sulfuro	0.010 máximo
Silicon	0.75 máximo
Cromo	17.00 a 19.00
Níquel	13.00 a 15.00
Molibdeno	2.25 a 3.00
Nitrógeno	0.10 máximo
Cobre	0.50 máximo
Hierro	El resto



Figura IV.3.- Paquetes de probetas que se sometieron al tratamiento térmico de recocido

El proceso de recocido que se realizó, consistió en someter al material a una temperatura constante de 600 °C durante media hora, el enfriamiento de la probeta fue lento dentro del horno [Chandlers, 1995]. Este proceso se llevó a cabo en un horno de vacío BBC de atmosfera controlada como se puede observar en la Figura IV.4.



Figura IV.4.- Horno empleado para el tratamiento térmico

IV.4.- Instrumentación de las probetas

Una vez realizado el tratamiento térmico de recocido, el siguiente paso fue instrumentar las probetas para medir las deformaciones del material, las cuales son una respuesta a la acción de aplicarle un agente externo. Para esto se instrumentaron las probetas con galgas extensométricas *EA-13-060LZ-120/E* (VISHAY Micro-Measurements) colocadas en la parte superior e inferior de la viga para medir tanto el comportamiento en tensión como el de compresión [Urriolagoitia-sosa, 2006] [López-Castro et al, 2005], como se muestra en la Figura IV.5.

Como primer paso en la aplicación de las galgas, se debe preparar y limpiar el área de la probeta destinada para realizar dicha acción. En este caso son; la parte superior e inferior del centro en el espécimen. Se limpió la probeta con líquido desengrasante y se pulió con una lija fina dicha zona para eliminar cualquier irregularidad superficial del material que pudiera obstaculizar la correcta medición de la deformación. Una vez preparada el área de la probeta

en la cual se va a pegar la galga extensométrica, se limpian las herramientas que serán utilizadas para el pegado de la galga y la mesa de trabajo. La limpieza se lleva a cabo utilizando alcohol etílico puro 96^o. En la Figura IV.6 se pueden observar las herramientas utilizadas para la aplicación de la galga.



Figura IV.5.- Colocación de las galgas extensométricas



Figura IV.6.- Herramientas para el pegado de la galga extensométrica

Una vez lista y limpia el área de trabajo y las herramientas, se procede a limpiar con ácido curtace limpiador a base de agua el área pulida (que es donde será pegada la galga), inmediatamente después se aplica un neutralizador alcalino para limpiar superficies del ácido. Es necesario tomar en cuenta que la acción del neutralizador es de una hora, por lo que se

debe pegar la galga antes de ese tiempo. Con la ayuda de una pluma sin tinta se realizan las marcas en la probeta sobre las cuales va a ir pegada la galga, teniendo cuidado de no aplicar demasiada fuerza. La galga *EA-13-060LZ-120/E* junto con la terminal son colocados en un vidrio para ser alineados y separados a cierta distancia entre si, utilizando un tramo de cinta adhesiva se adhieren las dos partes y se colocan sobre las marcas de la probeta, esto se puede observar en la Figura IV.7.

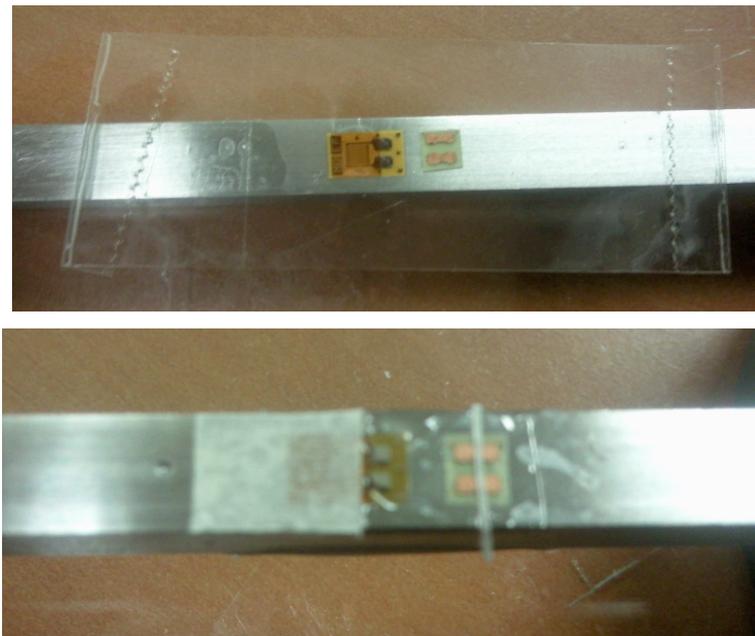


Figura IV.7.- Posición de la galga

Una vez colocada la galga en la posición deseada, se desprende una porción de la cinta dejando descubierta la galga y la terminal. Posteriormente se aplica el catalizador para el uso de adhesivos *M-Bond 200*, un minuto después se aplica el adhesivo *M-Bond 200* y se coloca nuevamente la cinta con la galga, así como, la terminal en el lugar deseado. Se utiliza el pulgar para hacer presión durante tres minutos y para que la galga y la terminal, queden pegados en la probeta. Una vez pegada la galga, se protege con una cinta para no dañarla al momento de soldar los cables (Figura IV.7). Posteriormente, se sueldan los cables calibre 24 (Figura IV.8), los cuales transmitirán el cambio del valor de la resistencia al puente de Wheatstone, el cual los convierte en micro-deformaciones.

Ya que estén colocados los cables, se verifica la conexión mediante un probador para corroborar que no existe algún corto y se coloca la laca de poliuretano *M-Coat A*, que es la que va a proteger a la galga, antes de aplicar la laca se retira la cinta de la galga y se limpia la superficie de la misma con un solvente *M-Line* que es el que va a remover todo rastro de pegamento sobre la galga y la superficie al rededor de la misma.

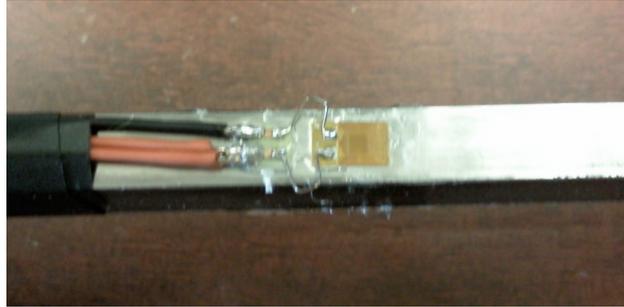


Figura IV.8.- Soldadura de cables a la galga

IV.5.- Dispositivos para realizar los ensayos experimentales

IV.5.1.- Banco de ensayos de cuatro puntos de flexión

Para realizar el análisis experimental de la investigación, se utilizó un banco de ensayos con una configuración de cuatro puntos de flexión. Esto con el fin de poder caracterizar el comportamiento del material mediante la aplicación de una carga ejercida por una máquina de ensayos de materiales. El banco de ensayos cuenta con dos soportes (superior e inferior), en cada uno de los cuales se montan dos apoyos que son ajustables mediante guías paralelas en dirección longitudinal, en cada uno de los apoyos se monta un rodillo, que es en el cual va montada la probeta de sección rectangular, esto con el fin de que en el momento de que se efectúe la carga, la probeta pueda rotar libremente y no exista alguna variación en la lectura de las deformaciones. El banco de ensayos de cuatro puntos de flexión se puede observar en la Figura IV.9.

El material empleado para la construcción de banco de ensayos fue acero para máquinas *AISI 4140* tratado y puede soportar una carga de máxima de diseño de 125 kN.

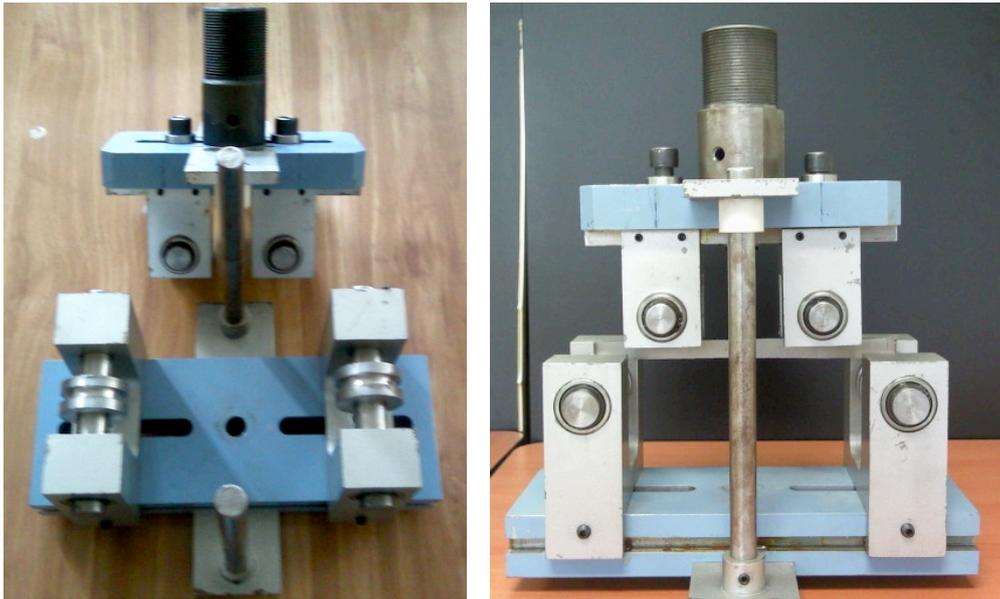


Figura IV.9.- Banco de ensayos de cuatro puntos de flexión

IV.5.2.- Dispositivos para ensayos de compresión

Una vez caracterizado el material mediante el ensayo de cuatro puntos de flexión, se manipularon las propiedades mecánicas del material mediante la aplicación de deformaciones axiales controladas, para tener una clara manipulación de las propiedades del material y el campo de esfuerzos residuales, las deformaciones axiales se realizaron en tensión en unas probetas y en compresión en otras. Debido a que las probetas utilizadas en este análisis no están normalizadas, la realización de una deformación en sentido de compresión presenta un inconveniente, ya que según la norma para ensayos axiales en materiales [ASTM E 8-00b] presenta una probeta cilíndrica cuya longitud es 1.5 veces el diámetro de dicha probeta, esto es con el fin de que la compresión sea homogénea en toda la probeta y evitar el pandeo de la misma.

Para realizar la deformación axial en compresión de la probeta, se diseñó un dispositivo que funcione para posicionar en completa verticalidad a la probeta y a la vez, proporcione rigidez lateral y así evitar el pandeo de la probeta al momento de ejercer la carga sobre ella. El dispositivo consta de dos placas ranuradas que envuelve a la probeta, la ranura cuenta con dimensiones ligeramente mayores que las de la probeta para lograr un libre movimiento vertical de ella, además cuenta con una base para darle soporte al dispositivo. El dispositivo para compresión se puede observar en la Figura IV.10.



Figura IV.10.- Dispositivo de compresión de probetas

IV.5.3.- Equipo de electroerosión para aplicar el *CCM*

Como se ha mencionando, los procesos de manufactura generan esfuerzos residuales en el material. Por lo que la máquina utilizada para generar una grieta en la probeta no debe agregar mas esfuerzo en el espécimen. Teniendo en cuenta esta consideración se utilizó el proceso de electroerosión, el cual se basa en la erosión de los metales mediante la chispa de una descarga eléctrica.

El proceso de electroerosión, consiste en una herramienta de formado (electrodo conectado a una fuente de poder) y la pieza, ambas colocadas en un fluido dieléctrico. Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza es suficientemente alta, se descarga una chispa transitoria que atraviesa el fluido y quita una cantidad muy pequeña de metal de la superficie de la pieza (Figura IV.11).

En la realización de la presente investigación se utilizó una máquina electroerosionadora marca ONA ELECTROERISIÓN, modelo ONA/BN-180 y como electrodo una placa de cobre de 50 mm x 50 mm con un espesor de 0.56 mm, debido a que el electrodo corta un exceso de 0.2 mm por lado en la probeta, con lo que se obtiene una grieta de 0.96 mm de

ancho. De igual forma hay que mencionar que el electrodo sufre un desgaste 0.02 mm al realizar el corte de 1 mm, por lo que es necesario compensar dicho desgaste en cada corte.

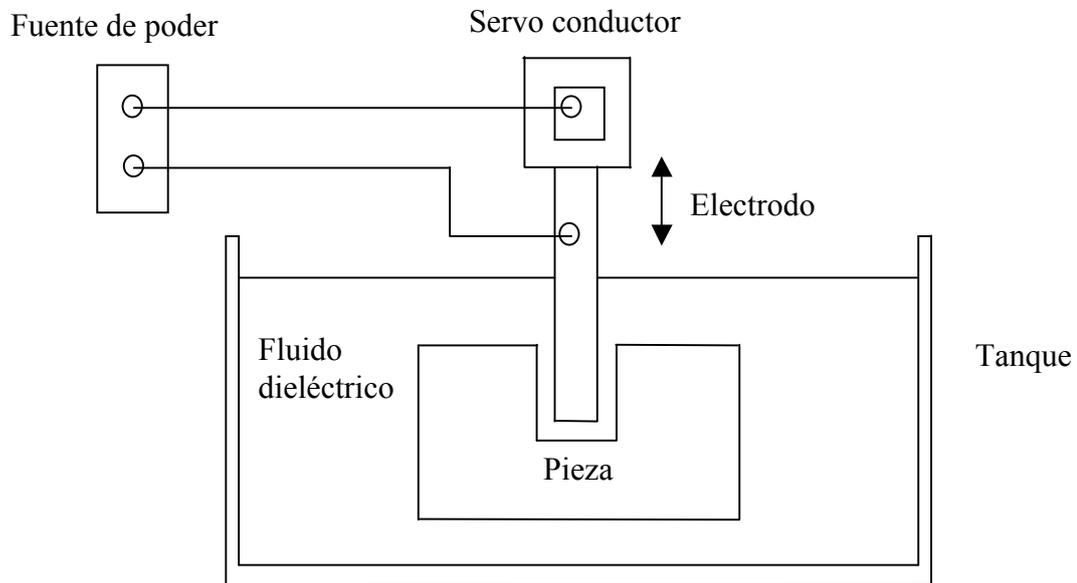


Figura IV.11.- Proceso de electroerosión

IV.6.- Evaluación del campo de esfuerzos residuales en probetas recocidas

Para verificar que las probetas sometidas al tratamiento térmico de recocido se encuentran libres de esfuerzos residuales, se someten al Método de Respuesta de Grieta. El cual consiste en la inducción de una grieta controlada de 1 mm x 1 mm en dirección de la galga. Esto es, mediante el uso de una máquina de electroerosión (Figura IV.12).

