



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CIENCIA Y TECNOLOGIA

**POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA**

**“ANÁLISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES APLICANDO
EL MÉTODO DEL CONTORNO DESPUES DE LA
EXPANSION EN FRÍO EN ALUMINIO 6061T6”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN LA
ESPECIALIDAD DE
DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS MECÁNICOS**

PRESENTA

ING. VIELKA ESTIBALIS CABRERA CUEVAS

Santiago de Querétaro, Qro., Mayo del 2017





CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la alumna **Vielka Estibalis Cabrera Cuevas**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Análisis de esfuerzos residuales aplicando el método del contorno después de la expansión en frío aluminio 6061T6**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestra en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de **Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los veinticinco días del mes de Abril del año dos mil diecisiete.

Dr. Carlos Rubio González
Director



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado de la alumna **Vielka Estibalis Cabrera Cuevas**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Análisis de esfuerzos residuales aplicando el método del contorno después de la expansión en frío aluminio 6061T6**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestra en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de **Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los veinticinco días del mes de Abril del año dos mil diecisiete.

Dr. Luis del Llano Vizcaya
Presidente

Dr. Carlos Rubio Gonzales
Secretario

Dr. José Alfredo Manzo
Vocal

Resumen

En el presente proyecto de investigación se comparó la distribución de esfuerzos residuales aplicando un grado de expansión en diferentes direcciones del barreno (una expansión UE, dos expansiones mismo sentido 2EMS, dos expansiones direcciones opuestas 2EDO, tres expansiones mismo sentido 3EMS, tres expansiones direcciones opuestas 3EDO) a una probeta de aleación de aluminio 6061-T6, se analizó cada uno de los casos de expansión midiendo sus esfuerzos residuales. Después de una triple expansión en frío con la finalidad de obtener una homogeneidad de los esfuerzos residuales en el espesor de la probeta a fin de disminuir la magnitud de esfuerzos efectivo para tener una uniformidad del esfuerzo en la zona del barreno.

El estudio comprendió utilizar la técnica método del contorno y experimentalmente, el contorno de la superficie libre se mide después del corte y analíticamente la superficie de un modelo libre de esfuerzo queda de nuevo a su forma original. Después se obtuvieron las mediciones correctas a lo largo del plano de corte. Se hizo el análisis en elemento finito (FEM) utilizando software Ansys y Matlab para obtener los datos precisos al estudio a realizar. La herramienta de Matlab como apoyo al suavizado de datos dados por la máquina de coordenadas CMM y para después ser trasladado al programa de Ansys y nos presente los esfuerzos para cada caso en particular.

Agradecimientos

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que con su soporte científico y humano han colaborado en la realización de este trabajo de investigación. Quiero agradecer a la institución que ha hecho posible la realización del trabajo presentado en esta memoria de tesis por la ayuda económica brindada, por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México), por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). gracias por la ayuda y confianza en mí depositada.

Muy especialmente a mi tutor y director de tesis al Dr. Carlos Rubio Gonzales, por la acertada orientación, el soporte y discusión crítica que me permitió un buen aprovechamiento en el trabajo realizado, y que esta tesis llegara a un buen término.

Especial mención las personas cuya colaboración ha sido importante en el desarrollo de este trabajo, Lic. Cruz Alicia Márquez Tecua coordinación administrativa de control escolar, Dr. Salvador Francisco Acuña Guzmán gerencia académica, M.E. Bertha Elisa Velasco Sánchez coordinación de pedagogía; a todos ellos y a su experiencia y coordinación para organizar los seminarios nacionales y ofrecer la oportunidad de una evaluación diferente, me llevo la experiencia de algo nuevo e innovador, lo mejor de un centro de investigación como lo es CIDESI. En especial mención a mis revisores Dr. Jose Alfredo Manzo Preciado, Dr. Luis del Llano Vizcaya, a todos ustedes por darle seguimiento a mi tema y el apoyo recibido al revisar mi tesis, dejando un poco de su experiencia plasmada en ella.

De mis compañeros de maestría, agradezco Carla Abril Meneses Nochebuena, Samantha Lidia Narváez Granados, Alejandra Calvo Ávila, Perla Itzel Alcántara, Juana Bautista, Samuel Martínez, Francisco Riezu, Cristel Gonzalez, Viridiana Gómez, Eduardo Jose, Yazmin Parra Torres, Mariela López, Elsa Ramos Carcaño, Osvaldo Rubio López, y a todos aquellos que me apoyaron en mi recuperación de mi accidente, lo tengo presente al recibir mucho de todos y me mostraron el poder de la unión.

Dedicatoria

Dedico mi tesis de manera muy especial al ser supremo que llamamos Dios su luz nos mueve y motiva hacia donde queremos llegar cada uno.

Dedico de manera especial a mi hija Ayari que con el embarazo tenerla en el inter del posgrado y su nacimiento fue una hermosa experiencia que compartimos juntas, estuvo presente en las practicas, materias, aprendimos una de la otra y es mi más grande tesoro.

Les dedico a mis padres Manuel Cabrera Chamorro y Lucia Cuevas Zarco por haberme formado como la persona que soy y mostrarme que la persistencia es la mejor recompensa de la vida. A mis hermanos Abigail Saraf y Manuel por depositar en mí su confianza, amor y motivación.

A todos ellos gracia por estar presentes en mi vida y sobre todo en las mejores experiencias que es esta tesis.

Índice

Resumen	i
Agradecimientos	ii
Dedicatorias	iii
Índice	iv
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	ix
Nomenclatura	x
Letras griegas	xi
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Definición del problema	4
1.4 Justificación	4
1.5 Objetivos	5
1.6 Hipótesis	5
1.7 Estado del Arte	6
1.8 Organización de la tesis	8
CAPITULO 2. ESFUERZOS RESIDUALES Y SUS MEDICIONES.	9
2.1 Definición de los esfuerzos residuales	10
2.2 Generación de los esfuerzos residuales	13
2.3 Generación de los esfuerzos residuales por expansión en frio	13
2.4 Métodos de medición de esfuerzos residuales	17
CAPITULO 3. INTRODUCCION AL METODO DEL CONTORNO	20
3.1 Principio del método del contorno	21
3.1.1 Principio de Bueckner	22
3.2 Principio de medición	22
3.2.1 Principio de superposición en el método del contorno	22
3.2.2 Implementación practica	24

3.2.3 Hipótesis y aproximaciones	25
3.3 Procedimiento de mediciones practicas	29
3.3.1 Planificación de la medición	29
3.3.2 Sujetadores	29
3.3.3 Corte	30
3.4 Medición de la superficie	32
3.5 Procesamiento de datos y suavizado	33
3.5.1 Alinear el marco de coordenadas	33
3.5.2 Se filtra el ruido	34
3.6 Construcción del modelo FEM	36
3.6.1 Traslado al FEM	37
3.6.2 Informar los resultados	37
3.6.3 Evaluación del esfuerzo residual	38
CAPITULO 4. MATERIALES Y METODOS EXPERIMENTALES.	39
4.1 Material de preparación y caracterización	40
4.1.1 Material	40
4.1.2 Prueba de tensión	40
4.1.3 Predicción de los esfuerzos residuales	40
4.1.4 Expansión en frio en la placa	41
4.1.5 Corte	42
4.2 Superficie medida	43
4.2.1 Modo de medición	44
4.3 Procesamiento de datos de la superficie	45
4.3.1 Reducción del ruido	46
4.3.2 Alineación de la superficie	47
4.3.3 Suavizado por splines	47
4.1 Modelado	53
4.1.1 Detalles de modelado	53
4.4.1.1 Mallado	54
4.4.1.2 Propiedades del material	55

4.4.1.3 Condiciones de frontera	55
4.4.1.4 Creaciones de la plataforma de entrada	56
4.4.1.5 Ejecución del trabajo	56
4.4.1.6 Extracción, visualización y análisis de resultados	57
4.5 Resultados	58
CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	59
5.1 Resultado de simulación ANSYS de la expansión en frio de un agujero	60
5.2 Discusión de resultados	67
5.3 Comparación de resultados FEM y método del contorno	72
5.4 Análisis de regresión múltiple en probetas	74
5.5 Resumen	78
CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.	80
6.1 Conclusiones	81
6.2 Trabajo futuro	82
APÉNDICES	83
APENDICE A. FE Modelado de la expansión en frio	84
1.1 Modelado	84
1.1.1 FEM geometría	84
1.1.2 Condiciones de frontera	85
1.1.3 Simulación paso a paso	85
1.1.4 Mallado	87
1.1.5 Elementos de modelado elástico-plástico	87
1.2 Elementos de entrada ANSYS	88
APENDICE B código fuente matlab nega_positivo.m	89
APENDICE C código fuente matlab suavizados_pos.m y suavizados_neg.m	90
APENDICE D código fuente matlab datos_ansys.m	97
BIBLIOGRAFÍA	100

Índice de Figuras

Figura	Título	Pág.
2-1	Esfuerzos residuales tipo I, II y III en diferente escala de longitud sobre de auto equilibrio o balance.	11
2-2	Diferentes procesos que causan esfuerzos residuales ya sea macro, micro o intergranular. (Schajer & Ruud, 2013)	12
2-3	Expansión en frio.	14
2-4	Distribución de esfuerzo residual tangencial ideal en el agujero.	15
2-5	Curva esfuerzo-deformación	16
3-1	Ilustración esquemática del principio de Bueckner.	21
3-2	Técnica para el principio de medición.	23
3-3	Efecto de las partes cortadas.	26
3-4	Ilustra el error “protuberancia” la que causa sesgo en los resultados del método del contorno	27
3-5	Sujeción de la pieza.	28
3-6	Refinando del ajuste superficie va aumentando el número de nudos para los splines suavizado. La parte superior (a) muestra la cuadrícula más gruesa, y el medio (b) e inferior (c) muestran rejillas finas consecutivamente.	35
4-1	Curva esfuerzo-deformación de la aleación de aluminio 6061-T6 de la Tabla 4.1.	41
4-2	Cuarta parte de la pieza aplicando expansión en frio.	42
4-3	Corte de la pieza expandida en frio.	43
4-4	Sección transversal mapeado de la pieza de corte a medir.	44
4-5	Datos crudos.	50
4-6	Plano y-z	51
4-7	Suavizados contra datos crudos.	51
4-8	Plano x-z	52
4-9	Final de datos crudos contra datos suavizado.	52
4-10	Elemento solido 3D.	55

4-11	Modelo utilizado de las líneas que se tomaron para obtener los esfuerzos residuales tangenciales.	58
5-1	UE parte superior 5% y 14.5%	60
5-2	UE parte medio 5% y 14.5%	61
5-3	UE parte inferior 5% y 14.5%	62
5-4	Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE 5% parte superior.	63
5-5	Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE 5% parte media.	64
5-6	Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE 5% parte inferior.	65
5-7	Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE14.5% parte superior.	66
5-8	Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE 14.5% parte medio.	66
5-9	Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE 14.5% parte inferior	67
5-10	Bulto de 0.38mm provocado UE 5%	68
5-11	Bulto de 0.51mm provocado por 2EDO 5%	68
5-12	Bulto de 0.38mm provocado por 2EMS 5%	69
5-13	Bulto de 0.54mm provocado por 3EDO 5%	69
5-14	Bulto de 0.35mm provocado por 3EMS 5%	69
5-15	Bulto de 0.97mm provocado por UE14.5%	70
5-16	Bulto de 0.95mm provocado por 2EDO 14.5%	71
5-17	Bulto de 0.89mm provocado por 2EMS 14.5%	71
5-18	Bulto de 1.13mm provocado por 3EDO 14.5%	72
5-19	Bulto de 0.86mm provocado por 3EMS 14.5%	72
5-20	Comparación de los perfiles de esfuerzo residual a diferentes profundidades determinadas por el método de contorno y los obtenidos por una simulación FE. Única Expansión en frío de 5%	73
A-1	(a) Discretización en 2-D de elementos finitos de la muestra. (b) campo de tensión residual (von Mises) después de la expansión en frío de un agujero expandido al 5%	86
A-2	Figura A-2 Elemento PLANE82	88

Índice de tablas

Tabla 3.1 Guía de tamaños de cable sugerido.	31
Tabla 4-1. Composición química de la aleación aluminio 6061-T6.	40
Tabla 4-2 Metodología de experimentación aplicada a los especímenes.	41
Tabla 4-3 Descripción de la máquina de coordenadas (CMM)	45
Tabla 5-1 Comparación de esfuerzos obtenidos de FEM y método del contorno.	74
Tabla 5-2 ANOVA para 5% diferentes grados de expansión.	75
Tabla 5-3 Evaluación de los coeficientes de regresión individuales 5%.	76
Tabla 5-4 ANOVA para 14.5% diferentes grados de expansión.	77
Tabla 5.5 Evaluación de los coeficientes de regresión individuales 14.5%.	77

Nomenclatura

GE%	grado de expansión ecuación (2.1)
D	diámetro del balón
d	diámetro del barreno
100%	porcentaje de expansión
$\sigma_x^B(0, y, z)$	superficies libres en B, ecuación (3.1)
$\sigma_x^A(0, y, z)$	superficies libres en A
$\sigma_x^C(0, y, z)$	superficies libres en C
$\sigma_x^B(0, y, z) = 0$	superficies libres en plano B ecuación (3.2)
UE	una sola expansión
2EMS	dos expansiones mismo sentido
2EDO	dos expansiones direcciones opuestas
3EMS	tres expansiones mismo sentido
3EDO	tres expansiones direcciones opuestas
mm	milímetro
FEM	modelo de elemento finito
Matlab	(abreviatura de matrix laboratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M)
spap2	Aproximación spline de mínimos cuadrados en Matlab.
GPa	Giga pascales $\times 10^9$
MPa	Mega pascales $\times 10^6$
ASTM	(American Society for Testing and Materials);
Von misses	$s_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(s_{xx} - s_{yy})^2 + (s_{yy} - s_{zz})^2 + (s_{xx} - s_{zz})^2 + 6(s_{xy}^2 + s_{yz}^2 + s_{xz}^2) \right]^{1/2}$ <p>.....ec(A.1)</p>

Letras griegas

γ	límite de proporcionalidad
σ_y	punto de fluencia
σ_u	esfuerzo último
$\sigma(x)$	superficie x
σ_R	esfuerzo de distribución ideal
σ	esfuerzos de tensión
Mm	micrómetro
$\tau_{xy=0}$	tensión tangencial plano xy
τ_{xz}	tensión tangencial xz

Capítulo 1

Introducción

En el presente capítulo se dará una breve introducción de la expansión en frío y de lo que se quiere alcanzar con este proyecto, se hará una breve referencia de los antecedentes a este tipo de investigación y resultados perseguidos por otros autores y los beneficios que encontraron.