Al inducir la grieta, la probeta presenta una relajación que es medida con el puente de Wheatstone, esta operación se realizó 9 veces debido a que la altura de la probeta es de 10 mm. Una vez se realizaron todos los cortes y se obtuvieron las relajaciones de la probeta se realiza el mismo procedimiento descrito en el capítulo III, en la Figura IV.13 se muestra la curva de relajación de las probetas y en la Figura IV.14 los campos de esfuerzos residuales para las probetas recocidas.

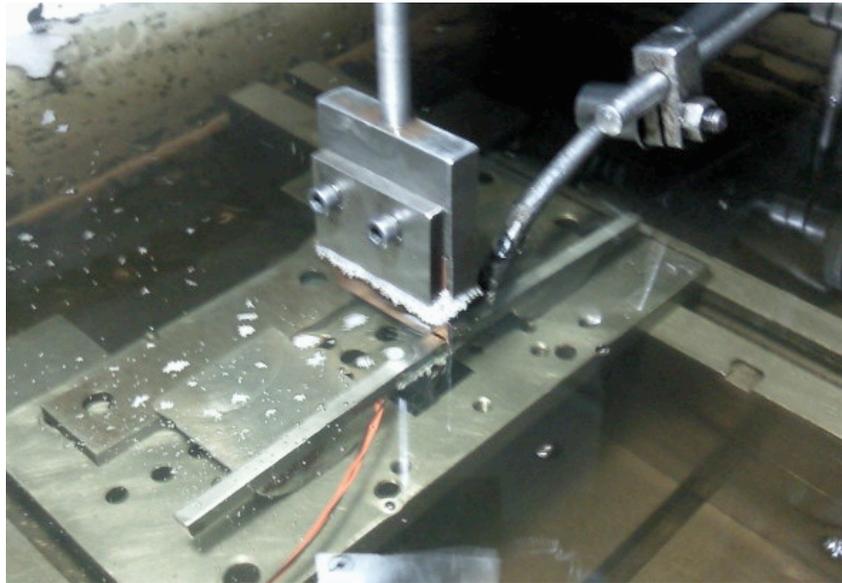


Figura IV.12.- Electroerosionado de las probetas

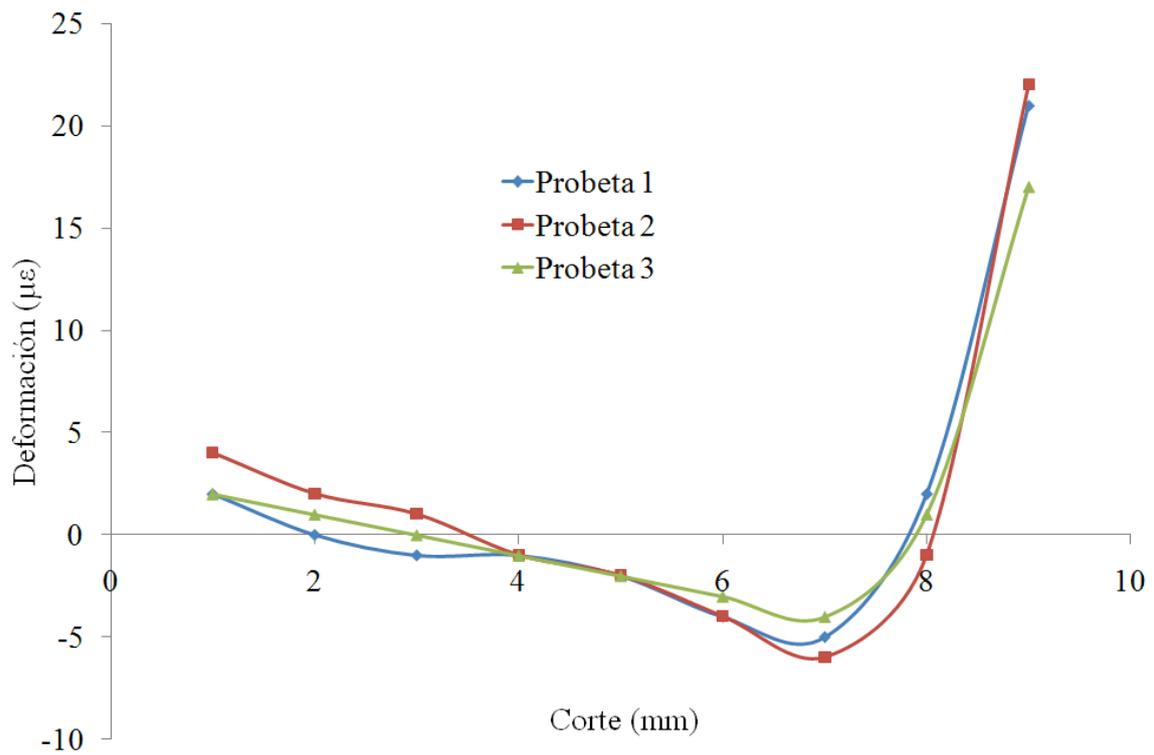


Figura IV.13.- Curva de relajación de las probetas.

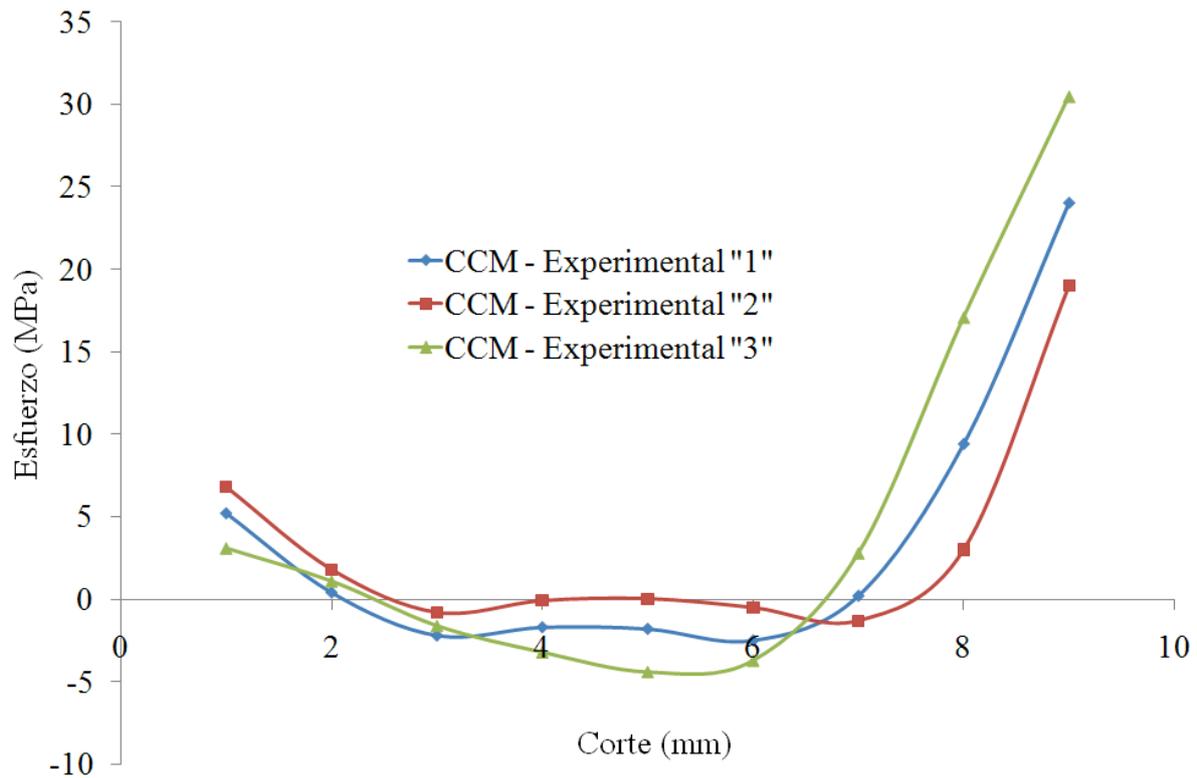


Figura IV.14.- Campo de esfuerzos residuales en vigas recocidas

Es importante mencionar que como las probetas fueron sumergidas en el líquido dieléctrico, las galgas fueron protegidas con un recubrimiento *Dow Corning 3145 RTV* y una goma *M-coat B*, como se muestra en la Figura IV.15.



Figura IV.15.- Recubrimiento de la galga extensométrica

Así como, también se puede observar en la Figura IV.16, que la probeta al momento del corte fueron posicionadas en dos medias cañas para permitir la libre relajación del campo de esfuerzos residuales en cada uno de los cortes.



Figura IV.16.- Posicionamiento de la probeta durante el electroerosionado

IV.7.- Caracterización de las propiedades mecánicas del material

Debido a que en esta investigación interesa conocer las propiedades mecánicas del material cuando se encuentra en un estado de esfuerzos internos nulos, las probetas recocidas se someten al ensayo de cuatro puntos de flexión con la ayuda de una máquina servo hidráulica *INSTRON modelo 8502* con capacidad de 250 kN y se miden las micro deformaciones ($\mu\epsilon$) mediante el uso de un puente de *Wheatstone modelo P3* con cuatro canales (Figura IV.17).



Figura IV.17.- Ensayo de cuatro puntos de flexión

En la Figura IV.18 se muestra la grafica carga-deformación obtenida del ensayo de cuatro puntos de flexión, por motivos de análisis se superponen las dos curvas en el mismo cuadrante, se puede observar la similitud de ambas curvas corroborando, así la isotropía del material.

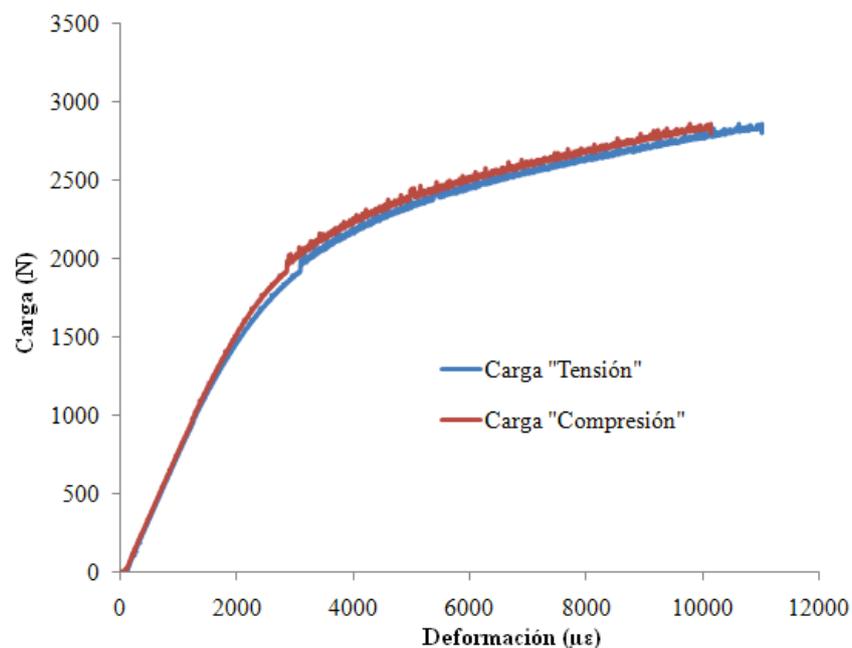


Figura IV.18.- Curva carga-deformación del ensayo de cuatro puntos de flexión

Tomando en cuenta de que las formulas de flexión en vigas, conocidas en los libros de resistencia de materiales se aplica únicamente a la zona elástica del material y que en este análisis experimental las cargas superan el punto de cedencia, se utiliza el procedimiento desarrollado por *Urriolagoitia-Sosa* [2005] y se obtienen las curvas esfuerzo-deformación correspondientes al ensayo de cuatro puntos de flexión (Figura IV.19).

Al obtener la curva esfuerzo-deformación, se pueden obtener las propiedades mecánicas específicas del material, los cuales se presentan en la Tabla IV.3, estos valores son sumamente importantes ya que son la base de la cual se partirá en la manipulación de las propiedades mecánicas y el campo de esfuerzos residuales.