1.1 Introducción

Los sujetadores, juntas de pasador y otros elementos que tienen orificios son utilizados ampliamente en aeronaves industriales. Estas juntas pueden ser susceptibles a fallo por fatiga debido a las concentraciones de esfuerzos localizados provocadas por la presencia de los agujeros. Para poder suprimir este problema, en proceso de expansión en frío se ha considerado como un método que mejora la vida del componente al mitigar el efecto creado por la concentración de esfuerzo circunferencial de compresión. En este proceso, el agujero se expande radialmente al introducir un balín metálico como se explica en el capítulo 2, el agujero se expande plásticamente y al pasar completamente el balín a través del espesor de la probeta, el agujero se somete a una recuperación elástica parcial, creando esfuerzos residuales de compresión circunferenciales. [1]

Muchos estudios fueron previamente publicados respecto a la predicción de esfuerzos residuales por la expansión en frío desarrollando la simulación en 2D para analizar la expansión radial uniforme de orificios de sujeción. [2]

Por lo general estos esfuerzos son deseables ya que ayuda a contrarrestar el efecto de la concentración de esfuerzos localizada y por lo tanto a reducir la probabilidad de daños por fatiga. [2]

Algunos autores simularon este proceso en diferentes métodos de elemento finito para analizar los esfuerzos producidos por la expansión en frío a varios grados de expansión y existen diferentes métodos para analizarlos y en este proyecto se consideró el método del contorno es una técnica reciente para medir las tensiones residuales normales a una superficie de corte. Inventado por el primer en 2001, que consiste en cortar una muestra; la medición de la distorsión en esa superficie de corte que surge debido a la relajación de tensiones, y calculando se subraya estaban presentes los esfuerzos residuales antes de cortar.[3]–[6]

En el presente proyecto se realizó la expansión en frío y se midieron los esfuerzos residuales producidos por el método del contorno, al ser un método simple en la práctica y el laboratorio de CIDESI cuenta con este equipo especializado para realizar dichas mediciones, ya que es la

razón por la que se realizó esta combinación), para lo cual se aplica la habilidad del investigador, la técnica y los requisitos de instrumentación, así como el acceso a una buena instalación de alambre EDM. Un instrumento de medición CMM de superficie son los elementos adecuados para realizar un buen trabajo, aunque existe una considerable cantidad de trabajo necesario para limpiar la nube de puntos medidos, alinear y el conjunto de datos superficiales para realizar el ajuste e ingresarse al paquete de elemento finito.

Los objetivos presentados para esta tesis al evaluar los esfuerzos producidos por la expansión en frío a dos tipos de expansión diferentes tuvieron que ser desarrollado a una serie de aplicaciones diferentes por la iteración del balón que mostraron campos de esfuerzos de diferente gradiente y se espera contribuir a que este método ayude a las personas a adaptar esta técnica a lo que desean investigar y de este modo hacer ver la técnica como un método sencillo fácil de manipular.

1.2 Antecedentes

Muchos elementos estructurales están unidos por orificios, los efectos que causan alrededor de los orificios de sujeción pueden ser perjudiciales según la aplicación, es necesario conocer las respuestas de las partes unidas por un orificio, cómo actúa este ante una carga constante. Los orificios, juntas u otro tipo de sujeción que implique concentradores de esfuerzos pueden ser susceptibles a fallo por fatiga y son el inicio de grietas por fatiga debido a esfuerzos localizados provocadas por la presencia de los agujeros. Se han desarrollado algunos métodos para aumentar la vida útil de componentes utilizando diferentes técnicas y hasta el momento se ha reportado como la expansión en frío al ser una técnica sencilla y que se necesita bajos costos para su aplicación.

1.3 Definición del problema

El presente trabajo pretende responder y aportar información sobre los beneficios de la expansión en frío y su aplicación en aleación de aluminio 6061-T6 de los efectos producidos por la concentración de esfuerzos de un orificio mediante el análisis por método del contorno. Al ser un proceso que utilice balines y brocas comerciales para la expansión en frío que implique una técnica sencilla y de bajos recursos económicos como la aplicación de una lectura sencilla para los esfuerzos producidos que pueden facilitar al investigador a acercarse a una conclusión certera y veraz.

1.4 Justificación

Las estructuras unidas por pernos pasados por orificios son elementos muy requeridos en la industria automotriz y la aeroespacial, por lo que se requiere un estudio, en relación con los efectos de orificios hechos con brocas de tamaño convencional y ocupar balines milimétricos de acero de uso comercial con las dimensiones existentes para la expansión en frío, al pasar el balín de 6.3mm en diferentes direcciones y manteniendo la misma expansión, a modo de evitar falla prematura alrededor de este en probetas de aleación de aluminio 6061-T6. Un estudio que permita analizar los esfuerzos residuales producidos por la esfera metálica.

1.5 Objetivos

El objetivo general de este proyecto es el siguiente:

- Examinar el efecto que provoca la expansión de 5% y 14.5% aplicado en un agujero en probetas de aleación de aluminio 6061-T6. En particular se investiga la iteración de la esfera aplicada en diferentes direcciones.

Los objetivos específicos son:

- Determinar y comparar el efecto de la expansión en frío de 5% en 5 diferentes direcciones manteniendo la misma expansión, induciendo a forzar el balón aplicando el método del contorno.
- Determinar y comparar el efecto de la expansión en frío de 14.5% en 5 diferentes direcciones manteniendo la misma expansión, induciendo a forzar el balón aplicando el método del contorno.
- Evaluar los esfuerzos residuales generados por la expansión en frío (5% y 14.5%) en UE, 2EDO, 2EMS, 3EDO, 3EMS aplicando el método del contorno para las probetas de aluminio 6061-T6.

1.6 Hipótesis

Es posible obtener una mejora en los esfuerzos residuales producidos por la expansión de 5% al de 14.5% grados de expansión.

1.4 Estado del arte

El proceso de la expansión en frío se ha estudiado desde hace 25 años al ser una técnica estándar, es un método que se induce esfuerzos residuales circunferenciales beneficiosos, al inducir un balín en un agujero, la presencia de esfuerzos residuales de compresión inhibe la propagación de la grieta y crecimiento de la misma como lo analizó en su investigación [7] donde aplico 4% de expansión en aleación de aluminio y observo un cambio positivo en los esfuerzos residuales en el contorno del agujero. La expansión en frío la cual es lograda mediante la inserción de un balín desde la entrada a la salida del plato del agujero removiéndose desde el otro lado (salida de la cara) el grado de expansión está definida por la relación (ver ecuación 2.1, capítulo2). [8] De este modo se logra la formación de esfuerzos residuales al ser un proceso que mecánicamente permite incrementar plásticamente el diámetro del agujero. Durante la expansión en frío una capa delgada del material alrededor del agujero deforma una fase plástica, mientras la región permanece elástica. Este fenómeno seguirá para formar una zona con esfuerzos residuales de compresión alrededor del agujero que es balanceado con la zona lejana que tiene la superficie del agujero de esfuerzos residuales de tensión. [9]

[10] Hizo un método analítico y numérico de las distribuciones de esfuerzos residuales (usando análisis de elementos finitos). Los resultados de estos métodos los compararon entre sí para la determinación de la exactitud del método numérico y encontraron similitud de resultados entre ambos métodos y el comportamiento plástico-perfectamente elástica de material se obtiene con dos criterios de rendimientos Tresca y von Mises.

Del mismo modo [11] analizó la expansión en frío de la aleación de aluminio 7075-T6 en una placa de espesor de 6.35mm posteriormente lo simuló en ABAQUS. Las distribuciones de tensiones derivadas del FEA y los resultados del análisis de la fractura de las pruebas de fatiga juntos proporcionaron información importante respecto del lado de la entrada del mandril como parte crítica y confirmaron la existencia de un límite eficaz de resistencia a la fatiga.

Investigaciones que se han hecho sobre el estudio en general de la distribución de esfuerzos residuales han contribuido a tener nuevos análisis de expansión en frío. Estudios previos [8] han incorporado estudios sobre la distribución después de (UE) expansión simple o generar una doble expansión en frío y de esta manera disminuir la magnitud de esfuerzo efectivo en el espesor del barreno para tener una homogeneidad de esfuerzos en la zona del barreno. Sin embargo, muchos de los autores anteriormente mencionados han utilizado el Elemento finito (MEF) para la analizar la distribución de los esfuerzos residuales, a diferencia de [12] que presentó una teoría para el uso de superposición para determinar las tensiones residuales internas seleccionando el método del contorno y luego midió las tensiones restantes por otros métodos. Este enfoque abre la posibilidad de combinar las ventajas de diferentes técnicas para obtener mediciones a la compresión sin precedentes.

El método del contorno se basa en la teoría de superposición. Una teoría se presentó para el uso de superposición para determinar las tensiones residuales internas seccionando con el método de contorno y luego medir tensiones restantes con otros métodos.

Al realizar esta investigación se consideró el método del contorno al ser una técnica usada por varios autores [3], [12], [13] al ser una forma de medición ideal para obtener mediciones con respecto al corte del plano e ideal para conocer los esfuerzos residuales.

Una vez aplicada esta técnica, por el método del contorno se determinaron la tensión de esfuerzos residuales, el cual está basado en la mecánica de sólidos y experimentalmente consiste en cortar cuidadosamente una muestra en dos piezas que es la resultante de la deformación debida a la distribución de esfuerzos residuales a través de un análisis que implica un modelo de elemento finitos.[6], [13]. El método del contorno es útil para diferentes campos de esfuerzos residuales complejas que son difíciles de mapear usando un punto convencional de técnicas de medición inteligentes. [13]

1.8 Organización de la tesis

En el Capítulo 1 se indaga en definir de lo que han realizado algunos autores sobre el proceso de la expansión en frío y método del contorno, también se da una breve explicación de lo realizado en este trabajo.

En el Capítulo 2 se detallada de los esfuerzos residuales producidos por la expansión en frío y como se miden estos esfuerzos con varias técnicas y haciendo mención del método del contorno.

En el Capítulo 3 se dio una explicación breve del principio del método del contorno como una técnica de medición de esfuerzos residuales en piezas, además se incluye la explicación del método en una forma detallada.

Para el Capítulo 4 se da una explicación detallada del desarrollo experimental que se llevó a cabo para obtener las propiedades mecánicas de la expansión en frío desde el material utilizado, selección de los parámetros de los procesos hasta la realización de las pruebas y para medir esfuerzos residuales por el método del contorno para que sea lo más preciso posible, la importancia de seguir el proceso, se muestran los resultados experimentales obtenidos, con sus comentarios y conclusiones.

Capítulo 5 se muestran los resultados de la simulación FEM en ANSYS del método del contorno, la comparación del agujero abierto por análisis de elemento finito y método del contorno para expansión del 5%. Se asocia estos análisis por regresión múltiple de las probetas en sus diferentes grados de expansión de 5% y 14.5%. para el siguiente paso dar las conclusiones y los comentarios del trabajo realizado.

Capítulo 6 se da una breve conclusión de los resultados obtenidos a lo largo del proyecto para analizar los efectos y dar una mejor propuesta para trabajos futuros.

Capítulo 2

Esfuerzos residuales y sus mediciones

En este capítulo se hace referencia al origen y naturaleza de los esfuerzos residuales en componentes de ingeniería y hace mención de las técnicas destructivas y no destructivas. Indaga a definición sobre el método del contorno que especifica en este capítulo.

Los esfuerzos residuales son una consecuencia de iteraciones entre tiempo, temperatura, deformación y micro estructura. Los desarrollos de los esfuerzos residuales son por varios factores como: la conductividad térmica, la capacidad calorífica, la expansión térmica, módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la plasticidad y relaciones de fase. Todos los procesos de manufactura inducen esfuerzos residuales en partes mecánicas, los cuales afectan la resistencia a la fatiga y a la fractura.

Los metales que se utilizan comúnmente en la manufactura de diversos productos constan de muchos cristales individuales orientados al azar (*granos*); por lo tanto, las estructuras metálicas no son monocristalinas sino *policristalinas* (“muchos cristales”). Cuando una masa de metal fundido comienza a solidificar, los cristales empiezan a formarse independientemente unos de otros en varios lugares dentro de la masa líquida; tienen orientaciones al azar y sin relación unas con otras. Después, cada uno de ellos crece en una estructura cristalina o grano. El número y los tamaños de los granos desarrollados en una unidad de volumen del metal dependen de la *velocidad* a la que tiene lugar la *nucleación* (etapa inicial de formación de cristales).

El *tamaño de grano* influye de modo significativo en las propiedades mecánicas de los metales. A la temperatura ambiente, por ejemplo, el tamaño grande del grano se asocia en general con resistencia, dureza y ductilidad bajas. Los granos grandes, particularmente en las hojas metálicas, también provocan una superficie de apariencia rugosa después de estirar el material. El tamaño de grano también se puede determinar comparándolo con un estándar. El número del tamaño de grano de ASTM (American Society for Testing and Materials); para este tema no es importante detallar el tamaño del grano.

2.1 Definición de los esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales son los esfuerzos que existen en la parte mecánica sin que exista la aplicación de cargas externas (incluyendo gravedad) u otras fuentes de esfuerzos tales como gradientes térmicos. [14]

Las tensiones residuales son aquellas tensiones que permanecen una vez que un cuerpo está en reposo y en equilibrio con su entorno (sin carga mecánica) [3]

Pueden ser ampliamente caracterizados, por las escalas de longitud sobre la que el auto de estrés se equilibra, en tres grupos [3] que se muestra esquemáticamente en la Figura 2-1.

- Tipo I: varían en distancias que son grandes en relación con la micro estructura del material. (se profundiza la explicación en la parte de abajo).
- Tipo II: varían de grano a grano en el material (explicación dada en la parte de abajo).
- Tipo III: variar dentro de un solo grano. (se explica en la parte de abajo).

La primera **tipo I**, se extiende sobre varios granos de material como se observa en la figura 2-1 y son causadas por muchos procesos de fabricación tales como la forja, soldadura, fundición y laminación (véase la Figura 2-2 para algunos ejemplos). Ellos pueden introducirse durante el servicio por el desgaste o daño, o introducidos intencionalmente durante el procesamiento. Tensiones residuales de tracción ya sea de micro o macro dimensiones estructurales afectando negativamente a la vida de fatiga y causando estrés corrosión.[14]

La de **tipo II** la llamamos micro esfuerzos estructurales, actúan sobre una distancia de un grano o una parte podemos observarlo en la figura 2-1 y esta puede ocurrir entre diferentes fases y tiene características físicas diferentes o entre partículas incrustadas, tales como inclusiones en la matriz.

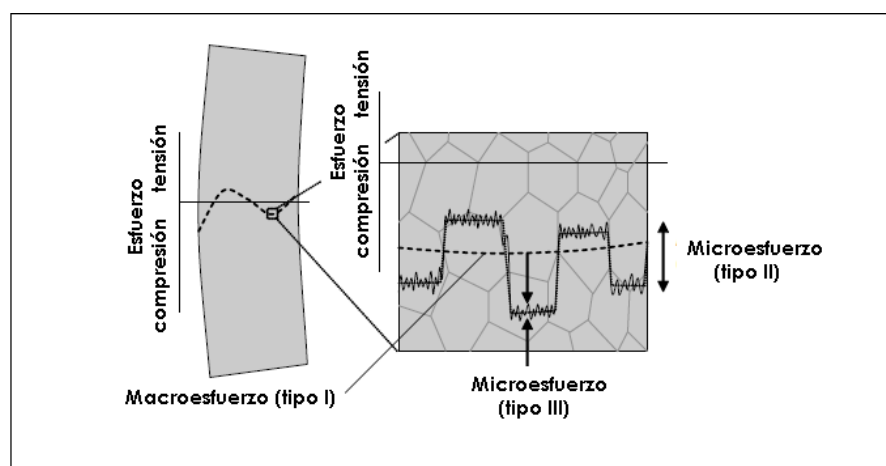


Figura 2-1 Esfuerzos residuales tipo I, II y III en diferente escala de longitud sobre de auto equilibrio o balance.

La tercera forma **tipo III**, es sobre varias distancias atómicas dentro del grano y se equilibra en una parte pequeña del grano como lo observamos en la figura 2-1. [14]

Los esfuerzos residuales de tensión son generalmente considerados como problemático, afectando negativamente a la vida de fatiga y causando corrosión bajo tensión y la propagación de grietas en materiales. Las tensiones de compresión, por otra parte, pueden tener un efecto beneficioso en estas áreas, mediante la inhibición de la nucleación de grietas y el crecimiento. Todas estas tensiones generadas por diferentes causas como lo muestra la figura 2-2.

Las tensiones residuales son difíciles de predecir debido a su dependencia de muchos procesos de fabricación (y la vida de servicio anterior), por lo que la caracterización y medición son importantes. Si son desconocidos, pueden causar fallo cuando se combina con tensiones aplicadas.[15], [16]

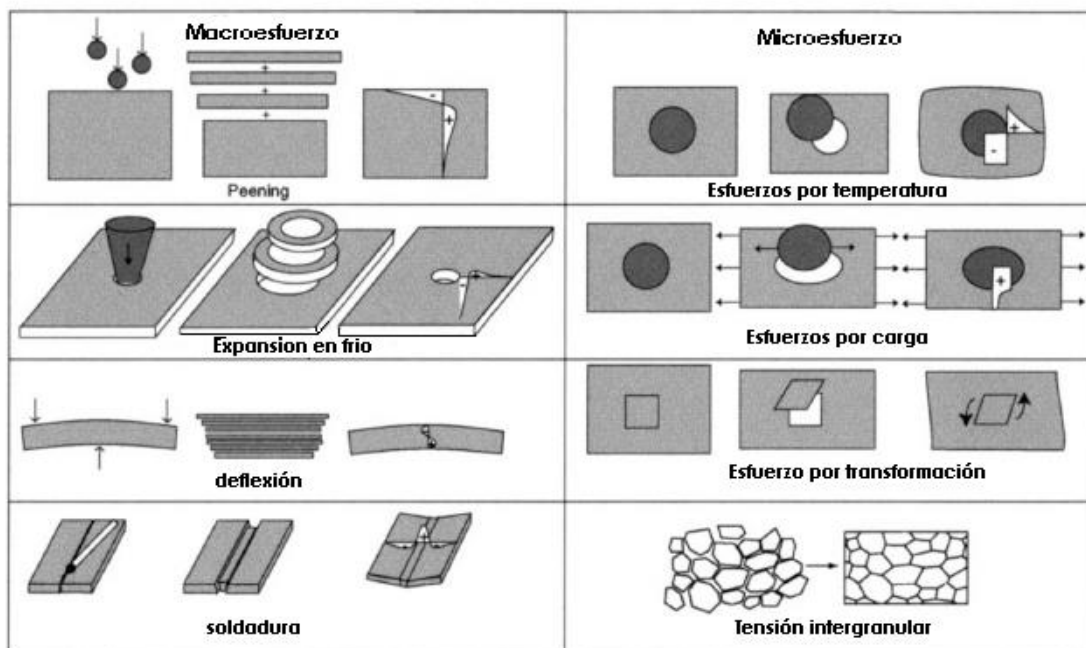


Figura 2-2 Diferentes procesos que causan esfuerzos residuales ya sea macro, micro o intergranular.[16]

2.2. Generación de los esfuerzos residuales.

En general los esfuerzos residuales pueden ser inducidos por:

1. Flujo plástico no homogéneo bajo la acción de tratamiento externo (*láser shock treatment, shot-peening, Autofrettage, Martilleo*).
2. Deformación Plástica no homogénea durante calentamiento o enfriamiento no uniforme (ordinariamente temple y moldeo de plásticos).
3. Deformación estructural de trabajado de metales (Tratamiento térmico).
4. Heterogeneidad de orden químico o cristalográfico (nitrurado o carburizado).
5. Varios tratamientos superficiales (Recubrimientos por *CVD, PVD* y *plating* de cromo y níquel).
6. Diferencias en el Coeficiente de Expansión e incompatibilidades mecánicas de los diferentes componentes de los compuestos (compuestos con una matriz metálica, orgánica y recubrimientos cerámicos).

2.3 Generación de esfuerzos residuales por expansión en frío

El proceso de la expansión en frío se ha estudiado desde hace 25 años al ser una técnica estándar, es un método que se induce esfuerzos residuales circunferenciales beneficiosos, al inducir un balín en un agujero, la presencia de esfuerzos residuales de compresión inhibe la propagación de la grieta y crecimiento de la misma.

La expansión en frío es una técnica la cual es lograda mediante la inserción de un balín desde la entrada a la salida del plato del agujero removiéndose desde el otro lado (salida de la cara) el grado de expansión está definida por la relación. [8]

$$GE\% = \frac{(D-d)}{d} * 100\% \dots \dots \dots \text{ec. (2.1)}$$

El método de la expansión en frío como se ilustra en la figura 2-3, el balín de gran tamaño es forzado a pasar a través del orificio haciendo que el diámetro del orificio se expanda a la dimensión del balín. Si la cantidad de interferencia (la diferencia entre los diámetros del balín y del agujero) es relativamente pequeño, entonces la expansión ocurre dentro del rango elástico de la manera que el agujero vuelve a su tamaño original y condición de no esfuerzo en el material. Sin embargo, si la cantidad de interferencia diametral es suficientemente grande para causar un esfuerzo localizado produciendo entonces el agujero no volverá completamente a su tamaño original. [17]

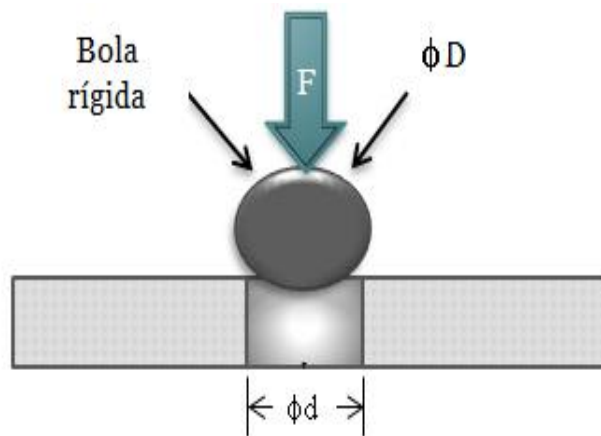


Figura 2-3 Expansión en frío

La distribución de la tensión tangencial también no vuelve a la condición de no esfuerzo e idealmente varía a esfuerzo de compresión en el borde del agujero de cambiar a tensión lejos del agujero (manteniendo así el equilibrio) como se muestra en la Figura 2-4. Este estado ideal es lo que se obtiene, a partir de la aplicación de la hipótesis.

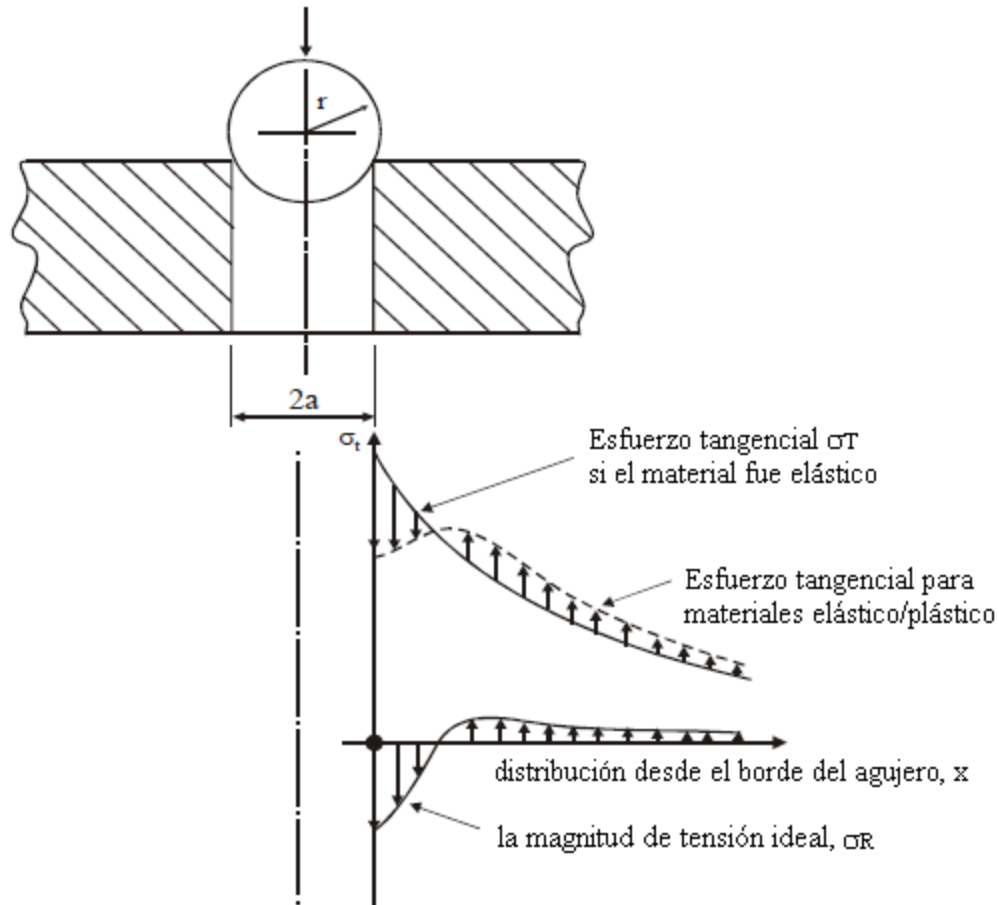


Figura 2-4 Distribución de esfuerzo residual tangencial ideal en el agujero.