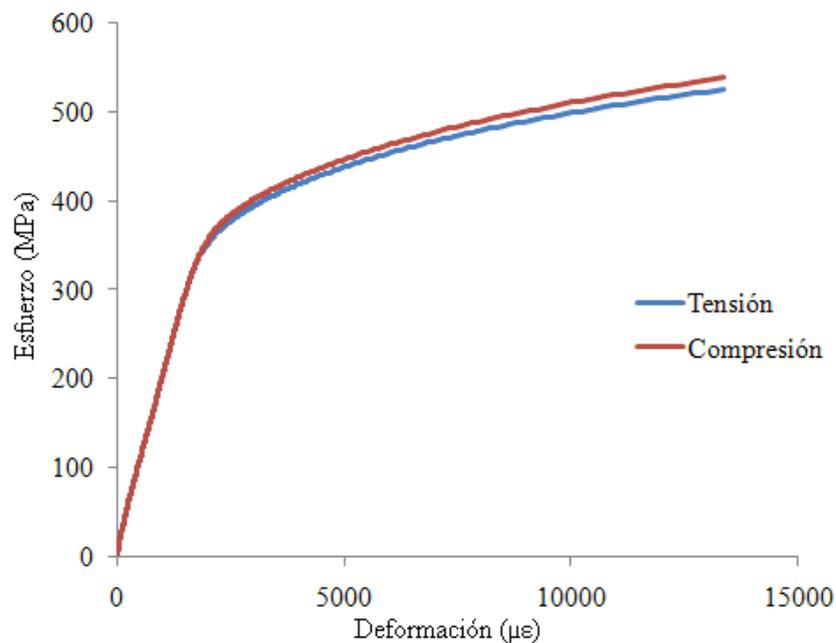


Figura IV.19.- Curva esfuerzo-deformación del ensayo de cuatro puntos de flexión

Tabla IV.3.- Propiedades mecánicas obtenidas del material

Propiedades mecánicas	Sistema métrico
Esfuerzo de cedencia (σ_y)	370 MPa
Deformación de cedencia (ϵ_y)	1900 $\mu\epsilon$
Módulo elástico (E)	190 GPa

IV.8.- Evaluación del campo de esfuerzos residuales en flexión pura

Las probetas utilizadas en la caracterización del material en la sección anterior, quedaron inducidas con esfuerzos residuales al momento de ser retirada la carga. Esto es, debido a que la carga con la que fue caracterizada se aplicó de forma no homogénea y sobrepasó el punto de cedencia. Por lo que se evaluó el campo de esfuerzos residuales aplicando del *CCM*. El *CCM* se realiza mediante el procedimiento anteriormente descrito en la sección IV.6 de la tesis.

En la Figura IV.20 se pueden observar las curvas de relajación correspondientes a los cortes realizados por medio de electroerosión y en la Figura IV.21 se muestra el campo de esfuerzos residuales, inducidos por el ensayo de cuatro puntos de flexión. Al igual que la curva esfuerzo-deformación, el campo de esfuerzos residuales obtenido cuando el material se

encuentra sin historia previa antes de realizar el ensayo de cuatro puntos de flexión, se utiliza como referencia en la manipulación del campo de esfuerzos

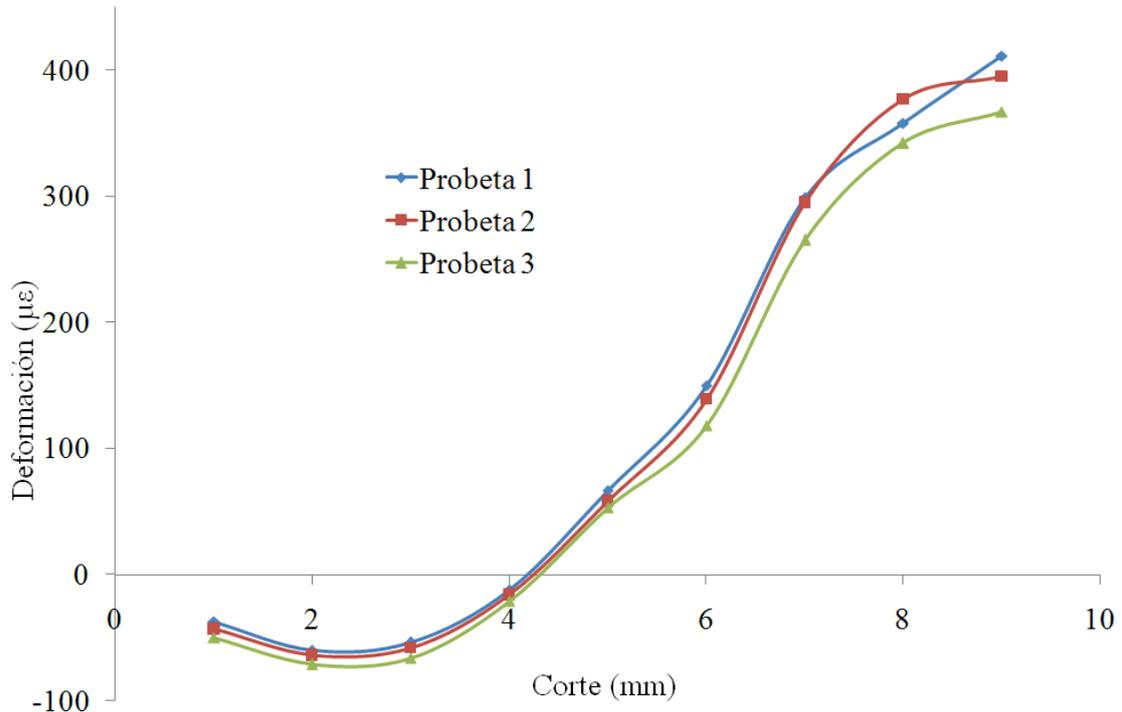


Figura IV.20.- Curva de relación de la deformación en probetas sin historia previa.

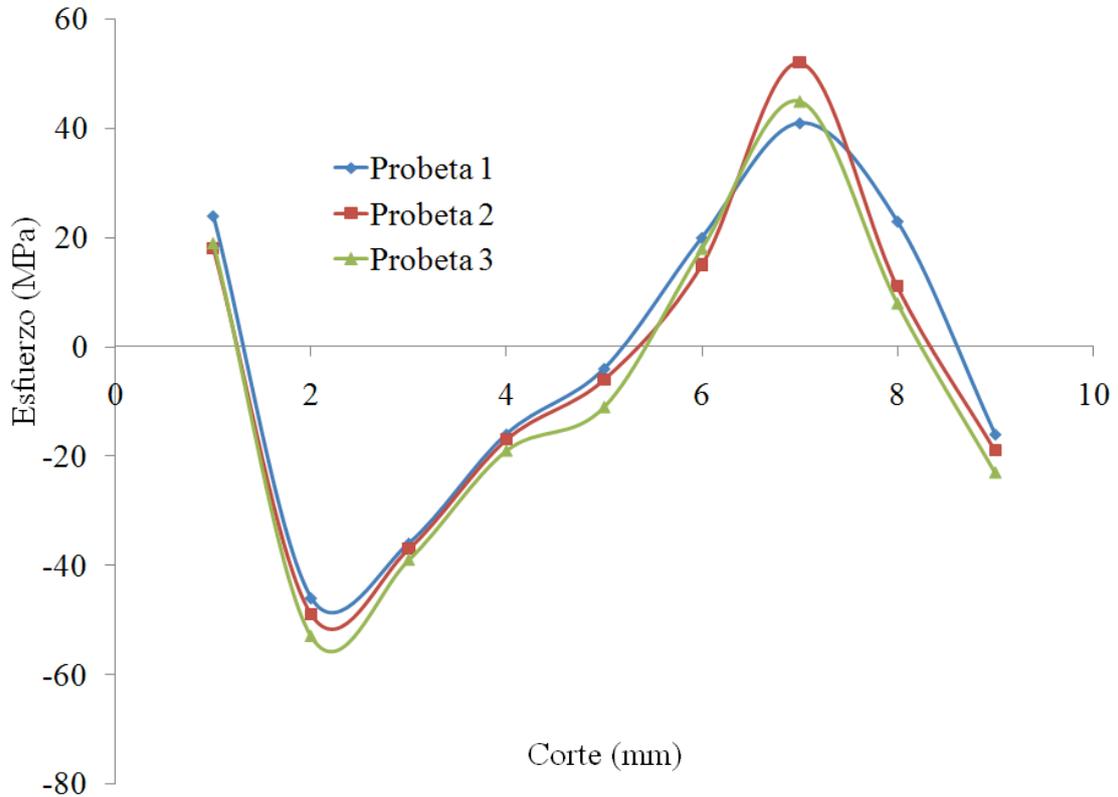


Figura IV.21.- Campo de esfuerzos residuales en probeta sin historia previa

Realizando un análisis comparativo de superposición de gráficas con los resultados obtenidos de forma numérica y experimental. Se puede observar que aunque existen diferencias, los métodos utilizados para la obtención de esfuerzos residuales muestran una similitud en la tendencia del comportamiento en el material (Figura IV.22).

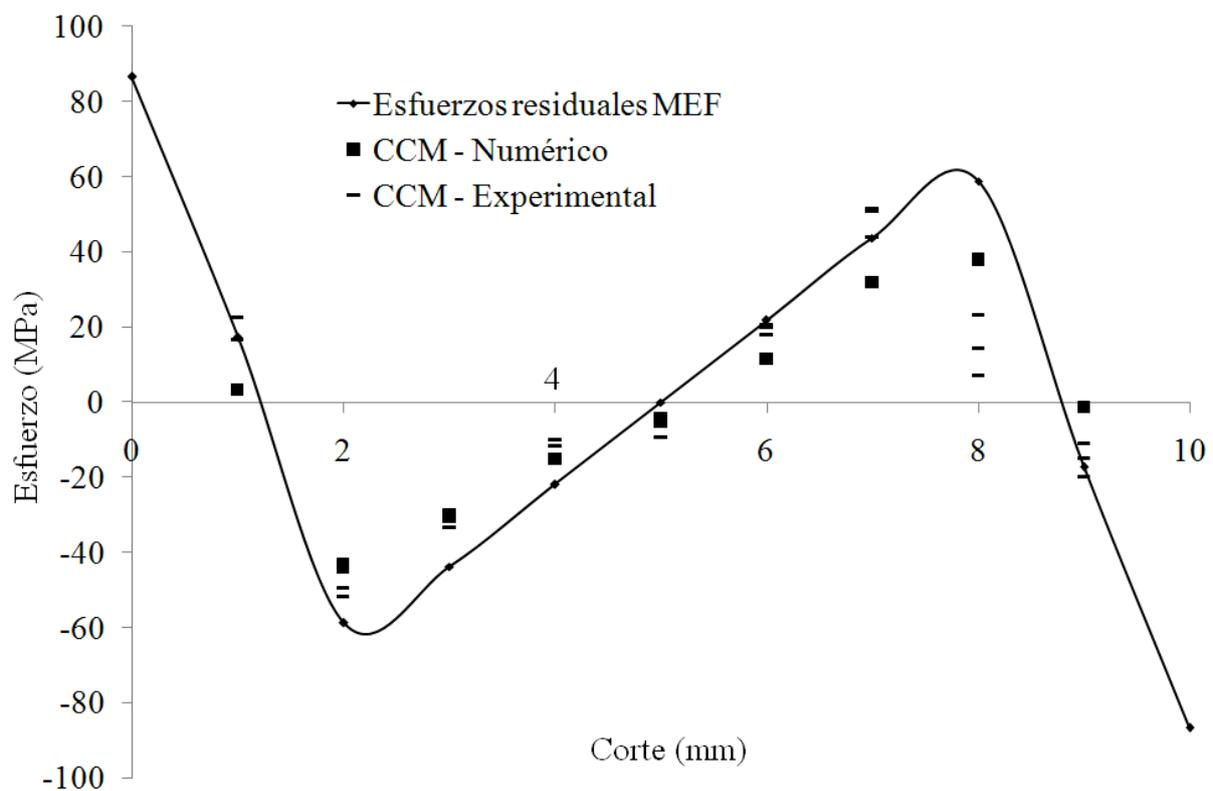


Figura IV.22.- Comparación de campos de esfuerzos residuales en probeta sin historia previa

IV.9.- Manipulación de las propiedades mecánicas y el campo de esfuerzos residuales

IV.9.1.- Obtención de las propiedades mecánicas con historia previa en tensión

En esta sección de la tesis se evalúa el cambio en las propiedades mecánicas del material, mediante la aplicación de una deformación axial en tensión, induciendo así endurecimiento por deformación y efecto Bauschinger. Como se observó en el Capítulo III, la deformación aplicada es directamente proporcional a la deformación de cedencia y se aplican dos casos de deformación: ligera ($3\varepsilon_Y$) y severa ($7\varepsilon_Y$).

La deformación axial se realiza mediante una máquina de ensayos mecánicos, con la cual se aplican deformaciones de $5700 \mu\epsilon$ para la pre-deformación ligera y $13300 \mu\epsilon$ para la pre-deformación severa. En la Figura IV.23 se puede observar la acción del deformado axial en tensión de la probeta.