Esto predice que la magnitud de tensión residual resultante, σ_R es la diferencia entre la tensión tangencial real que se produce durante la expansión (basado en la relación tensión / deformación actúa como idealizado, ver Figura 2-4) y el esfuerzo 'hipotético' que se habría alcanzado si el material se comportase elásticamente. Esta diferencia se muestra en los ejes revisados en la Figura 2-5. En general, se encontró, que si mayor es la cantidad de interferencia, mayor es la región del rendimiento que se produce y cuanto mayor sea la magnitud de la tensión residual de compresión en el borde del agujero.[17]

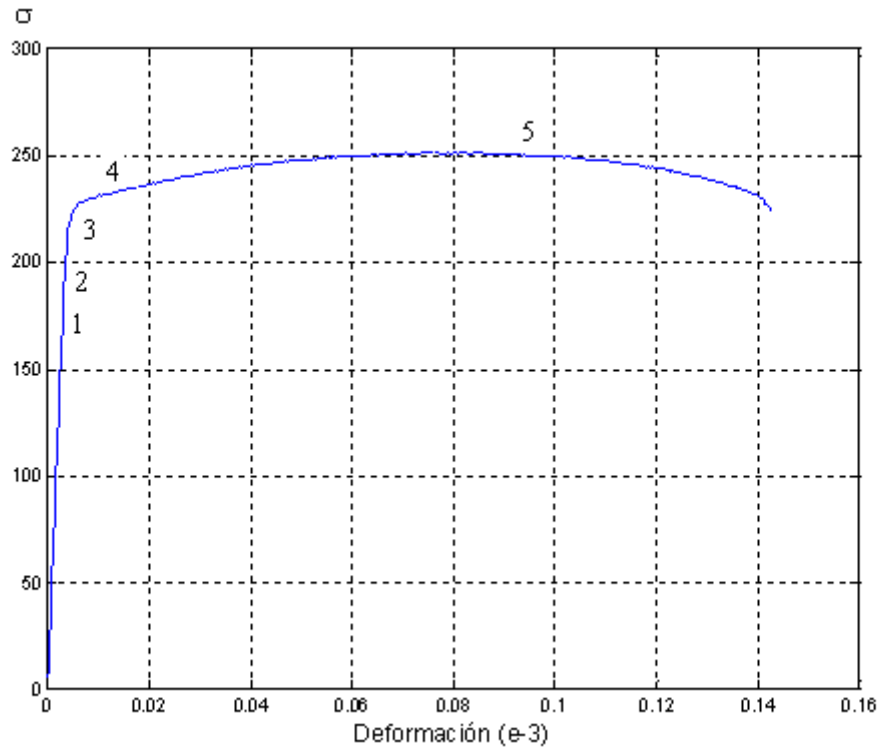


Figura 2-5 Curva esfuerzo-deformación.

La figura 2.5 muestra las propiedades importantes de un material que debemos conocer cuando se estudia el comportamiento mecánico de un material. La curva empieza en el origen 0 a punto 1, 2 y continúa como una línea recta hasta que llega al punto 3. Más adelante se encuentra en un punto γ donde la curva disminuye su pendiente, se hace más horizontal e incluso puede bajar ligeramente. Después de continuar aproximándose horizontal a una distancia, la curva sigue de punto 4 hasta 5 para después decrecer hasta alcanzar a un punto donde ocurre la fractura. Cada uno de estos puntos, o segmentos de la curva, recibe el nombre, límite de proporcionalidad del material. Justamente después de este límite de proporcionalidad (en γ), la curva disminuye su pendiente y el material se deforma con muy poco o ningún aumento de la carga. El material fluye o se deforma plásticamente en este punto. El esfuerzo para el cual comienza esta fluencia, se llama punto de fluencia σ_y . Puede notarse que el límite de proporcionalidad y el punto de fluencia están muy próximos. [18]

Posteriormente, la curva incrementa su pendiente y alcanza un valor máximo 5. El esfuerzo correspondiente a este punto (σ_u) se llama el esfuerzo último del material, que es el máximo esfuerzo que el material es capaz de soportar. Después de la curva desciende hasta el punto donde ocurre una fractura.

Cada día se hace más común el analizar los esfuerzos en el intervalo elástico o intervalo plástico. En un material es el intervalo de esfuerzos, dentro del cual el material permanece elástico; es decir, regresa a su forma original después de descargarlo. Tomando en cuenta que el diagrama de esfuerzo-deformación unitaria también indica la rigidez de un material.

Al conocer el diagrama de esfuerzo-deformación nos da una referencia de comportamiento del material a estudiar y como referencia en la expansión en frío podemos analizar los esfuerzos residuales generados por este método.

En la expansión en frío de este modo se logra la formación de esfuerzos residuales al ser un proceso que mecánicamente permite incrementar plásticamente el diámetro del agujero. Durante esta técnica de expansión en frío se genera una capa delgada del material alrededor del agujero y se deforma como una fase plástica, mientras la región permanece elástica. Este fenómeno seguirá para formar una zona con esfuerzos residuales de compresión alrededor del agujero que es balanceado con la zona lejana que tiene la superficie del agujero de esfuerzos residuales de tensión [9]. El efecto beneficioso derivado de este proceso de expansión en frío, depende de la magnitud y distribución de la tensión residual que rodea a cada orificio. [11]

2.4. Métodos de medición de esfuerzos residuales.

Hay un gran número de métodos experimentales para determinar las tensiones residuales en un componente de ingeniería. Estos se pueden dividir en técnicas destructivas y no destructivas, como se discute seguidamente en esta tesis. Las primeras se basan en la destrucción del estado de equilibrio de los esfuerzos residuales en un componente mecánico.[19] De esta forma, los esfuerzos residuales pueden medirse a través de su relajación. Sin embargo, solo es posible

medir las consecuencias de la relajación y no su propia relajación (desplazamientos, fractura y deformación). En muchos casos, el cambio en la deformación se selecciona como el parámetro a estudiar aplicando el siguiente procedimiento:

1. Creación de un nuevo estado de esfuerzos por maquinado o remoción de capas.
2. La detección del cambio en el esfuerzo local por la medida de deformaciones o desplazamientos.
3. El cálculo de esfuerzos residuales es una función de la medición de deformaciones, usando teoría de elasticidad (aproximaciones mediante cálculos analíticos o mediante el Método del Elemento Finito).

Algunas de las diferentes técnicas destructivas [15], [16], [19], [20] son las siguientes:

- Método del agujero ciego
- Técnica de *Ring Core*
- Método de Deflexión de Vigas
- Método de Seccionado (Método de la Complianza)
- Método del contorno

La segunda serie de técnicas consiste de métodos no destructivos. Estas técnicas se basan en las relaciones entre los parámetros físicos o cristalográficos y los esfuerzos residuales. Algunas de las diferentes técnicas no destructivas [15], [16], [19], [20]son las siguientes:

- Método de Difracción de Rayos X
- Método de Difracción de Neutrones
- Métodos Ultrasónicos
- Métodos Magnéticos.

En las técnicas destructivas está especificado el método del contorno que es un método que se explicara en el siguiente capítulo, tomando de lado las otras técnicas solo las mencionaremos, pero no es necesario indagar en ello ya que no es importante para esta tesis.

De acuerdo a la bibliografía [15], [16], [19], [20] se realiza un estudio que denota que el método del contorno es más preciso y para este estudio en particular se obtuvo más beneficios. Es más

factible de realizar, puedo manipularlo, me da ms precisión, controlo los esfuerzos residuales inducidos en mi probeta.

Otra ventaja del método del contorno es al aplicar esfuerzos al material y al cortar para medir sus esfuerzos es más precisa la medición con la máquina de coordenadas CMM en los puntos de medición, se puede elegir una malla fina y cerrada para obtener datos más precisos en lugares donde es importante encontrar datos a evaluar, agregando la facilidad que se tiene al obtener la nube de puntos y poderlos suavizar para ingresarlos como nodos al FEM Ansys, este dato se detalla en los capítulos siguientes.

Capítulo 3

Introducción al método del contorno

En este capítulo introducirá al lector en el principio del método del contorno como una técnica de la medición de esfuerzos residuales en piezas o componentes de ingeniería. En que se incluirá explicaciones del método su aplicación en la práctica por medio del método experimental. A continuación, se agrega información de dicho método en el apéndice A para dar una visión general del método.

3.1 Principio del método del contorno

El método del contorno se propuso y se desarrolló por Prime [5]. En la que su aplicación se basa en el principio de Bueckner, este establece que:

"Si un cuerpo agrietado sujeto a la carga externa o desplazamientos prescritos en el límite de fuerzas aplicadas a las superficies de la grieta para cerrar la grieta en conjunto, estas fuerzas deben ser equivalente a la distribución de la tensión en un cuerpo no agrietado de la misma geometría sujetos a la misma carga externa ".

Este principio se deriva de la superposición y se asocia como la representación esquemática de la figura 3-1. En donde Bueckner está demostrando la equivalencia de los factores de intensidad de tensiones resultantes de la carga externa en un cuerpo con las que resultan de la tracción de la cara agrietada. [3]

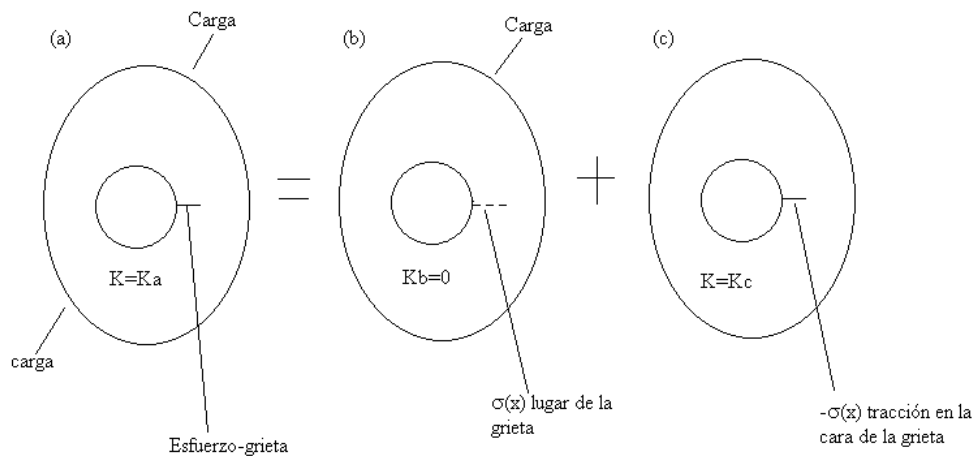


Figura 3-1 Ilustración esquemática del principio de Bueckner.

En el método del contorno, el ‘cuerpo roto’ es una muestra bajo prueba, en donde se corta la pieza a la mitad para quedar muy similares entre ambas como sea posible a la rotura frágil. No

hay carga externa, pero si los desplazamientos en la ‘superficie de la grieta’ se puede medir, y los esfuerzos se requieren para calcular los desplazamientos, estos son presentes antes que aparezca la ‘grieta’ los esfuerzos residuales en la muestra original.

3.1.1 Principio de Bueckner

La teoría del método del contorno es una variación en el principio de superposición de Bueckner. Fue el mismo Bueckner que presentó esta teoría relevante en 1958 [3] discutido más afondo en publicaciones posteriores. En cualquier caso el principio de Bueckner es indispensable para trabajar en mecánica a la fractura y es de gran ayuda cuando se usa apropiadamente.

3.2 Principio de medición

El principio de superposición del método del contorno se asemeja como lo que se presenta en la figura 3-2 una breve explicación en imagen en 3D para una placa de gran espesor en el que longitudinalmente el esfuerzo varía a través del espesor de la placa.[21]

3.2.1 Principio de superposición en el método del contorno

En el paso A es la parte no alterada y los esfuerzos residuales que se desea determinar. Posteriormente en el paso B, la parte se ha reducido a dos en el plano $X=0$ y ha deformado a causa de los esfuerzos residuales liberados por el corte.

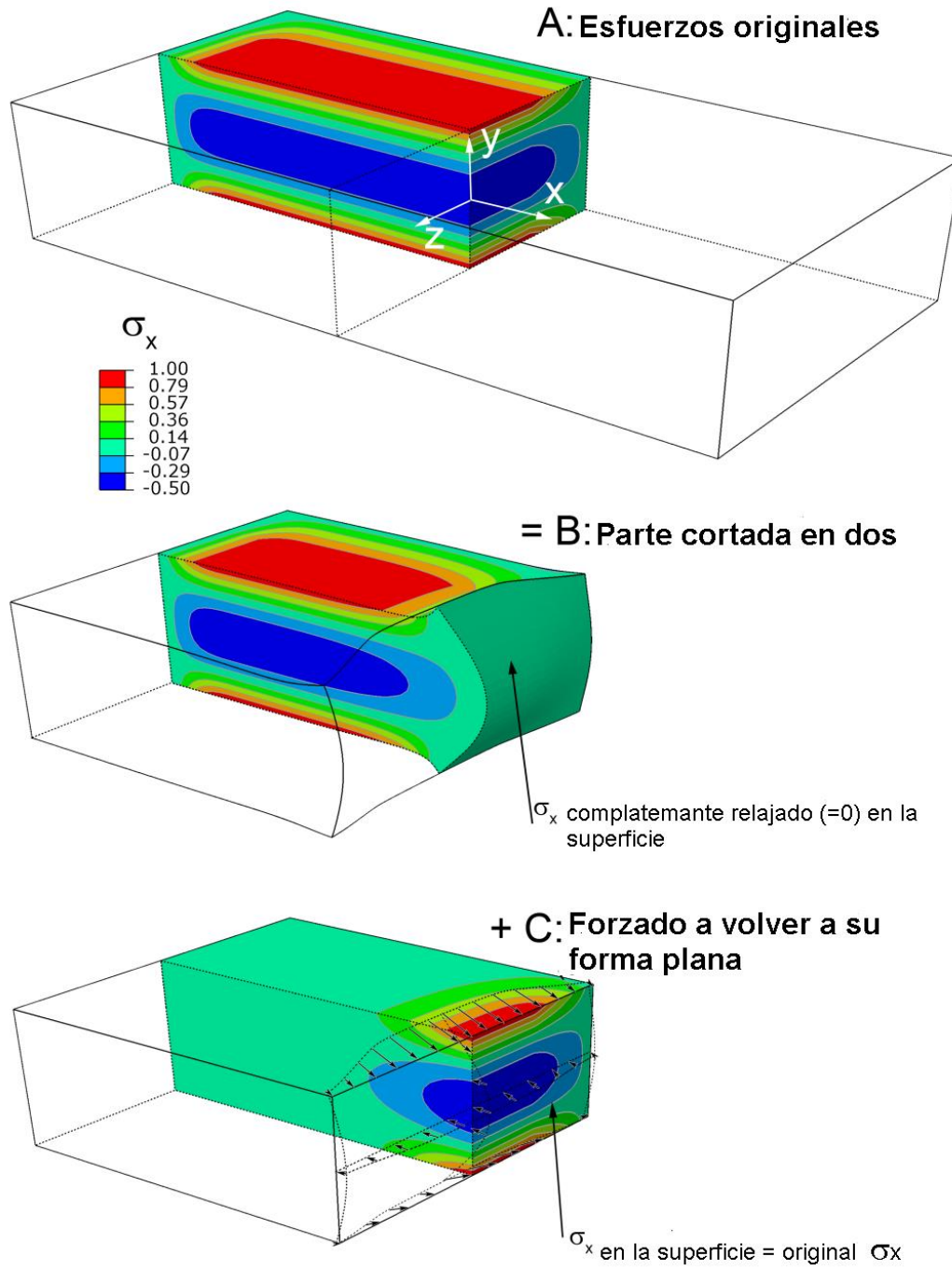


Figura 3-2 Técnica para el principio de medición.