Figura IV.23.- Deformado axial en tensión de la probeta

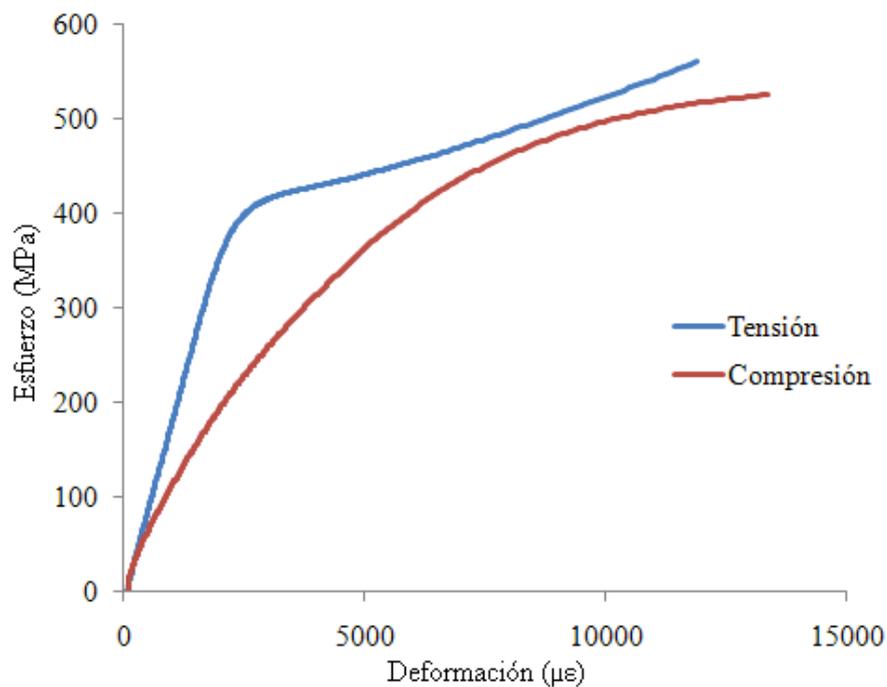


Figura IV.24.- Curva esfuerzo deformación con pre-deformado de $5700 \mu\epsilon$ en tensión

Una vez realizado el pre-deformado axial en tensión, se procede a la caracterización de las propiedades mecánicas mediante el ensayo de cuatro puntos de flexión, de la misma forma que en la sección IV.7 de la tesis. En las figuras IV.24 y IV.25 se pueden observar las curvas esfuerzo-deformación con las nuevas propiedades mecánicas de las probetas.

Al igual que en el análisis numérico, se puede observar un fortalecimiento en la resistencia mecánica en sentido de tensión, que es el sentido de la pre-deformación y una disminución en el sentido contrario que es compresión.

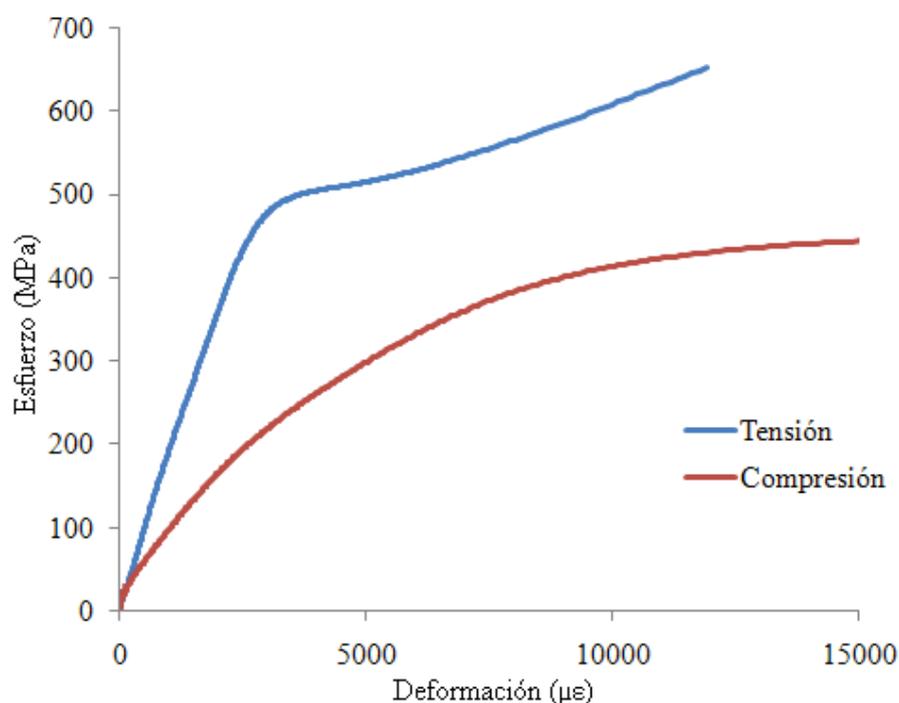


Figura IV.25.- Curva esfuerzo deformación con pre-deformado de 13300 $\mu\epsilon$ en tensión

IV.9.2.- Evaluación del campo de esfuerzos residuales con historia previa en tensión

La manipulación que se realiza en esta investigación no sólo se hace en las propiedades mecánicas del material, sino que también, la pre-deformación axial influye en el campo de los esfuerzos residuales presentes al ser retirada la carga con la cual se caracterizó el material en el ensayo de cuatro puntos de flexión.

En las figuras IV.26 y IV.27 se muestran las curvas de relajación elástica que presenta el material a cada corte.

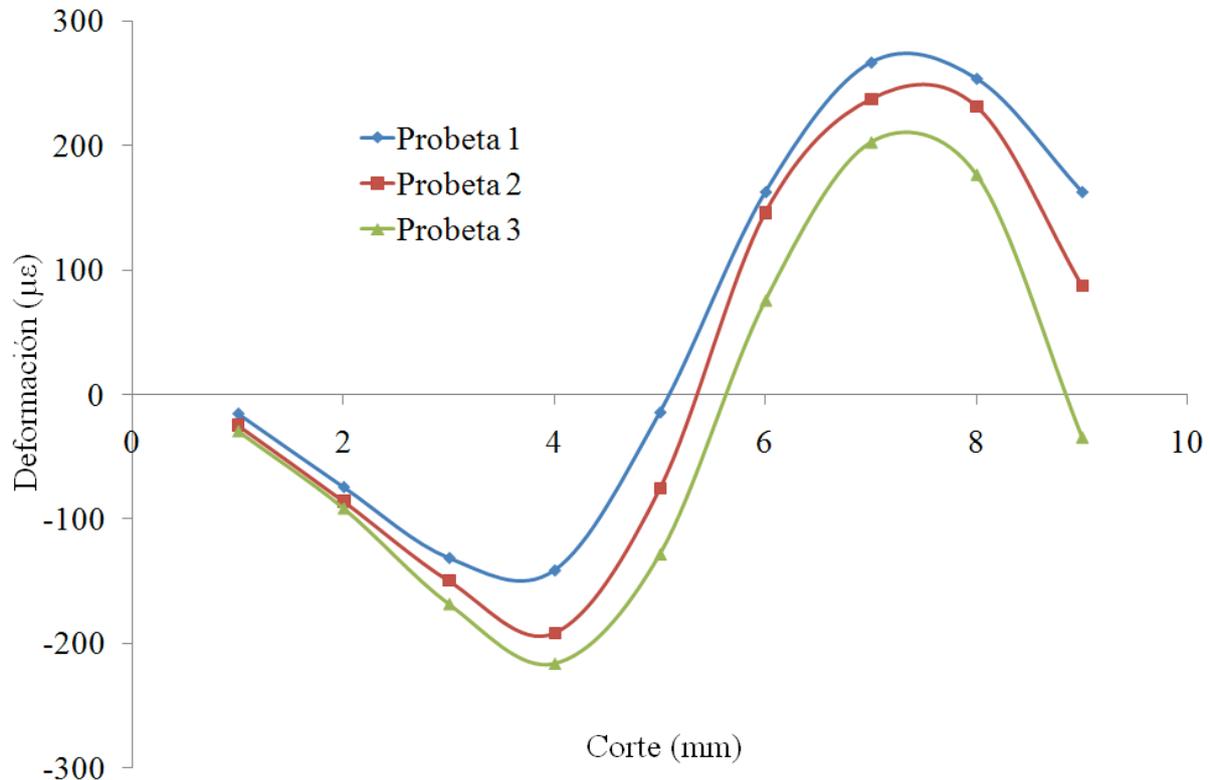


Figura IV.26.- Curvas de relajación con pre-deformado ligero en tensión.

La intensidad de la pre-deformación, es un factor importante en la manipulación del campo de los esfuerzos residuales, como se puede observar en las Figuras IV.28 y IV.29. Los esfuerzos residuales en la superficie de la probeta tiende a crecer en tensión, esto es, los esfuerzos residuales obtenidos con este tipo de manipulación propician la nucleación y propagación de las grietas, por lo que no es conveniente para los elementos mecánicos.

En esta sección de la investigación también se puede realizar una análisis comparativo de los métodos numérico y experimental. En la figura IV.30 y IV.31 se puede observar la superposición de las gráficas.

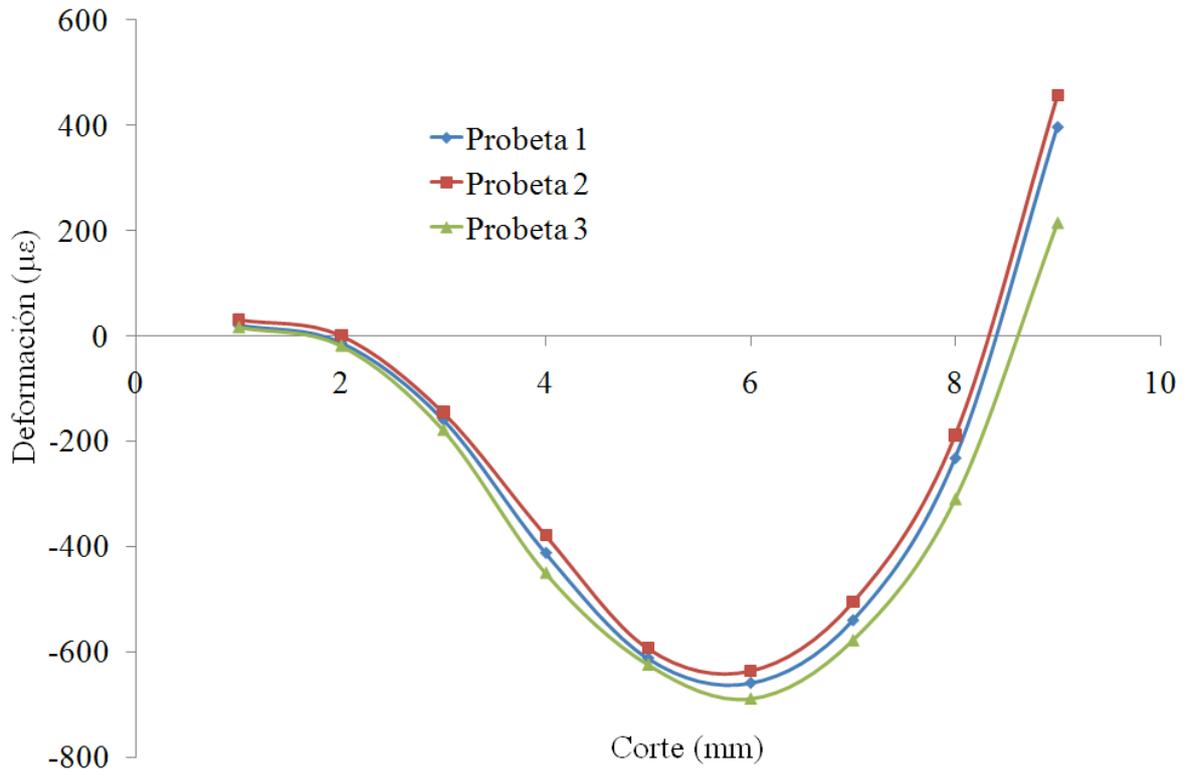


Figura IV.27.- Curvas de relajación con pre-deformado severo en tensión.