En C, la superficie de corte deformada es forzado a volver a su forma original y el cambio resultante en la tensión es determinado. La superposición en el estado de tensión en B con el cambio de la tensión de C da los esfuerzos residuales originales en toda la parte xz son cero en la superficie libre en B, el principio de superposición describe y determina de manera única la distribución original de los esfuerzos residuales en el plano de corte, es decir, en $x=0$ en A. [5], [6], [21]

Cabe mencionar que la medición de los desplazamientos transversales no es experimentalmente posible, se requieren algunas suposiciones y aproximaciones razonables. [13]

Dado que las tensiones normales a las superficies libres en B deben ser cero en la ec.(3.1). En el paso C por sí mismo dada las tensiones correctas en el plano de corte:

$$\sigma_x^B(0, y, z) = \sigma_x^A(0, y, z) + \sigma_x^C(0, y, z) \quad (3.1)$$

Donde σ se refiere al esfuerzo de tensiones y los superíndices a las diversas etapas especificadas en la figura 3-2. Debido a σ_x , τ_{xy} y τ_{xz} son cero en la superficie libre en B, el principio de superposición determina de forma única la distribución original de los esfuerzos residuales en el plano de corte, es decir que en $x=0$ en A. [5]

Si se pudiera medir los desplazamientos en el plano de la superficie de corte, esta teoría estaría completa, Sin embargo, la medición de los desplazamientos transversales no es posible experimentalmente, y se requieren algunas suposiciones y aproximaciones razonables. A grandes rasgos es lo que se trata de la implementación estándar del método del contorno.

3.2.2 Implementación práctica

La correcta aplicación del principio de superposición permite determinar los esfuerzos residuales normales experimentalmente a lo largo del plano del corte. Experimentalmente, se mide (mapa de la altura de la superficie) de contorno después del corte (en B figura 3-2.), la medición de contorno de la superficie proporciona información sobre el desplazamiento en (x) solamente en dirección normal. Por lo tanto, la aproximación de la etapa C forzará elásticamente

la superficie posterior a su configuración original en la dirección X solamente dejando los desplazamientos transversales sin restricciones. Todo esto detallado en un modelo de elemento finito FE, el estado de la superficie libre $\tau_{xy}=0$ y τ_{xz} . [5], [6], [13]

El método puede identificar el contorno normal de las tensiones σ_x y omitir las tensiones tangenciales en τ_{xy} y τ_{xz} . A pesar de la presencia de cualquier esfuerzo de corte y desplazamientos transversales, solo se promedian los contornos medidos en una parte de las dos mitades para determinar el esfuerzo normal en σ_x . [12]

El esfuerzo de corte dados a conocer en el plano de corte que afecta a los desplazamientos de superficie anti-simétricamente. De este modo, cuando el promedio es computado, los efectos de desplazamiento transversales y esfuerzos de corte se cancelan y los resultados son los desplazamientos de la superficie debido a la liberación de la tensión residual normal a la superficie. [5], [12]

El principio de superposición combinado permite determinar las tensiones residuales normales experimentalmente a lo largo del plano de corte:

$$\sigma_x^B(0, y, z) = 0 \quad (3.2)$$

\Rightarrow

$$\sigma_x^A(0, y, z) = \sigma_x^C(0, y, z)$$

3.2.3 Hipótesis y aproximaciones

Liberar los esfuerzos elásticos y esfuerzos libres en el proceso de corte.

El principio de superposición supone que el material se comporta elásticamente durante la relajación de la tensión residual y que el proceso de eliminación del material no introduce tensiones de magnitud suficiente para afectar a los desplazamientos medidos.

A partir de la superficie plana en el análisis

La forma deformada del cuerpo no se modela antes de realizar analíticamente el paso C como lo muestra la figura 3-2. Debido a que las deformaciones son bastantes pequeñas y el análisis es lineal, el punto de partida para este paso es una superficie plana.

La parte es simétrica respecto al plano de corte

Promediando los contornos para eliminar los efectos del esfuerzo de corte requiere suposición, que la rigidez es la misma en los dos lados del corte. Sin duda alguna cuando una parte simétrica se corta con precisión a la mitad. En la práctica, la parte solo necesita ser simétrica dentro de la región donde la rigidez tiene un efecto significativo en las deformaciones de la superficie de corte por no más de 1.5 veces de la distancia característica de saint Venat.

La distancia característica es a menudo el espesor de la pieza, pero se toma de manera más apropiada como la dimensión transversal máxima, La parte es simétrica en un estudio de FE se puede utilizar para analizar posibles errores.

Errores de corte anti-simétricas promedio de distancia

En la figura 3-3 muestra el promedio de los dos contornos y elimina cualquier error causado por anti simetría y efectos de corte que las causan en un punto abajo en un lado y un punto alto de acoplamiento en el otro lado.[4]

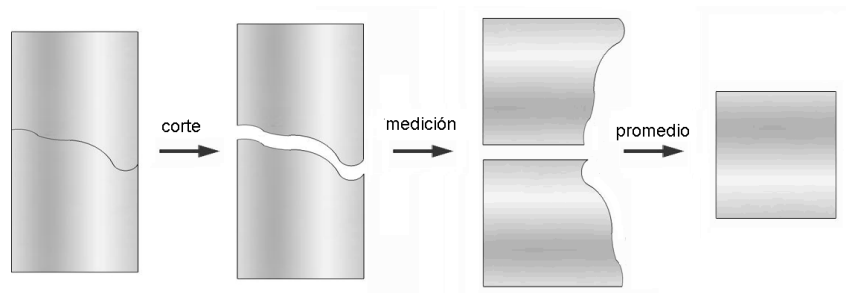


Fig. 3-3 Efecto de las partes cortadas.

Las causas de errores principales de anti-simetría son por el efecto de corte como lo ilustra la figura 3-3 la parte en movimiento durante el corte como las tensiones se relajan y la parte se deforma por efecto de las probetas cortadas torcidas.

Errores asimétricos irregularidades de corte.

Hay otros errores que causan efectos simétricos y asimétricos que no lo hacen promedio. La mayoría de estos errores son relativamente sencillos y se pueden evitar con una buena práctica experimental. Irregularidades de corte local, tales como roturas de cable o de tamaño (diámetro del hilo) y se elimina por el proceso de suavizado de datos.[4], [5]

Manualmente a partir de los datos brutos

Un cambio en la anchura de corte EDM varía para diferentes materiales. Un cambio en el espesor de la pieza (en dirección del cable) puede causar en A “inclinada” puede usualmente evitarse mediante el uso de electroerosión por hilo.

El error protuberancia comúnmente conocido por ese nombre, se produce cuando el corte elimina una anchura constante del material cuando se mide en relación con el estado del cuerpo antes de cualquier corte.[13]

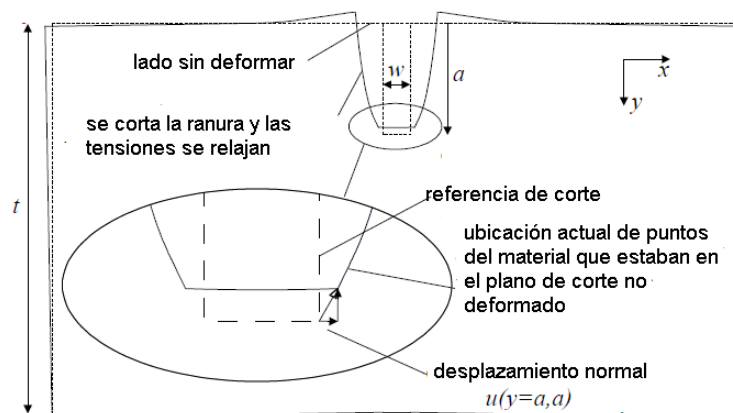


Figura 3-4 Ilustra el error “protuberancia” la que causa sesgo en los resultados del método del contorno.

Desde el punto de vista teórico, el principio de superposición fig. 3-4 en el que los puntos en la superficie de corte se elimina una anchura constante del material cuando se mide en relación con el estado del cuerpo antes de cualquier corte.

Desde el punto de vista teórico, el principio de superposición figura 3-2 en el que los puntos de la superficie de corte se vuelven en la etapa c en sus ubicaciones originales. El promedio de los contornos de la superficie de no regresar a su estado original como lo muestra la figura 3-4. Por lo tanto, forzando la superficie cortada a la etapa C no devolverá el material a su ubicación original que causa un error en el que se calcula la tensión. El efecto protuberancia se produce cuando el estado de tensión en el corte y es causada por la deformación de la muestra conforme el corte avanza y se puede minimizar de forma segura con la sujeción de la pieza como se puede apreciar en la figura 3-5. Vale la pena señalar que este efecto escala con la anchura de corte. Otra causa del efecto protuberancia es cuando el material en la punta del corte se deforma antes de cortar. El comportamiento lineal elástico será reflejado en precisión en el modelo FE que se utiliza para calcular el esfuerzo. [4]

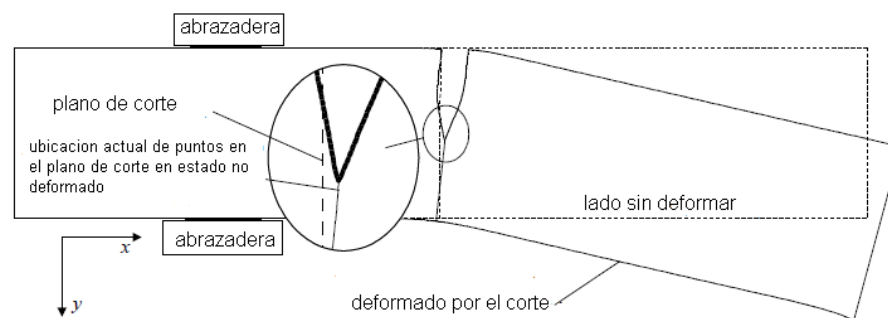


Figura 3-5 Sujeción de la pieza.

Es notable reconocer que la fijación de la pieza y hacer el corte son los aspectos experimentales más importantes del método del contorno y una mala técnica conducirá a un aumento de errores. Con el método del contorno se puede obtener al menos resultado preciso e incluso con esfuerzos muy altos.

3.3 Procedimiento de mediciones prácticas

En el procedimiento de mediciones prácticas es de notable interés que el técnico analice cada paso a seguir de la experimentación a fin de lograr resultados fiables y certeros en el momento de analizarlos.

3.3.1 Planificación de la medición

Es útil para pasar tiempo a planificar la medición desde el principio para evitar problemas potenciales, a través de una lista de pasos experimentales y pasos analíticos a considerar la ejecución de cada tarea.

Fijar la pieza y hacer el corte, es el aspecto experimental más importante del método del contorno porque una mala técnica dará lugar a un aumento en los errores. La medición de la superficie es relativamente fácil por la precisión del palpador del CMM. El método del contorno al ser una técnica especializada es apropiado para ciertas mediciones en concreto pero como todo método es requerido solo para ciertas piezas, ya que si se requiere las mediciones de las tensiones cerca de la superficie es sugerido usar otro método, o más sin embargo, no es considerado como ideal en piezas pequeñas o campo de esfuerzos residuales localizadas ya que será muy complicado por medio de este método y es bastante útil para simular un experimento antes de tiempo.

3.3.2 Sujetadores

Es importante que cuando se realice el corte, la pieza debe ser limitada de movimiento porque las tensiones se relajan durante este proceso. Tal restricción requiere la sujeción de ambos lados del corte a un accesorio rígido, lo ideal es una mejor restricción de sujeción. Se debe de tener

cuidado de no sujetar demasiado la pieza a manera que induzca esfuerzo de tensión. Algunos enfoques se han utilizado para tratar de obtener la máxima restricción, incluida la moderación dejando un ligamiento del material sin cortar.[13] Otros estudios han reportado resultados cuando el único espécimen se sujetó únicamente de un solo lado, y esto conduce a diferentes medidas de contorno en las dos mitades después del corte. [22] Después de un promedio de los contornos, los resultados a menudo son buenos, pero a veces es evidente el error protuberancia.[23] Por lo que se debe tener mucho cuidado al momento de usar los sujetadores, debido a lo anteriormente mencionado.

3.3.3 Corte

El EDM es el mejor método de corte, un cable se carga eléctricamente con respecto a la pieza de trabajo y la erosión por chispa provoca la eliminación del material. El corte es sin contacto, mientras que el maquinado convencional causa las deformaciones plásticas localizadas de las grandes fuerzas de contacto.

La pieza es sumergida en temperaturas controlada con agua desionizada durante el corte, cuyos efectos térmicos son mínimos. El mecanismo de control del alambre puede alcanzar una precisión posicional de fracción o de micra, es especialmente en corte recto. Desde el error protuberancia aumenta con el ancho de corte, se recomienda un diámetro de alambre más pequeño cuando sea posible. Un alambre demasiado pequeño puede romperse durante el experimento y esto nos conduce a tiempos largos de corte injustificados.

En la tabla 3.1 muestra algunas orientaciones generales relativas a diámetro del alambre para ciertos espesores, por lo que la tabla solo debe ser utilizada como punto de partida para la selección del tamaño del cable. Estos espesores dependen de la orientación durante el corte y a veces se elige un tamaño de cable más grande para asegurar un corte más robusto. [13], [24]

Tabla 3.1 Guía de tamaños de cable sugerido.

Espesor del espécimen	EDM diámetro del alambre
<15mm	100 μ m
10mm-100mm	150-200 μ m
>50mm	250 μ m

También dependerá del material de la muestra y la máquina EDM y los mejores resultados se han obtenido usando de electroerosión de latón. Aunque ningún estudio previo ha informado sobre el uso de otros cables, tales como los de tungsteno o de latón recubierto de zinc.[5], [13]

Hay que tomar en cuenta que la calidad del corte es un factor principal en la determinación de la calidad de los resultados del método de contorno. Además de seleccionar el tamaño del cable y tipo apropiado, es de suma importancia seleccionar las condiciones de corte que produce un corte que representa, tan cerca como sea posible para obtener un proceso de corte ideal. En general, es aconsejable determinar el ajuste de corte en la maquina a utilizar. Si los ajustes de cote son de potencia inferior a un ajuste de corte convencional (que son optimizados para la velocidad) estos están destinados a proporcionar un mejor acabado superficial y mínima refundición. [21]

Los parámetros de corte y ajustes son específicos de la máquina y normalmente estos equipos cuentan con una serie de configuraciones de ajustes de corte incluidas en la unidad de control. La configuración típica para el corte de un material específico con un cable definido incluirá la configuración de un solo corte áspero y luego de tres o cuatro pasadas de acabado secuencialmente. El ajuste para el primer o segundo corte son amenudeo la mejor opción para el método del contorno, debido a los ajustes a menudo resulta en rotura el cable o a cortes extremadamente lentos. Para cortar la pieza, configurarlo en el EDM y fijarlo con abrazadera ya que estas entran en equilibrio térmico con el agua en el tanque EDM. Alinear la trayectoria de corte para cortar a través de toda la sección transversal en una sola pasada. A la finalización del corte, las partes deben ser retirados del EDM, teniendo cuidado de preservar la integridad de las superficies de corte, y después se enjuaga para eliminar los residuos sueltos que puedan haber adheridos a la superficie.

3.4 Medición de la superficie

Las superficies creadas por el corte se deben medir, la forma de la superficie de contorno tendrá una magnitud de pico valle en el orden de las 10 a 100 micras. Una medición exacta de esta exactitud requiere equipos de metrología de precisión. La máquina de medición de coordenadas (CMM) es un dispositivo útil y ampliamente disponible para este propósito. Las dos mitades creadas por el corte EDM debe ser colocados en el CMM con su superficie de “corte” expuesta (en este caso el término de “corte” se utiliza para describir la superficie donde el esfuerzo residual se lleva acabo). El dispositivo de metrología debe programarse para adquirir puntos sobre toda la superficie con un punto de separación suficiente para resolver la forma del campo de desplazamiento. Es posible primero medir las piezas con una separación gruesa para estimar la forma del campo de desplazamiento y luego medir de nuevo con una fina separación que es suficiente para capturar los detalles necesarios. Una rejilla simple uniforme de 50x50 puntos es un punto de partida para una CMM con un lápiz de rubí 2mm. Es deseable que la aguja debe ser relativamente grande porque suavizara algunas características de la superficie de EDM “bruto” o conocidos también como datos “crudos”. Cuando sea posible en ambas superficies se medirán con la misma ubicación de los puntos de medición, teniendo en cuenta que una dirección de coordenadas se revertirá cuando se comparan las dos superficies. Dado que las mediciones de CMM se representan aproximadamente de uno por segunda frecuencia, las medidas pueden tardar varias horas. Por lo tanto, la estabilidad de temperatura es importante y el CMM debe aislarse de las fluctuaciones térmicas. Además, es útil para la alineación posterior de las dos superficies para recoger una serie de puntos trazando el perímetro de cada “corte” de la superficie mediante la colocación de la punta CMM ligeramente por debajo de la superficie y tocas los lados de la parte.[3]

La medición del contorno de la superficie es relativamente fácil y nunca ha sido el factor limitante para las mediciones ya sea por medio de escáner óptico sin contacto ya que este método se ha utilizado ampliamente en otros estudios, considerando que el CMM muestra resultados de esfuerzos relativamente idénticos.[19], [25]

Por otro lado, los escáneres ópticos proporcionan generalmente más ruido en sus resultados porque capturan la rugosidad del corte EDM. Por lo tanto, se requiere puntos de medición significativamente más densas. Sin embargo, los escáneres ópticos pueden medir puntos con mayor rapidez, lo cual también puede reducir los problemas de fluctuación térmica. Generalmente los escáneres ópticos no pueden medir en la dirección transversal, lo que significa que no se puede medir directamente la parte experimental; [6] presentan información más detallada sobre las mediciones y análisis relacionados con el método del contorno.

3.5 Procesamiento de datos y suavizado

A menudo los datos de medición de las superficies de corte adquieren una lista en forma de cuadrícula, por los algoritmos y procedimiento de los dispositivos de medición, la cual es una de las razones principales que una superficie métrica analítica debe ser apto para los datos medidos y poder tener una herramienta como un buen interpolador que pueda estimar la ubicación de los datos medidos en forma de los puntos nodales del modelo. La segunda razón para el montaje es eliminar, o reducir el ruido inherente en el proceso físico de la medición. [3]

3.5.1 Alinear el marco de coordenadas

Las dos superficies de datos, una de cada lado del “corte”, deben estar alineados a la misma coordenada del marco de tal manera que los puntos antes de cortar deben coincidir entre ambas superficies. Las dos superficies de corte aparecen como imágenes de espejo, así que una de las direcciones de coordenadas cartesianas necesita ser invertido con el fin de conectar los puntos correspondientes en las dos superficies. Se puede apreciar en la figura 3-3 cuando la sección inferior se ha invertido a registrarse con la superficie de la sección superior. Si se necesita una mayor armonización entonces es necesario para llevar a cabo el cuerpo rígido y la rotación en el plano de la superficie de corte para fijar ambas superficies en el mismo marco de coordenadas.

Por ejemplo, si la superficie medida está orientada aproximadamente en el plano xy y yz entonces es necesario traducir una superficie en Y y Z y también girar sobre el eje X hasta que se sienta encima de la otra superficie (esto sucede cuando se ve a lo largo del eje x). La traza perímetro es bastante útil para esta alineación. Otra forma del cuerpo rígido (x -dirección) y rotaciones (alrededor de Y y Z) no afecta los resultados y se puede ignorar. Sin embargo, para adaptarse a cada superficie a un mejor plano H ajuste yz y restar esto de los datos (que lo hará a cada superficie cerca del plano x y yz). Después de la alineación de la superficie, la traza perímetro debe acoplarse de los conjuntos de datos. La traza perímetro se puede utilizar para apoyar la construcción modelo FE.[13]

3.5.2 Se filtra el ruido

Los datos de medición de superficie contendrán algún “ruido” que es el resultado de error de medición y la rugosidad de la superficie de corte EDM. El ruido aleatorio y la rugosidad no son causadas por los esfuerzos residuales, sin embargo, afectarán significativamente el esfuerzo calculado porque la tensión depende de la curvatura del campo de desplazamiento y la alta frecuencia contenido tiene una alta curvatura. Por esta razón, es importante para eliminar el ruido de los datos preservando al mismo tiempo la forma global de la superficie (que es el resultado del esfuerzo residual).

Un proceso de dos pasos se puede utilizar para preparar los datos de desplazamientos para el cálculo del esfuerzo. En primer lugar, los valores extremos deberán eliminarse del conjunto de datos. Los valores atípicos se pueden identificar por el trazado de la superficie de datos y mirando visualmente para cada punto que son significativamente lejos de la forma general de la superficie.

En segundo lugar, un método debe ser empleado para extraer la forma de la superficie, mientras la eliminación de la rugosidad y el ruido. Esto se realiza generalmente ajustando los datos a una superficie lisa. Hay paquetes de software comerciales disponibles para la aplicación directa está

incluida MATLAB que tiene una spline Toolbox ®. Suavizado ha sido el más utilizado. [5], [26]

En la mayoría de las formulaciones requiere que los datos de puntos deben estar en una cuadrícula rectangular ya que puede requerir el procesamiento adicional a la red de datos, como se observa en la figura 3-6 en el inciso a) muestra la cuadrícula más gruesa en el contorno medido como se había indicado anteriormente “datos crudos” y en el inciso b y c se muestran más fina la rejilla; que es la forma ideal de suavizar los datos de contorno.[21]

Alternativamente los datos pueden estar en forma de una superficie lisa definida de forma continua, tal como una bivalente de serie Fourier. [16], [25] Un criterio para suavizar datos ha sido reportado por varias investigaciones previas. [21], [23]

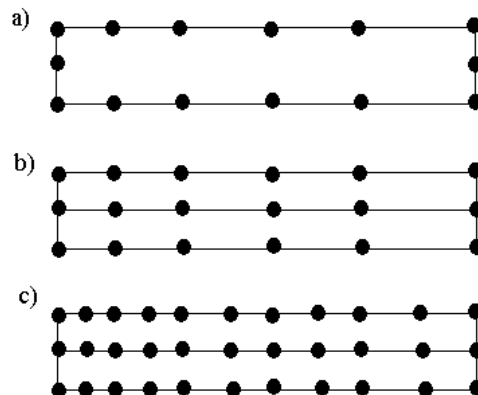


Figura 3.6 Refinando del ajuste superficie va aumentando el número de nudos para los splines suavizado. La parte superior (a) muestra la cuadrícula más gruesa, y el medio (b) e inferior (c) muestran rejillas finas consecutivamente.

Cualquier método que filtra la rugosidad de la superficie, mientras capturar con precisión la forma general del contorno debe ser aceptable. Aun no existe un método robusto y objetivo para la selección de la cantidad optima de suavizado. A menudo, se selecciona el ajuste de media cuadrática (RMS) frente al aumento de densidad de nudos spline. El ajuste en el desajuste RMS comienza a aplanarse se selecciona ya que a menudo representa el punto de transición entre

exceso de montaje y ajuste bajo las características importantes de los datos. [21], [27] La mejora de selección del suavizado podría ser posible mediante la estimación de la incertidumbre de las tensiones y recogiendo el ajuste que minimiza la incertidumbre. [21]

3.6 Construcción del modelo FEM

En un modelo de elemento finito se representa la mitad de la pieza de la parte original, por ejemplo, la pieza principal a usar que es una de las mitades de las dos piezas que se ha sido cortado por la mitad, debe construirse sobre la base de mediciones de la pieza. Si está disponible, la traza perímetro de la sección transversal de un CMM representa un útil punto para el modelo inicial. Si la sección transversal es relativamente simple, entonces la herramienta para la medición lineal utilizando unas pinzas como una alternativa útil. Generalmente el modelo de elemento finito debe representar la sección transversal de la parte en el plano de medición y debe tener una rigidez similar con relación a los desplazamientos que se aplica en la medición de la superficie característica de la parte lejos del plano de medición es poco probable influir en este y puede ser ignorada. En el modelo de elemento finito se debe generar una malla, es útil un mayor refinamiento en la malla cerca de los altos gradientes en la superficie de desplazamiento y cerca de los bordes de la sección transversal de medición. De alguna manera, esto puede ayudar a producir una solución convergente de manera eficiente, y en este caso los elementos Hexaédricos (ladrillos) de primer o segundo orden reducido de integración son los preferidos para mallar.

Para la densidad de la malla en la selección de elemento es de 50 por 50 la de forma de cruz. El tamaño del elemento puede ser relajado para crecer grande lejos del plano de medición sin afectar los resultados residuales, como se explicará más afondo en el siguiente capítulo.

Una vez terminado, una lista de nodos en la superficie cortada donde las condiciones de límite de desplazamiento serán aplicadas y se deben generar junto con sus coordenadas.

3.6.1 Traslado al FEM

Los desplazamientos finales, obtenidos de la nube de puntos dados por la máquina de coordenadas CMM, después del promediado y filtrado, deben invertirse sobre la superficie normal e interpolado/extrapolado a las ubicaciones del nodo en la superficie dada por la pieza hecha en elemento finito como condiciones de contorno de desplazamiento.[13]

Solo el desplazamiento en la dirección normal de cada nodo a la superficie de corte debe ser especificado, y debe ser para todos los nodos de la superficie de corte. Las condiciones de contorno deben ser aplicadas al modelo para frenar el cuerpo rígido en movimiento. Tal disposición de mínima restricción asegura que es el calculado del mapa de esfuerzo residual que satisface el equilibrio, y es la razón de que movimientos de cuerpo rígido del contorno medido no afecta a los resultados. Las tensiones resultantes en el plano de corte en la dirección normal son los “resultados” de la medición de contorno. Estos representan los esfuerzos residuales originales en la parte antes del seccionamiento.