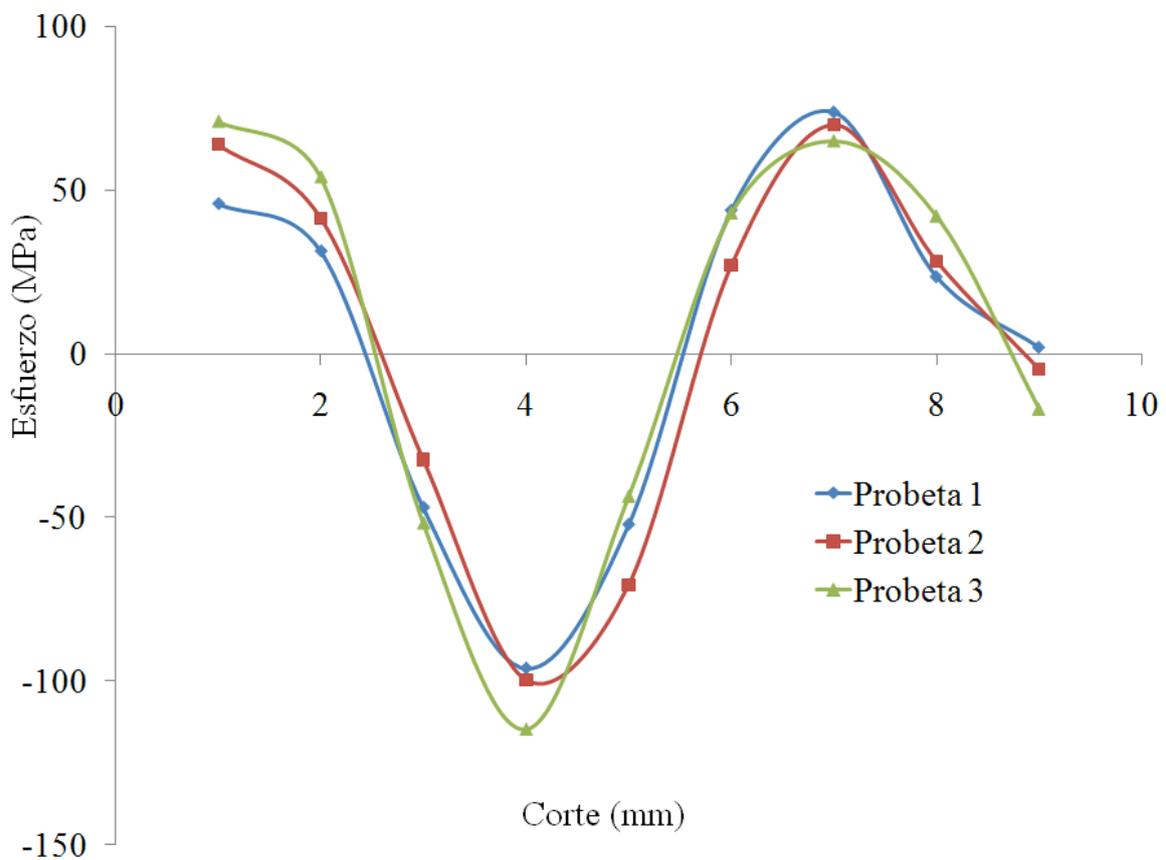


Figura IV.28.- Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado de 5700 µε en tensión

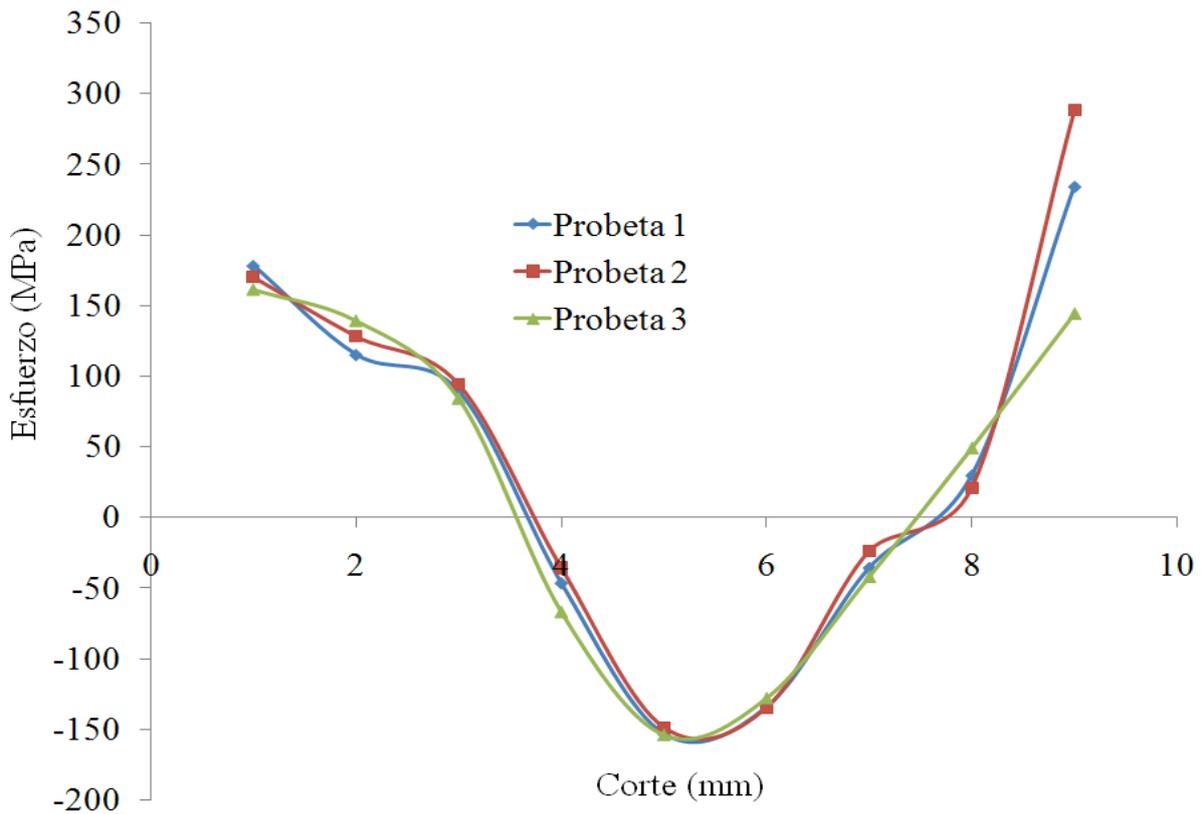


Figura IV.29.- Campo de esfuerzos residuales con pre-deformado de 13300 $\mu\epsilon$ en compresión

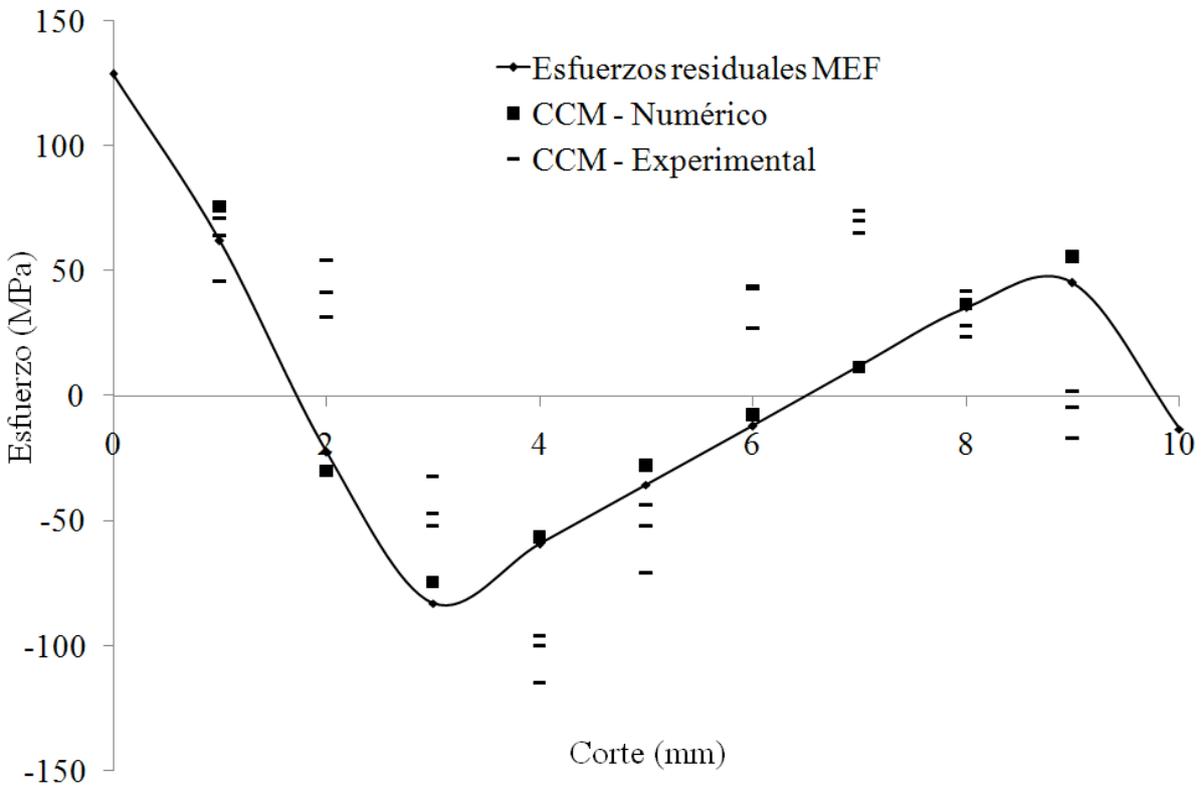


Figura IV.30.- Comparación de métodos con pre-deformado en tensión de 5700 $\mu\epsilon$

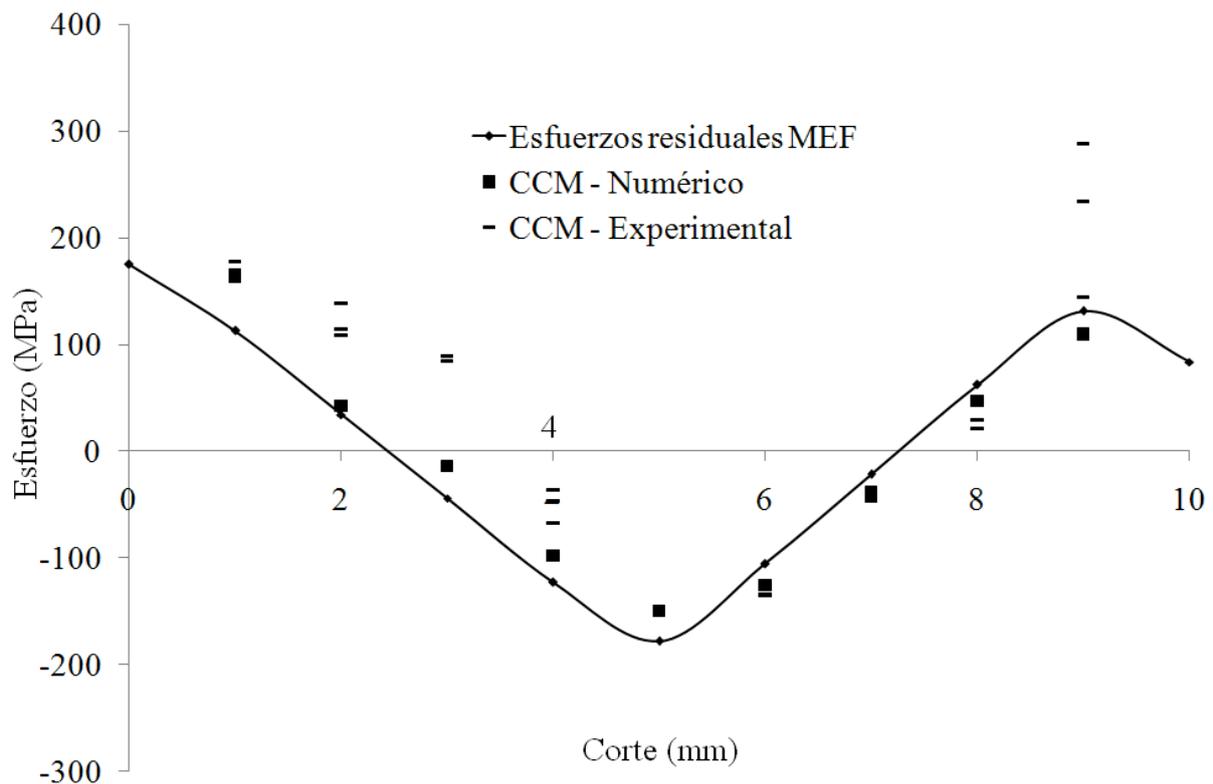


Figura IV.31.- Comparación de métodos con pre-deformado en tensión de 13300 $\mu\epsilon$

IV.9.3.- Obtención de las propiedades mecánica con historia previa en compresión

Para tener una clara caracterización de la manipulación de las propiedades mecánicas del material, ahora el deformado axial antes del ensayo de cuatro puntos de flexión se invierte, de tensión a compresión. Con esto se pretende visualizar el fortalecimiento en la resistencia mecánica en sentido de compresión y la disminución en tensión.

Para esto se hace uso del dispositivo para ensayos a compresión anteriormente descrito, el cual se coloca en la máquina de ensayos mecánicos, cabe aclarar que la probeta sobresale 5mm del dispositivo, con esto, la carga ejercida por la máquina es únicamente aplicada a la probeta, como se muestra en la Figura IV.32.



Figura IV.32.- Deformado axial en compresión de la probeta

Una vez deformado axialmente a la probeta en compresión, nuevamente se procede a la caracterización de las propiedades mecánicas mediante el ensayo de cuatro puntos de flexión, con el mismo procedimiento descrito anteriormente. En las Figuras IV.33 y IV.34 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de las nuevas propiedades mecánicas de las probetas.