3.6.2 Informar los resultados

Los profesionales deben informar los detalles suficientes para que un lector experto pueda interpretar los resultados. Las descripciones del material de la pieza deben ser detalladas e incluyen el calor del estado del tratamiento del límite elástico. La descripción del corte debe incluir el diámetro del alambre EDM y material, los ajustes de corte, la velocidad del corte y las roturas del cable u otros problemas.

Descripción de la configuración de superficie debe incluir los detalles de los instrumentos, la densidad medida y las condiciones térmicas a lo largo de la duración de la medición. Los resultados de los mapas de contorno de la superficie deben ser trazados o descrito incluyendo el intervalo de cada lado de pico a valle. La secuencia de pasos que se utilizan para procesar los datos debe describirse en detalle. Idealmente, la superficie alisada debe ser trazada al igual que el ajuste entre los datos y la superficie lisa. La descripción del cálculo FE debe incluir la malla de elementos y detalles.

3.6.3 Evaluación del esfuerzo residual

En general se requieren varios pasos para procesar los datos de contorno y calcular los esfuerzos. Los técnicos deben tener cuidado para asegurarse que los datos procesados siguen siendo lo más fiel a los datos originales. Se sugiere que los resultados intermedios deben ser examinados cuidadosamente después de cada paso.

Capítulo 4

Aspectos técnicos del método del contorno

En este capítulo es examinado a profundidad el método del contorno respecto a las técnicas de medición, manejo de datos, modelado y validación; un estudio completo de las posibles soluciones para cada problema. La validación se examinó a través de estudios de caso del capítulo 5 y el siguiente.

4.1 Material de preparación y caracterización

4.1.1 Material

El espécimen designado fue de aleación de aluminio 6061-T6 en la tabla 4-1 se describe la composición química

Tabla 4-1. Composición química de la aleación aluminio 6061-T6.

Aluminio 6061-T6								
Composición química	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
Wt%	0.52	0.2633	0.13	0.02667	0.46	0.01133	0.2733	0.021
Desviación estandar	± 0	± 0.0057	± 0.0435	± 0.0208	± 0	± 0.0015	± 0.0057	± 0

4.1.2 Prueba de tensión

Para evaluar las propiedades metálicas del material se obtuvieron utilizando una maquina universal servo-hidráulica marca MTS modelo 810 con una capacidad de carga de 10 toneladas, la gráfica de esfuerzo-deformación se muestra en la figura 4-1, en donde se utilizó un extensómetro modelo MTS 634.11F-25 para medir la deformación en el material de prueba, el espécimen que se utilizó en la prueba es de sección rectangular acorde con las especificaciones de la norma ASTM E8, el módulo de elasticidad es de 60GPa y el esfuerzo último es de 225.7MPa.[28]

4.1.3 Predicción de los esfuerzos residuales

La sección de análisis supone un modelo plástico perfectamente plástico, para producir la estimación más realista de los esfuerzos que se espera en el plano de corte de la barra doblada, se hizo un modelo de elemento finito tridimensional. El procedimiento de expansión en frío se simulo, en conjunto con la tensión-deformación. El modelo fue construido con ANSYS 14 y todos los detalles están en el apéndice B.

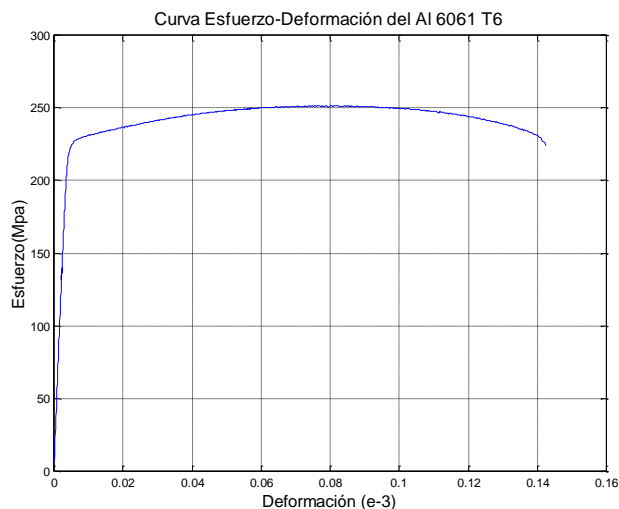


Figura 4-1. Curva esfuerzo-deformación de la aleación de aluminio 6061-T6 de la Tabla 4.1.

4.1.4 Expansión en frío en la placa

En la placa de aluminio 6061 cortada a 50mmx50mmx5mm y en el centro de cada una de ellas se barreno para después hacer la expansión respectiva como se explica en la tabla 4-2. Se hicieron 5 probetas para el agujero de 6mm y 5 probetas para el agujero de 5.5mm dando un total de 10 probetas.

Tabla 4-2 Metodología de experimentación aplicada a los especímenes.

	Agujero de 6mm Ø GE 5%		Agujero de 5.5mm Ø GE 14.5%
1	UE 5% una sola expansión 6mm a 6.3mmØ	6	UE 14.5% una sola expansión 5.5mm a 6.3mmØ
2	2EMS 5% dos expansiones mismo sentido de 6mm a 6.3mmØ	7	2EMS 14.5% dos expansiones mismo sentido de 5.5mm a 6.3mmØ
3	2EDO 5% dos expansiones direcciones opuestas 6mm a 6.3mmØ	8	2EDO 14.5% dos expansiones direcciones opuestas 5.5mm a 6.3mmØ

4	3EMS 5% tres expansiones mismo sentido de 6mm a 6.3mmØ	9	3EMS 14.5% tres expansiones mismo sentido de 5.5mm a 6.3mmØ
5	3EDO 5% tres expansiones direcciones opuestas de 6mm a 6.3mmØ'	10	3EDO 14.5% tres expansiones direcciones opuestas de 5.5mm a 6.3mmØ

Se hicieron 10 probetas con las especificaciones de la tabla 4-2 donde podemos observar manteniendo el mismo grado de expansión e interactuando con el movimiento del balón y cumplir los criterios establecidos, del mismo modo con GE5% y GE14.5% siguiendo la metodología descrita en el capítulo dos como se puede observar en la figura 2-3. El modelo de la figura 4-2 muestra una cuarta parte de la pieza expandida en frío.

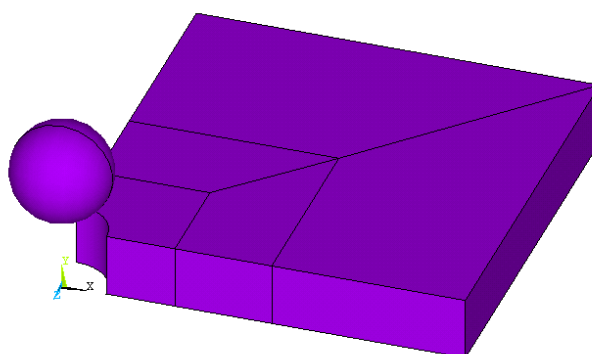


Figura 4-2 Cuarta parte de la pieza aplicando expansión en frío.

4.1.5 Corte

Para la experimentación se corta la pieza con dos partes con una máquina de electroerosión, la cual se realizó en el centro de investigación CIDESI. El corte se realizó con un alambre de 0.25mm. Estos parámetros fueron elegidos por los operadores como el más adecuado para lograr un acabado de corte descremada con baja probabilidad de fracaso del alambre, como se aprecia en la figura 4-3.

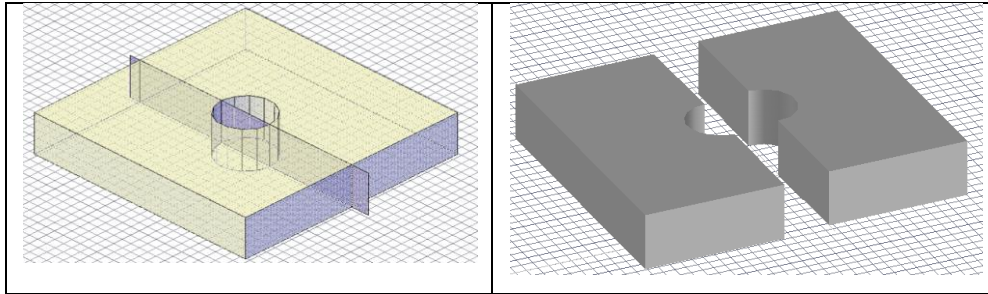


Figura 4-3 Corte de la pieza expandida en frío.

La superficie da como resultado dos muestras, se sujetaron las muestras para realizar el corte. De este modo se facilitó la sujeción de la pieza y fue lo ideal para evitar algún error producido como lo explica en el capítulo anterior. Cualquier artefacto de corte también se puede realizar en el área más importante de la muestra, así que, si es posible con componentes con deformación, en el futuro corte se deben hacer en ángulos rectos conforme al interés del experimentador.

4.2 Superficie medida

El método del contorno requiere una medición muy precisa del perfil de corte de la superficie. Antes de realizar el proyecto es importante tener una referencia precisa de lo que se desea medir y en base a eso se debe coordinar con quien realizara la medición en la máquina de coordenadas para obtener datos más precisos. Un propósito de metrología es proporcionar los datos con más precisión, velocidad y factible, esto se puede lograr con el compromiso de un volumen de trabajo. En la parte 4.1.4 nos da las medidas de 50mmx50mm de la pieza y un espesor de 5mm, de estas mediciones partimos como cero en el centro de la pieza partiendo con datos positivos en “x” hacia la derecha y negativos hacia la izquierda, partiendo de esto se dividió en tres secciones de espaciamiento en el eje “x” iniciando con espacios de 0.25mm hasta cubrir 4mm, para la segunda sección con espacios de 0.5mm hasta cubrir 5.5mm por último los espacios son a cada milímetro hasta cubrir 12mm.

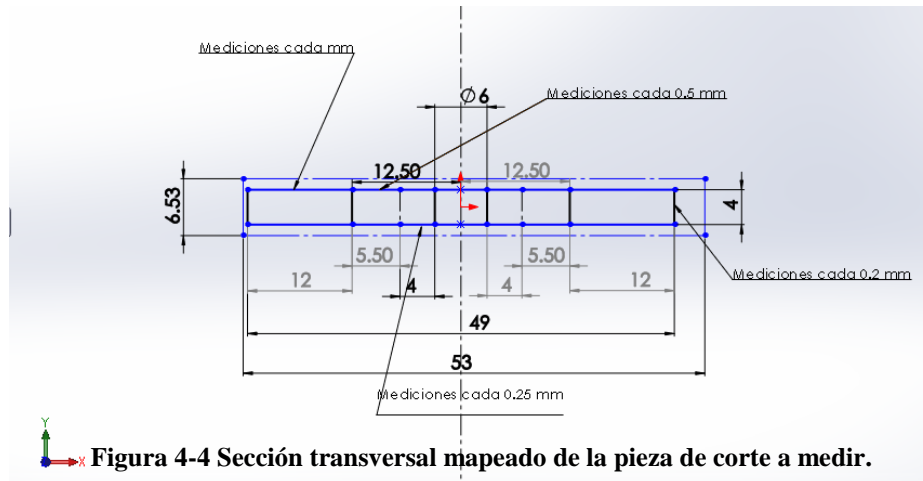


Figura 4-4 Sección transversal mapeado de la pieza de corte a medir.

En la sección transversal se hicieron mediciones a cada 0.2mm cubriendo un rango de 4mm dando un mallado como se puede apreciar en la figura 4-4. La mayoría de las mediciones reportadas en este documento se hicieron con la misma máquina mencionada en el capítulo 3 y se hizo uso de otras más en las instalaciones de CIDESI. En esta sección se detalla una serie de pruebas.

4.2.1 Modo de medición

El modelo de CMM mostrado en la tabla 4-3, el volumen de trabajo es de 700x700x600mm. Está equipado de una sonda capaz tanto discreta y continua de escaneo. La ventaja del modo de exploración se reduce enormemente en tiempos de medición, la sonda puede moverse a 100 sin ninguna dificultad sobre una superficie nominalmente plana. El escaneo bidireccional elimina el tiempo muerto al final de cada línea de exploración (que puede variar en segundos) y por lo tanto es más rápido en grandes exploraciones. Aparte de la velocidad, otra de las ventajas a usar es el modo escaneo de la digitalización continua de la superficie se puede usar para determinar la ubicación de los bordes de la muestra. Para ello, la sonda comienza por debajo de la superficie a medir y luego desciende en el otro lado. El procedimiento completo para estimar los límites de la parte superior de la figura.

TABLA 4-3 Descripción de la máquina de coordenadas (CMM)

	DESCRIPCION DE PATRONES UTILIZADOS
DESCRIPCION	Maquina de medición por coordenadas (CMM) No. DE SERIE 0170610; LMD-170197-265AP CERTIFICADO No. 145232. Trazable al patrón nacional de longitud.
MARCA	MITUTOYO
MODELO	BRT-707
RES. MINIMA	0.0005mm
INCERTIDUMBRE	$\pm(1.3 + 3.6*1)\mu\text{m}$ $\pm(1.3 + 3.7*L) \mu\text{m}$ L en mm Lineal y volumétrica respectivamente.
VIGENCIA	2016-08-06

Mas sin embargo en las muestras de interés es importante ver la superficie que se acerca a la sección donde ocurrió el mayor desplazamiento que fue cerca del agujero que fue en donde se tomó en cuenta los espacios reducidos entre cada medición en el eje x.