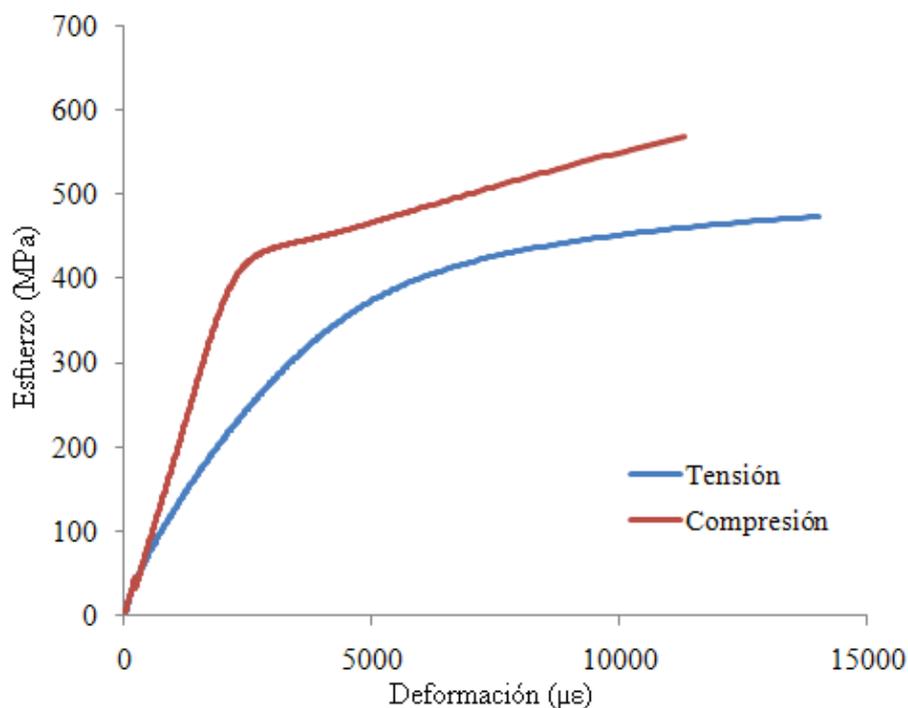


Figura IV.33.- Curva esfuerzo deformación con pre-deformado de 5700 $\mu\epsilon$ en compresión

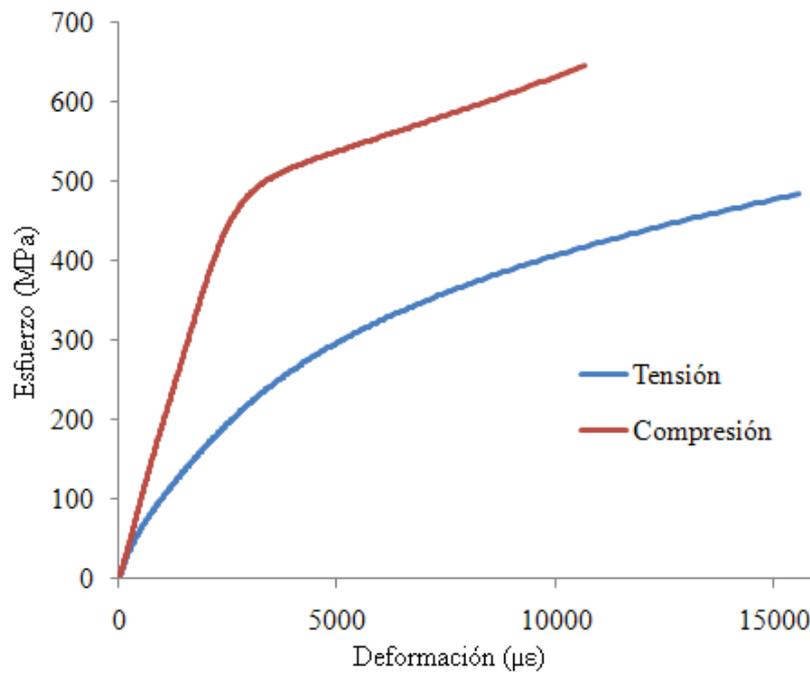


Figura IV.34.- Curva esfuerzo deformación con pre-deformado de 13300 $\mu\epsilon$ en compresión

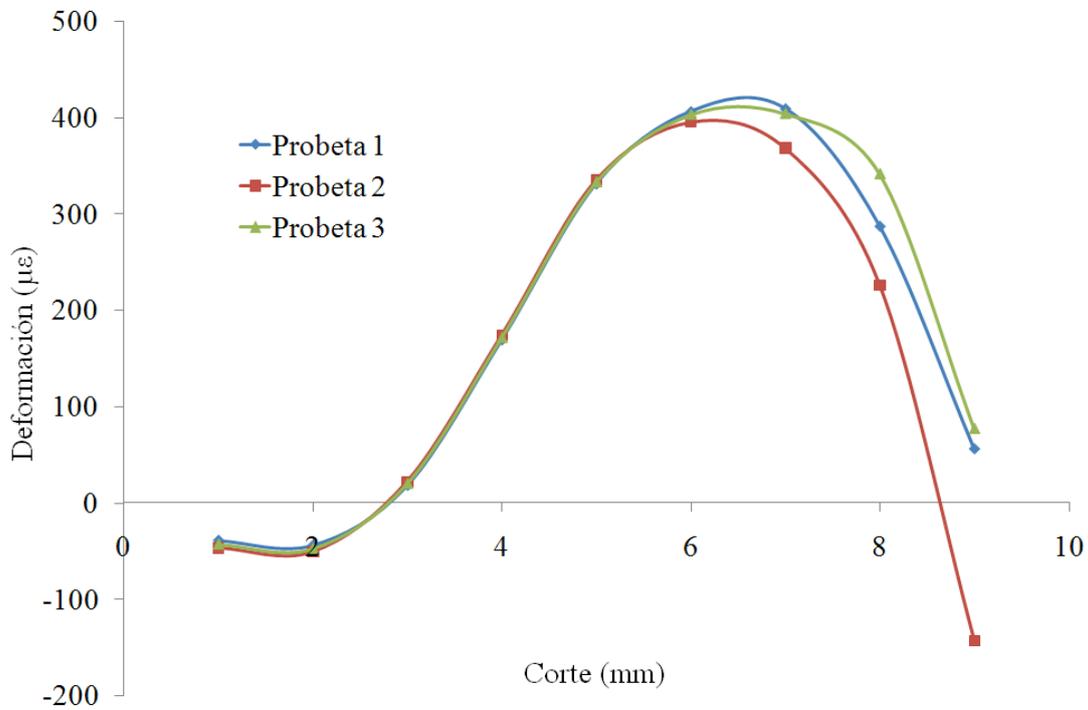


Figura IV.35.- Curva de relajación con pre-deformado ligero en compresión

IV.9.4.- Evaluación del campo de esfuerzos residuales con historia previa en compresión

En la manipulación del campo de los esfuerzos residuales, se puede observar que cuando la probeta está sujeta a una pre-deformación en tensión, el campo de esfuerzos residuales es detrimental, por lo que se invirtió el sentido de pre-deformación axial en compresión. Al igual que cuando la pre-deformación axial es en tensión, cuando se hace en compresión, el campo de esfuerzos residuales en la superficie de la probeta tiende a ser en el sentido de la pre-deformación, que en este caso es compresión. En las Figuras IV.35 y IV.36 se muestran las curvas de relajación elástica que presenta el material a cada corte.

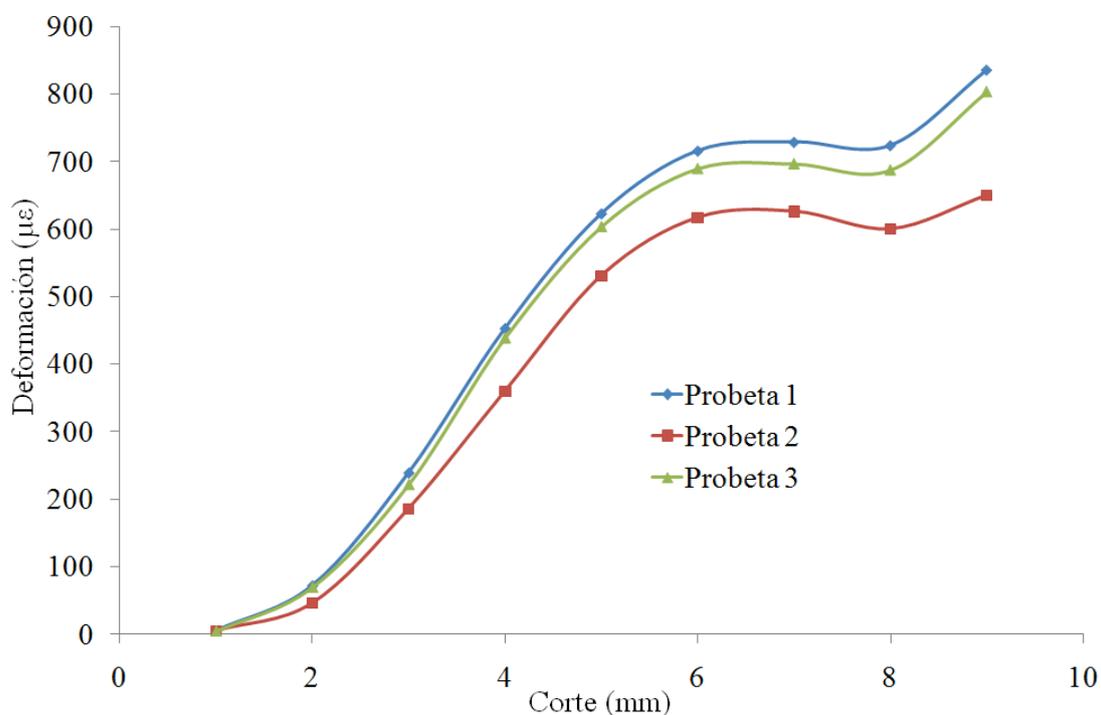


Figura IV.36.- Curva de relajación con pre-deformado severo en compresión

En las Figuras IV.37 y IV.38 se pueden observar los campos de esfuerzos residuales, los cuales son benéficos para evitar la nucleación y propagación de las grietas.

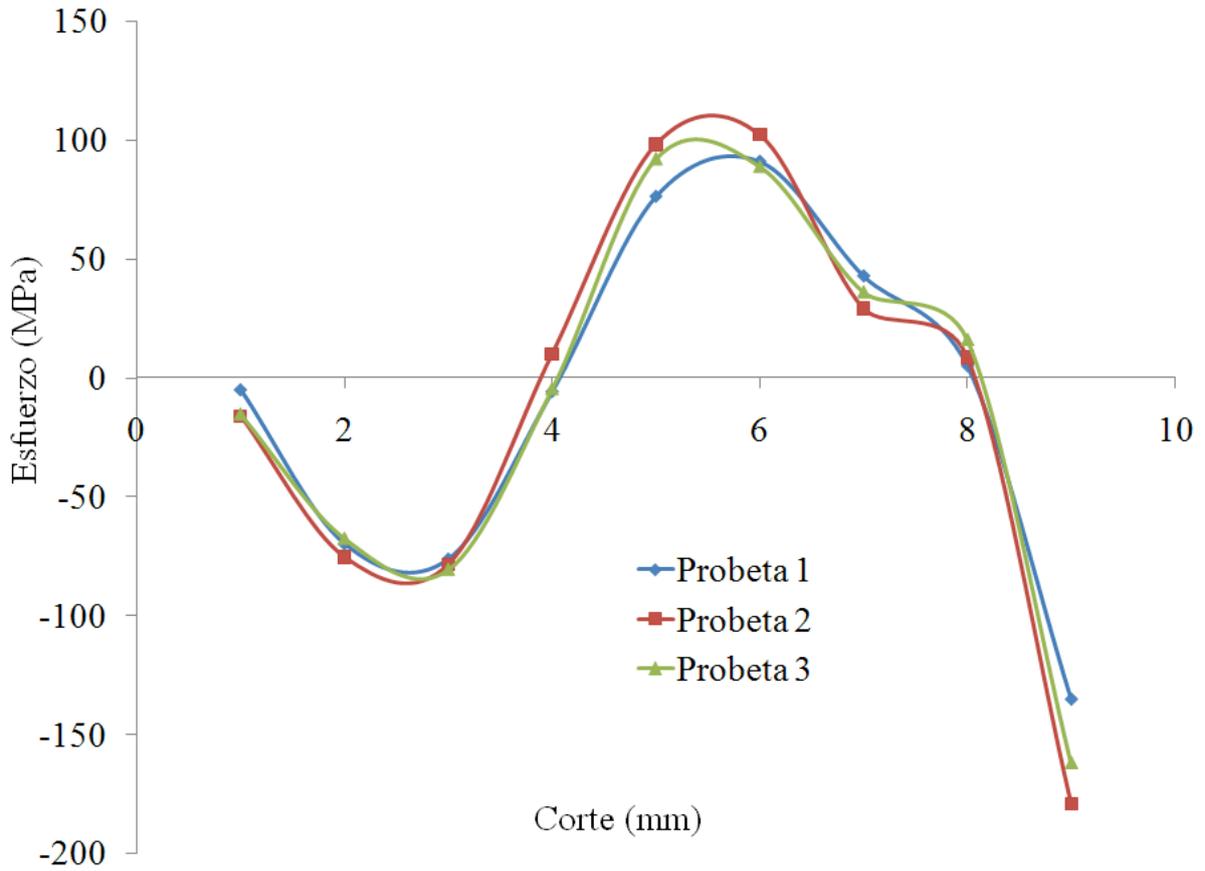


Figura IV.37.- Campo de esfuerzos residuales con historia previa de 5700 µε en compresión

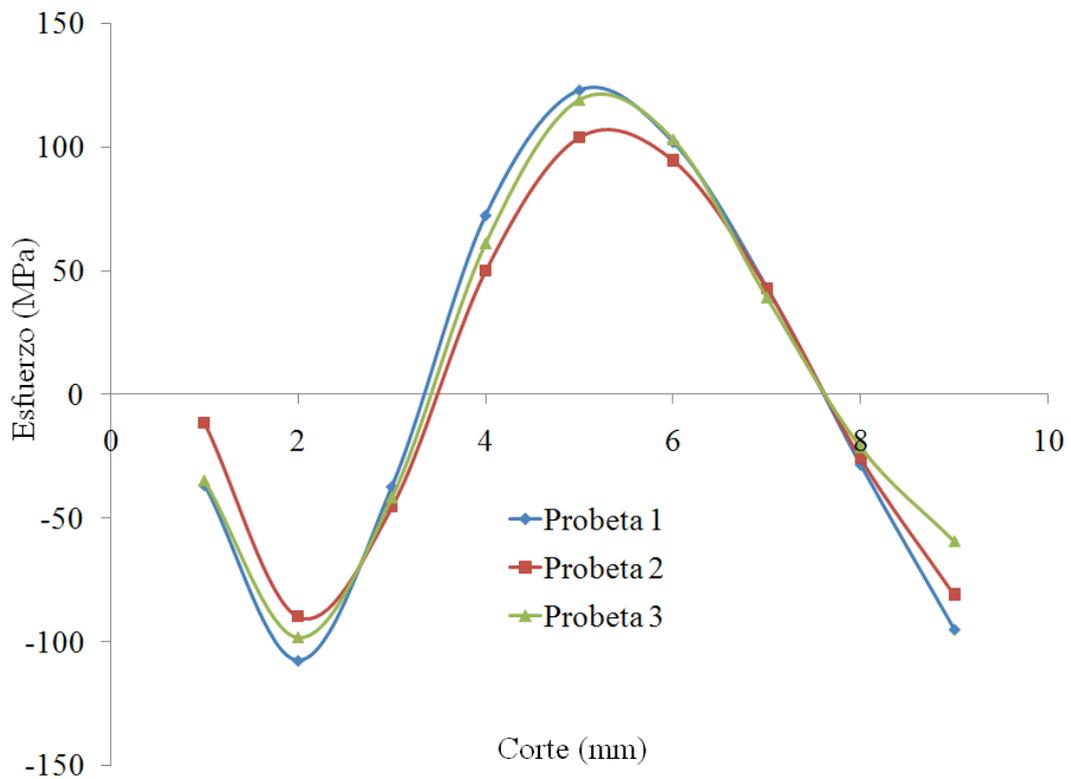


Figura IV.38.- Campo de esfuerzos residuales con historia previa de 13300 µε en compresión

Al igual que en los casos anteriores donde se realizó el análisis del campo de esfuerzos residuales de forma experimental, se realiza una comparación en entre los dos métodos como se puede observar en los Figuras IV.39 y IV.40.

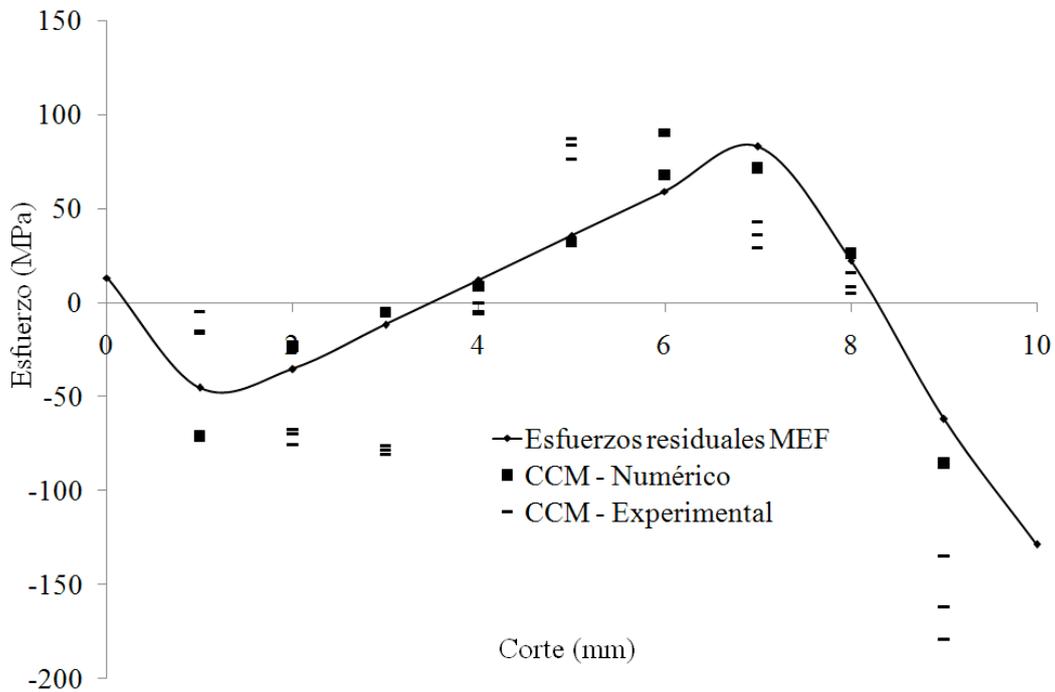


Figura IV.39.- Comparación de métodos con pre-deformado en compresión de 5700 µε

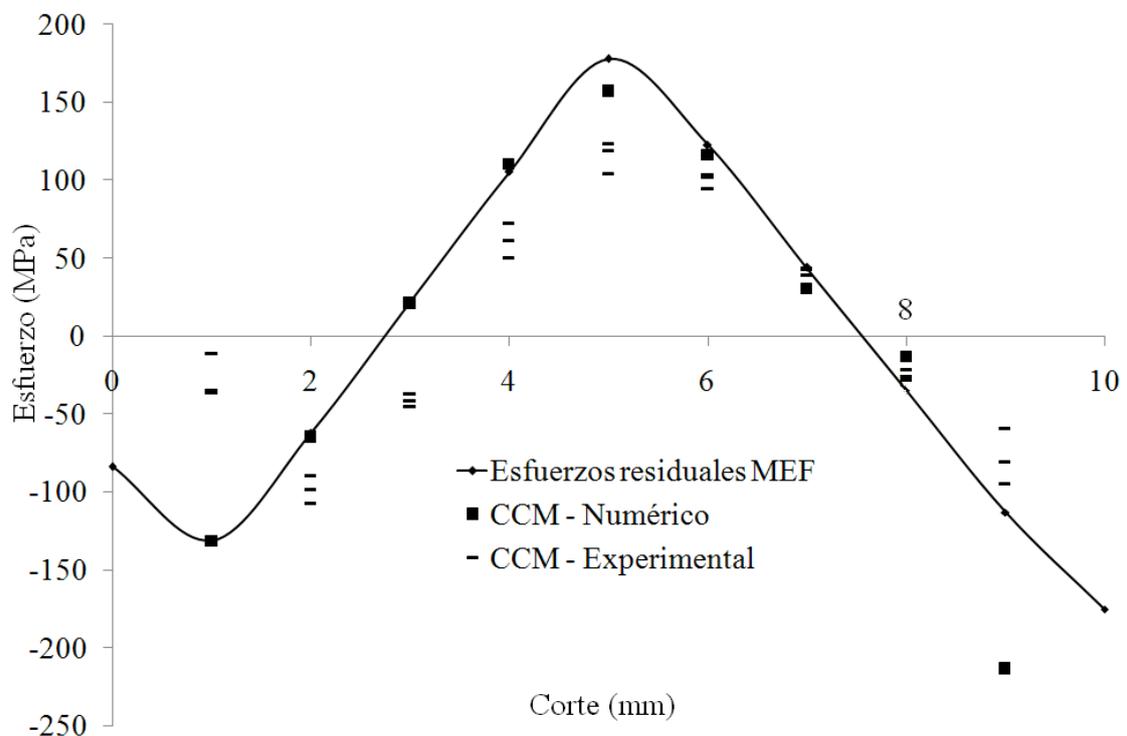


Figura IV.40.- Comparación de métodos con pre-deformado en compresión de 13300 µε

IV.10.- Sumario

En este capítulo se desarrolló el análisis experimental de la tesis, primero se describieron los procesos de obtención de las probetas y la preparación de las mismas, como lo es; el recocido para el relevado de esfuerzos y la instrumentación de las probetas. Posteriormente se procedió a realizar los ensayos, para esto, se evaluó el campo de esfuerzos residuales en probetas recocidas para verificar que las probetas se encontraban libres de esfuerzos y se caracterizaron las propiedades mecánicas de las probetas sin historia previa, una vez obtenidas las propiedades mecánicas, se prosiguió a la manipulación de estas y del campo de esfuerzos residuales mediante deformaciones axiales tanto en tensión como en compresión.

En la siguiente sección se finaliza el trabajo de investigación con las conclusiones y discusiones de la tesis.

DISCUSIONES
CONCLUSIONES Y
REFERENCIAS

Discusiones.

El trabajo de investigación fue realizado sin tomar en cuenta la temperatura, por lo que es necesario realizar más análisis a diferentes temperaturas para comprender mejor el comportamiento del material cuando se le aplican este tipo de cargas, además, incrementar la velocidad de carga y realizar análisis dinámicos como lo son las cargas súbitas. Por otro lado, también se pretende evaluar en trabajos futuros la resistencia a la fatiga del Acero Inoxidable AISI 316L con los campos de esfuerzos residuales obtenidos en la investigación, con esto se pretende medir la vida útil del material.

Conclusiones.

Esta investigación se basó en el análisis numérico y experimental del problema. En el capítulo III, se realizó el análisis numérico con la finalidad de tener una idea clara del comportamiento del Acero Inoxidable AISI 316L bajo cargas homogéneas y no homogéneas. Con este análisis se observó claramente el cambio de las propiedades mecánicas cuando se le aplica un pre-deformado axial al elemento, presentando endurecimiento por deformación lo que involucra el efecto Bauschinger, también se observa un cambio en el campo de esfuerzos residuales inducidos en el material por efecto del ensayo de cuatro puntos de flexión, dicho cambio se puede controlar mediante la dirección y la magnitud del endurecimiento por deformación.

Una vez realizado el análisis numérico se procedió a corroborar los resultados de forma experimental, ya que en el análisis numérico se hacen consideraciones tanto en el material como en el método con el que se realiza el análisis. En el capítulo IV, se describió la metodología y el desarrollo experimental, obteniendo excelente similitud entre los resultados de ambos métodos. Con estos resultados se puede concluir del trabajo de investigación lo siguiente:

- El ensayo de cuatro puntos de flexión es un excelente método para la caracterización de los materiales, y debido a que se obtienen simultáneamente las curvas esfuerzo-deformación tanto en tensión como en compresión en un mismo ensayo, además se puede observar el efecto de la historia previa en las propiedades mecánicas de un material.

- El endurecimiento por deformación es un buen método de fortalecimiento unidireccional de las propiedades mecánicas de los materiales.
- La cantidad del incremento de la resistencia mecánica es directamente proporcional a la magnitud del pre-deformado a la que fue sometido el elemento.
- Debido al efecto Bauschinger, cuando se fortalece un material con endurecimiento por deformación, se tiene que tener en cuenta en el diseño de no sobrepasar el punto de cedencia en el sentido contrario del pre-deformado axial, debido a la disminución de la resistencia mecánica en esa dirección.
- El endurecimiento por deformación no solo influye en el cambio de las propiedades mecánicas, sino que también en la manipulación del campo de esfuerzos residuales, el cual esta en función de la dirección y la magnitud del pre-deformado axial, obteniendo mejores resultados cuando el pre-deformado es en compresión, debido a que presenta un campo de esfuerzos residuales en compresión en la superficie de la probeta, que es en donde se presentan las grietas
- Al invertir el sentido de la pre-deformación, el campo de esfuerzos residuales se invierte en los ejes, esto es, lo que estaba en el eje x positivo pasa a x negativo y lo que estaba en y positivo pasa a y negativo

Con estos resultados se puede ver la importancia del endurecimiento por deformación y las ventajas que pueden otorgar al implementarlo en los procesos de manufactura, con lo cual no sólo se pueden manipular las propiedades mecánicas, sino también, el campo de esfuerzos residuales presentes en el material, aumentando y fortaleciendo así la vida útil de los elementos mecánicos diseñados.

Por otro lado, ya que el material utilizado en la investigación es de grado médico, con el cual se manufacturan implantes biomecánicos, como la prótesis total de cadera, la cual se desarrolla en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad Zacatenco (SEPI ESIME Zacatenco), el fortalecimiento unidireccional en compresión fortalece en gran medida al material, debido a que el peso del cuerpo ejerce una carga en compresión sobre la prótesis.

Trabajos futuros

En la realización del análisis numérico de esta tesis se hacen consideraciones siguiendo la resistencia de materiales clásica cuando se realiza un análisis macroscópico, esto es, se considera al material como isotrópico, continuo, lineal y homogéneo, lo cual nos aleja un poco de la realidad, por lo que se considera un análisis microscópico del material bajo este tipo de cargas.

En el desarrollo experimental también se puede hacer un análisis micro estructural de las probetas que se sometieron a cuatro puntos de flexión y a los diferentes tipos de pre-deformado. Además se puede llevar acabo el desarrollo experimental a diferentes temperaturas y diferentes velocidades de carga, y así tener un mayor panorama del comportamiento del material.

También el procedimiento de caracterización de las propiedades mecánicas bajo cuatro puntos de flexión se puede llevar acabo en distintos materiales, como lo son: aleaciones no ferrosas, polímeros y cerámicos, comprobando así, la eficiencia del método en diferentes materiales.

Referencias

Aran, A., Demirkol, M. y Karabulut, A., *Bauschinger* effect in precipitation strengthened Aluminium alloy 2024, *Material Science and Engineering*, Vol. 89, pp L35-L39, 1987.

Arsenault, R. J. y Wu, S. B., The strength differential and Bauschinger effect in SiC-Al composites, *Materials Science and Engineering*, Vol. 96, pp 77-88, 1987.

Ashby, M. F., Work hardening of dispersion-hardened crystals, *Philosophic Magazine*, Vol. 14, pp 1157-1178, 1966.

Askeland, D. R., *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3ra edición, Thomson, pp 129-220, 1998.

ASTM F139-003, Standard Specification for Wrought – 18 Chromium – 14 Nickel – 2.5 Molybdenum Stainless Steel Sheet and Strip for Surgical Implants (UNS S31673), *American Society for Testing Materials*, 1992.

ASTM E 8-00b, Standard test methods for tension testing of metallic materials, *American Society for Testing Materials*, West Conshohocken, PA., 1992.

Bader, W. y Lode, W., *Dissertations*, University of Gottingen, 1930.

Bainbridge, A. T., Residual stresses arising from machining and fabrication, *Symposium on Eng. Practice to Avoid SCC*, pp 8-21, Oct, 1969.

Baird, L., *Phil. Trans. Roy. Soc., A*, pp 210-235, 1911.

Bauschinger, J., Changes of the elastic limit and the modulus of elasticity on various metals, *Zivilingenieur*, Vol. 27, pp 289-353, 1881.

Bauschinger, J., On the changes of the elastic limit and strength of iron and steel, by drawing out, by heating and cooling, and by repetition of loading, *Mitteilungen aus dem mechanischen technischen laboratorium der k*, Hochschule in Munchen, pp 463-465, 1886.

Beer, F. P. y Johnston, E. R., *Mecánica de Materiales*, Traducción de primera edición, pp 181-267, 1981.

Bonner, N. W., *Measurement of residual stresses in thick-section steel welds*. Ph. D. thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Bristol, pp 7, 1996.

Canal, J. R., *Investigation of the Bauschinger effect in copper*. Tesis de Maestría, Massachusetts Instituted of Technology, 1956.

Chakrabarty, J., *Theory of Plasticity*, McGraw-Hill, pp 55-80, 1987.

Chandlers H, *Heat treater's guide practice and procedures for Irons and Steels*, Segunda edición, ASM International, 1995.

Cheng, W. y Finnie. I., An Overview of the Crack Compliance Method for Residual Stress Measurement, *Proc. 4th Int. Conf. Residual Stress*, Baltimore, Maryland, Society for Experimental Mechanics, pp 449–458, 1994.

Cheng, W., Finnie, I. y Prime, M. B., Measurements of Residual Stresses Through the Thickness of a Strip Using the Crack Compliance Method, *Residual Stress III – Science and Technology Proceedings 3rd International Conference of Residual Stress*, Vol. 2, pp 1127–1132, 1997.

Davenport, S. B. M., Higginson, R. L. y Sellars, C. M., The effect of strain path on material behaviour during hot rolling of FCC metals, *Philosophical Transaction of the Royal Society London A*, pp 1645-1661, 1999.

Dowling, N. E., *Mechanical Behavior of Materials*, 2da edición, pp 527-648 1998.

Dowling, J. M., Atkidson, J. R., Dowson, D., Charnley, J., The characteristics of acetabular cups worn in the human body, *The Journal of Bone and Join Surgery*, Vol. 60-B, No. 3, pp 375-382, 1978.

Dye, D., Roberts, S. M., Withers, P. J. y Reed, R. C., The determination of the residual strains and stresses in a tungsten inert gas welded sheet of IN718 super-alloy using neutron diffraction, *Journal of strain analysis*, Vol. 35, No. 4, pp 247-259, 2000.

Embury, J. D. y Ashby, M. F., The influence of dislocation density on the ductile-brittle transition in BCC metals, *Scripta Metallurgica*, Vol. 19, pp 557-562, 1985.

Gere, J. M., *Mecánica de Materiales*, 5ta edición, pp 10-20, 150-156, 407-454 2002.

Guerra Loeza, J. O., Hernández Gómez, L. H., Urriolagoitia Calderon, G., Villa y rabasa, G., López Martínez, R. y Flores, L. A., Análisis de la deformación plástica mediante el método de elemento finito, *Científica*, vol. 5, No.1, pp. 31-37, 2001.

Gould, D. D., Hirsch, P. B. y Humphreys, F. J., The Bauschinger effect, work-hardening and recovery in dispersion-hardened copper crystals, *Philosophic magazine*, pp 1353-1375, 1974.

Hasegawa, T., Yakou, T. y Kocks, U. F., Forward and reverse rearrangements of dislocation in tangled walls, *Materials Science and Engineering*, Vol. 81, pp 189-199, 1986.

Henrnández Gomez, L. H., Sauseda Meza, I., Urriolagoitia Calderon, G., Balankin, A. S. y Susarrey, O., Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rate. *Theoretical and applied fracture mechanics*, vol. 42, pp 53-61, 2004

Heyn, E., Theory of the cancelled elastic stresses, *Metall und Erz, Zeitschrift*, Vol. 15, pp 411-422, 1918.

Hibbeler, R. C., *Mecánica de materiales*, Prentice Hall, 3ra edición, pp 347-358, 1997.

Huang, D. J., Mayo, W. E. y Chen, Y., Residual stress measurement in time-controlled quenched austenitic steel, *Journal of experimental mechanics*, pp 359-363, 1988.

Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, T. A. y Grant, P. V., A review of residual stress measurement methods – A guide to technique selection, *Project CPM 4.5, Measurement of residual stress in components, NPL Report MAT(A) 04*, Feb. 2001

Kang, K. J., Song, J. H. y Earmme, Y. Y., A method for the measurement of residual stresses using a fracture mechanics approach, *Journal of strain analysis*, Vol. 24, pp 23–30, 1989.

López, D. A., Durán, A. y Ceré, S., *Caracterización superficial de Acero inoxidable AISI 316L en contacto con solución fisiológica simulada, Congreso CONAMENT*, 2004.

López Castro, A., Durodola, J. F., Urriolagoitia Sosa, G., Fellows, N. A., Measurement and prediction of springback in bending beams, *Revista Mexicana de Física*, vol. 51 No. 1, pp. 30-34, 2005.

Lloyd, D. J., The *Bauschinger* effect in polycrystalline aluminium containing coarse particles, *Acta Metallurgica*, Vol. 25, pp 459-466, 1977.

Macherauch, E. y Kloos, K. H., Origin, measurement and evaluation of residual stresses, *Residual stresses in science and technology*, ISBN3-88355-099-X, Vol. 1, pp 3-26, 1986.

Mangonon, P. L., *Ciencia e ingeniería de materiales selección y diseño*, Prentice Hall, 1a edición, pp 122-145, 2001.

Margolin, H., Hazaveh, F. y Yaguchi, H., The grain boundary contribution to the *Bauschinger* effect, *Scripta Metallurgica*, Vol. 12, pp 1141-1145, 1978.

Masing, G., *Zeitschrift fur Metallkunde*, Vol. 17, pp 268, 1925.

Masubuchi, K., *Analysis of welded structures*, pp 92-94, 1980.

Metal Handbook, *Libro 8, Mechanical Testing and Evaluation*, pp 237-262, 2000.

Moore, H. y Beckinsale, S. J., The removal of internal stress in 70:30 brass by low temperature annealing, *Journal of the institute of metals*, Vol. 23, pp 225-245, 1920.

Mroz, Z., On the description of anisotropic work-hardening, *Journal of the mechanics and physics of solids*, Vol. 15, pp 163-173, 1967.

Nadai, A., *Plasticity*, McGraw-Hill, 1931.

Ono, N., Tsuchikawa T. y Nishimura S., Intergranular constrain and *Bauschinger* effect, *Materials Science and Engineering*, Vol. 59, pp 223-233, 1983.

Orowan, E., *Internal stresses and fatigue of metals*, N. Y. Elsevier, pp 1-29, 1959.

Parlane, A. J. A., The determination of residual stresses: A review of contemporary measurement techniques, *Residual stresses in welded construction and their effects*, pp 63-78, 1979.

Pedersen, O. B., Brown, L. M. y Stobbs, W. M., The *Bauschinger* effect in cooper, *Acta Metallurgical*, Vol. 29, pp 1843-1850, 1981.

Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. y Vetterling, W. T., *Numerical recipes*, Cambridge University Press, 1987.

Prime, M. B., Residual stress measurement by successive extension of a slot: The crack compliance method, *Applied mechanics reviews*, Engineering Sciences and Applications Division, MS P946, Los Alamos National Laboratory, NM, 87545, Vol. 52, No. 2, pp 75-96, 1999.

Reynolds, A. P. y Lyons, J. S., Isotropic and Kinematic hardening in a dispersion strengthened Aluminum alloy, *Metallurgical and materials transactions A*, Vol. 28A, pp 20-30, 1205-1211, Mayo, 1997.

Sachs, G. and Espey, G., The measurement of residual stresses in metal, *The iron age*, pp. 63–71, 1941.

Sachs, W. y Shoji, H., Compression test at brass crystals (*Bauschinger* effect), *Magazine for physical*, Vol. 45, pp 776-796, 1927.

Sauceda Meza, I., Hernández Gómez, L. H., Urriolagoitia Calderon, G., Rodríguez Castellanos, A. y Villa y Rabasa, G., Crack propagation study under mixed mode loading, *Revista Mexicana de Física*, vol. 51, suplemento 1, 1-4, 2005

Sauceda Meza, I., Hernández Gómez, L. H., Urriolagoitia Calderon, G. y Rodríguez, A., Analysis of crack propagation stability under biaxial stress field, *Científica*, vol. 5, No. 3, pp. 131-134, 2001.

Schindler, H. J. y Landolt, R., Experimental determination of residual stress and the resulting stress intensity factors in rectangular plates, *Proceedings 4th. European conference on residual stresses*, Cluny, France, pp 509-517, 1996.

Schindler, H. J., y Bertschinger, P., Some steps toward automation of the crack compliance method to measure residual stress distribution, *The fifth Int Conf on Residual Stress*, Linköping, Sweden, Ericsson, T., et al., Vol. 2, pp 682-687, 1997.

Stouffer, D. C. y Dame, L. T., *Inelastic deformation of metals*, pp 215-225, 1996.

Takeda, T. y Nasu, Y., Determination of the *Bauschinger* effect and planar anisotropy from bending test, *Bull Yamagata Univ Eng*, Vol. 20, No. 2, pp 169-177, January, 1989.

Thakur, A., Nemat-Nasser, S. y Vecchio, K. S., Dynamic *Bauschinger* effect, *Acta Metallurgica*, Vol. 44, No. 7, pp 2797-2807, 1996.

Timoshenko, S., *Resistencia de materiales parte II*, pp 412- 420, 1956.

Timoshenko, S. P. y Gere, J. M., *Mechanics of materials*, Third SI Edition, pp 250-340, 1991.

Treuting, R. G., The nature, origin and effects of residual stresses, *Residual stress measurements*, pp 1-41, 1952.

Urriolagoitia Calderon, G. y Hernández Gómez, L. H., Evaluation of crack propagation stability with the William stress function. Part I, *International journal of Computers & Structures*, vol. 61, No. 4, pp. 775-780, 1996.

Urriolagoitia Calderon, G. y Hernández Gómez, L. H., Evaluation of crack propagation stability with the William stress function. Part I, *International journal of Computers & Structures*, vol. 63, No. 5, pp. 1007-1014, 1997.

Urriolagoitia Calderon, G. y Hernández Gómez, L. H., Experimental analysis of crack propagation stability in single edge notch specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 28, pp. 57-68, 1997.

Urriolagoitia Calderon, G., Hernández Gómez, L. H., Villa y Rabasa, G., Urriolagoitia Sosa, G., Medina Velarde, J. L., Vázquez Mendoza, H. H., León Vega, C., Solución conceptual del comportamiento de una probeta agrietada sometida a cargas de fatiga para determinar su vida remanente. *Científica*, Año 1, No. 5, pp. 39-42, 1997.

Urriolagoitia Sosa, G., Durodola, J. F. y Fellows, N. A., Determination of Tensile and Compressive Stress-Strain Curves from Bend Tests, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 1-2, pp. 133-138, 2004.

Urriolagoitia-Sosa, G., *Analysis of prior strain history effect on mechanical properties and residual stress in beams*, Thesis Ph D, Oxford Brooks University, pp. 129-142, 2005.

Urriolagoitia-Sosa, G., Durodola, J. F. y Fellows, N. A., Determination of residual stress relaxation by the use of the crack compliance method, *Proceeding of the 14th International Materials Research Congress*, IMRC 2005, Cancún, México, pp. 35, 2005.

Urriolagoitia-Sosa, G., Durodola, J. F. y Fellows, N. A., Effect of strain hardening on the residual stress distribution in beams determined using the crack compliance method, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 42, No. 2, pp. 115-121, 2007

Urriolagoitia Sosa, G., Durodola J. F., López Castro, A. y Fellows N. A., A method for the simultaneous derivation of tensile and compressive behaviour of materials under Bauschinger effect using bend test, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 220, No. 10, pp. 1509-1518, 2006.

Wadsley, N., *Residual stress analysis*, M. Sc. Thesis, Oxford Brookes University, pp. 12, 1994.

Wilson, O. V., Magnetic properties, internal strains and the *Bauschinger* effect in metals, *Nature*, London, Vol. 170, pp 30-31, 1952.

Wolley, R. L., *Bauschinger* effect in some face-centred and body-centred cubic metals, *Philosophical Magazine*, Vol. 44, No. 353, pp 597-618, 1953.

Wolley, R. I., *Rep. Conf. On Str. Of Solids, Bristol*, London Phys. Soc., 1958.

Zhang, X. D., Ginter, T. J., Cornell, B., Evans, D. J. y Fraser, H. L., Effect of stretching on the strength (*Bauschinger's* effect) of Ti-6Al-2Cr-2Mo-2Sn-2Zr alloy, *Journal of advanced material*, Vol. 32, No. 1, pp 34-38, 2000.

Zeng, D. y Xia C., A Modified *Mroz* Model for Springback Prediction, *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp 293-300, 2007.