4.3 Procesamiento de datos de la superficie

Las piezas medidas de acuerdo con la referencia de medición seguida que se explicó en la parte 4.2 nos da un total de 2000 puntos de referencia con datos en “X” y “Y” dados, ver figura 4-5 para mostrar el desplazamiento realizado en el eje “Z”. Ya que las coordenadas establecidas anteriormente mostro los puntos de referencia importantes de acuerdo con el mallado para darnos la ubicación de desplazamiento en el eje “Z”. El total de la nube de puntos de 2000 puntos de referencia son 1000 del lado izquierdo negativos y 1000 del lado derecho positivos.

Esta nube de puntos medidos por la máquina de coordenadas fueron almacenados en un archivo de Excel con 4 columnas, en la primera especifica el número de nodo o referencia y en las siguientes las coordenadas en el eje “X”, coordenada eje “Y” y coordenadas en el eje “Z” y cada una de estas fue medidas en referencia al eje “Y” 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 hasta a 5.0 teniendo valores en “Z” en línea siguiendo el eje “X”: Se realizó el escaneo para cada probeta como referencia escaneo1 hasta escaneo 10 al completar todas las probetas de interés.

4.3.1 Reducción del ruido

La reducción de ruido depende de la tecnología de medición, el ruido presente en los datos puede variar considerablemente. Las mediciones táctiles del CMM por lo general no sufren grandes cantidades de ruido de fondo, pero no encuentran problemas cercanos al borde de las muestras, pero también pueden registrar puntos falsos cuando el umbral de fuerzas es demasiado bajos. La contaminación de la superficie de la muestra también se da, cualquier rasguño o defecto en la superficie puede causar puntos no deseados que se registran. En principio, la eliminación de esto es sencilla, pero tratando de identificar entre varios miles de puntos es difícil. Las mediciones realizadas para este proyecto se realizaron con una sonda táctil, la punta de la sonda, que tiene un radio finito. Como la posición de la punta de la sonda se mide con el centro de la punta de la misma, entonces el radio se añade en la dirección de aproximación, esto conduce a puntos medidos que son considerablemente por debajo del nivel de la superficie. Del mismo modo, si la sonda se utiliza de una manera continua, siendo arrastrado a través de la superficie, un gran número de puntos se mide como la sonda que asciende o desciende en las paredes de cada lado de la superficie de interés. Existe un gran número de puntos para la eliminación automática de estos, a pesar de intentar identificar a estos puntos de forma automática al mirar los gradientes en la nube de puntos, resultado más simple y rápido para el operador para eliminarlos. Para ello, el autor de este proyecto realizó un pequeño programa en matlab para la eliminación de ruido. Al implementarlo en matlab al ser un programa rápido y eficiente, permite al usuario eliminar puntos o datos no deseados y también restar componentes planos del conjunto de datos. Como ya se había mencionado en la sección anterior al mallar la pieza se

obtuvieron datos positivos y negativos y antes de suavizarlos se hizo un pequeño programa que divide a los mismos como negativos y positivos llamado nega_positivo.m, las instrucciones completas sobre el uso del programa están en el apéndice A. A modo de ejemplo, la captura de datos en el programa de visualización esta en base a la figura 4-4 en el mallado que estos puntos representan.

4.3.2 Alineación de la superficie

La alineación de la superficie es el enfoque directo a las dos superficies de corte con referencia a un sistema de coordenadas común. Mientras la máquina de coordenadas CMM tienen la capacidad de cambiar su marco de referencia en relación con las características geométricas de una parte. Aunque es posible para algunos casos hacer mediciones de las dos mitades de corte mediante la alineación de CMM a ciertos ejes presentes en el límite de las muestras. En particular, con muestras que, tienen formas geométricas primitivas, donde la ubicación exacta en una esquina redondeada puede resultar un tanto complicada, por otro lado en el caso de la expansión en frío solo se puede obtener resultado alrededor del contorno y resultaría un poco complicado utilizar los bordes del contorno del agujero. Por esta razón el autor de este proyecto se vio en la necesidad de cortar la pieza y medir los desplazamientos dados cerca del agujero expandido en la sección transversal, y al igualar la medición del contorno a la vez para cada pieza, se elimina procedimientos cansados y tediosos de una vez para poder medir en base a lo establecido explicado en párrafos anteriores en este capítulo.

4.3.3 Suavizado por splines

La densidad de datos originales, son necesarios para el proceso de suavizado y las regiones de datos que faltan en la superficie a medir se rellenan por valores constantes de extrapolación porque los datos de contorno de la superficie no se pueden extender por completo del perímetro,

y toda la superficie debe ser definido porque los desplazamientos se deben aplicar a todos los nodos de la superficie de corte en el modelo de FEM. [21]. La extrapolación no afecta significativamente las tensiones en otro lugar, siempre y cuando se retire el componente plano a partir de los datos antes de la extrapolación. Los conjuntos de datos en las superficies de corte están alineadas en el mismo sistema de coordenadas, pero los puntos de un lado pueden o no alinearse con los de la otra, esto significa que la realización del promedio no es posible y dependiendo de los parámetros de ajuste de la superficie puede conducir a la incorporación de artefactos u otros defectos de corte deben promediarse inmediatamente. La secuencia adoptada por este autor es tomar el conjunto de datos para cada lado y linealmente interpolar este sobre una rejilla en común, después de lo cual los dos conjuntos pueden promediarse. Hay muchas maneras de crear y describir las superficies que se derivan en puntos. Para el método de curvas de nivel, hay dos razones principales para la fase de montaje de una superficie:

- Para ser capaz de suavizar la superficie de una cantidad conocida, la eliminación de cualquier ruido todavía está presente en conjunto de los datos preservando al mismo tiempo los contornos de esfuerzos relajados.
- Para permitir la evaluación de las condiciones de contorno en los lugares determinados por el nodo o malla de FEM, los cuales son desconocidos en el momento de la medición.

La forma más sencilla para los datos de ajuste (ya sea en una dimensión o dos) es un polinomio. Para las superficies, la más simple en forma es la superficie que tiene como su altura el valor medido de los puntos de los datos. El primer orden es un plano lineal, el segundo un paraboloide, y así sucesivamente. Sin embargo, una superficie que necesita una curva de tercer orden, en una dimensión puede necesitar una curva de primer orden. Adicionalmente, en polinomios asumen que la variación de la superficie es constante de un límite a otro y esto no es ciertamente el caso cuando se examinan los esfuerzos residuales en una muestra. Muy a menudo hay grandes áreas de baja tensión con una sección más pequeña donde la magnitud de esfuerzo es muy alta. Los polinomios son capaces de representar estos tipos de funciones de manera adecuada. El trabajo inicial de Prime [5] utilizaron superficies de Fourier, estos describen como un producto tensor de función de serie trascendental. Cuanto mayor sea el orden de ajuste, mayor es la componente de frecuencia que se representa en la señal. Incluso una onda cuadrada puede estar en forma de una serie de Fourier infinitamente de orden superior, pero cualquier cosa menos que la

representación infinita conduce a un efecto de oscilación en los bordes (conocido como el fenómeno Gibb). Si fuera importante para caracterizar los espectros de frecuencia de la superficie, la superficie de Fourier puede ser más deseable, pero esto no es necesario para el método de contorno.[3]

Los polinomios en realidad pueden ser presentaciones muy precisas para pequeñas áreas de datos lisos. Si uno fuera a subdividir los datos que se estaban representando en pequeñas áreas lisas y utilizar un polinomio de bajo orden para cada uno, se podrá representar con mucha precisión para grandes conjuntos de datos complejos con un conjunto simple de parámetros.

El matemático estadounidense Schoenberg, acuñó la frase “spline” para describir esta curva. El ajuste real de la spline se logra generalmente al minimizar el error entre los puntos de datos y el ajuste en un sentido de mínimos cuadrados. En el trabajo realizado por este autor, las splines de suavizado cúbicos se han utilizado para ajustar los datos de superficie con diferentes lugares de descanso evaluados en una base de cada caso.

En matlab en la parte de herramientas de spline esta `tspdem` y la spline utilizada en este proyecto fue **spap2** (`[knotsy, knotsx], [k k], [y, x], z`) *Knotsx* y *Knotsy* son los vectores de localización conocidos y *Knots* de multiplicación “*k*” son usados en el intervalo final. La spline es de tercer orden para spline cuadrática. El mallado de puntos original para alisar son definidas por los vectores “*y*” y “*x*”, el dato de mapeado está en la matriz “*z*”. [3], [21], [26]

Para los datos de distribución normal dados por la máquina de medición de coordenadas “datos crudos” son los primeros valores a graficar con el programa de matlab `suavizados_pos.m` (valores positivos) y `suavizados_neg.m` (valores negativos) como se muestra en la figura 4-5 y aplicando la spline para suavizarlos como se muestra en la figura 4-6 se pueden ver que en el plano y-z muestra más dispersión del conjunto de valores en “*y*” y “*z*” los “*” en color azul y las “+” rojas una alineación dado por la función de ajuste por la spline, es un claro ejemplo de lo que realiza el programa para los datos aplicando cada uno de estos a las diferentes probetas consideradas a evaluar.

Obteniendo esos valores aplicamos la triangulación de la una, consiste en que una nube de puntos dada en el plano, en hallar una triangulación en la que los puntos más próximos entre sí estén conectados por una arista, en la que los triángulos resultantes sean lo más regulares

posibles [26]. En la figura 4-7 se aprecia los datos suavizados contra los datos crudos y en 4-8 el suavizado del plano “x-z” en donde “*” verdes da valores más uniformes al aplicar el suavizado y “o” azules la dispersión propia de los datos crudos. El proceso final como puede observarse en la figura 4-9 vemos que la parte suavizada es mallada y en comparación con los datos ajustados dan una presentación de una malla más cerrada.

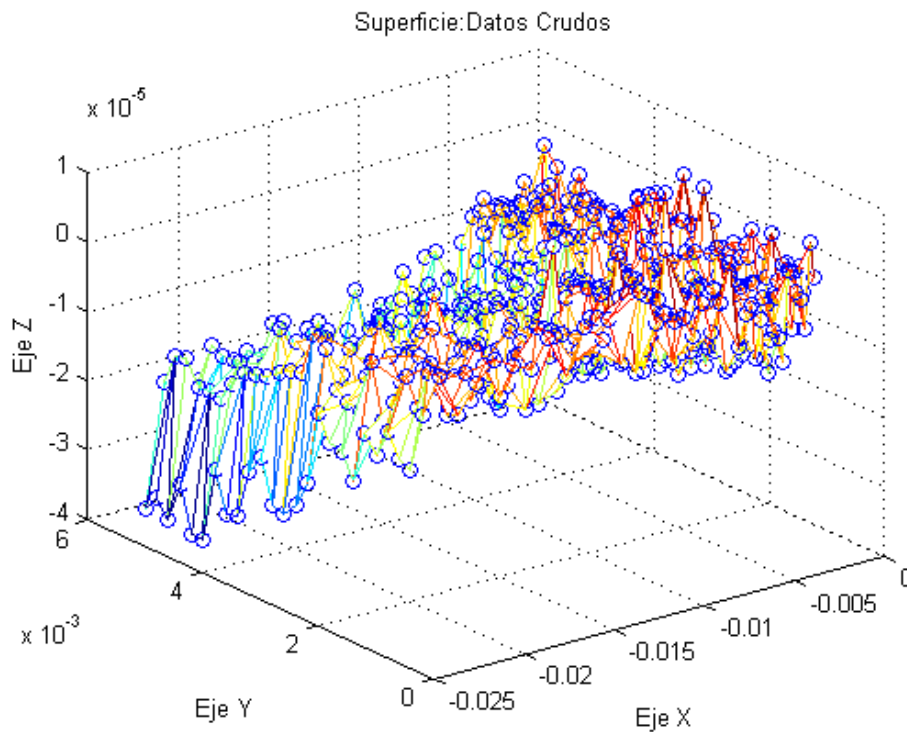


Figura 4-5 Datos crudos.

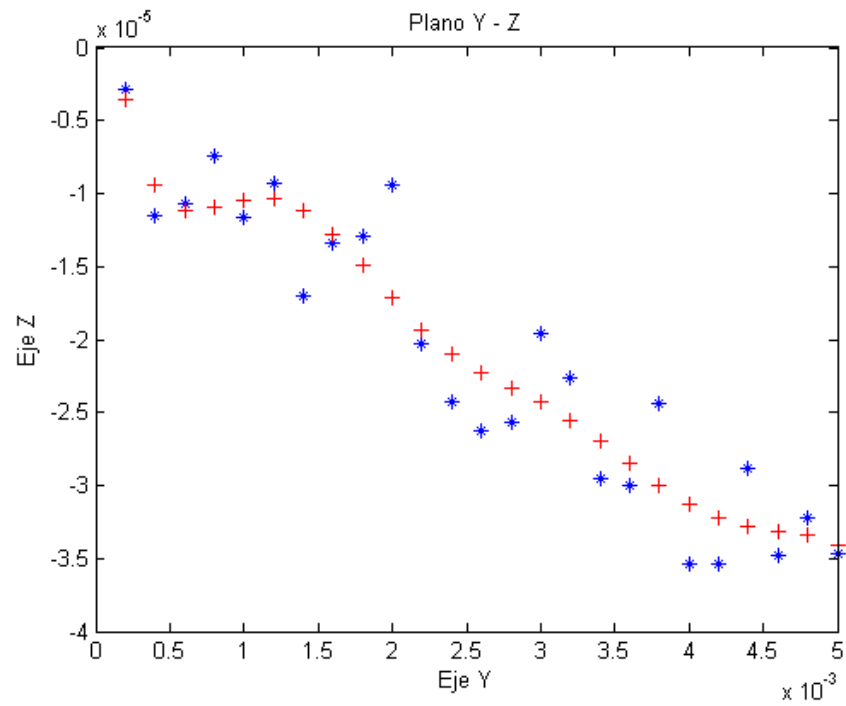


Figura 4-6 Plano y-z

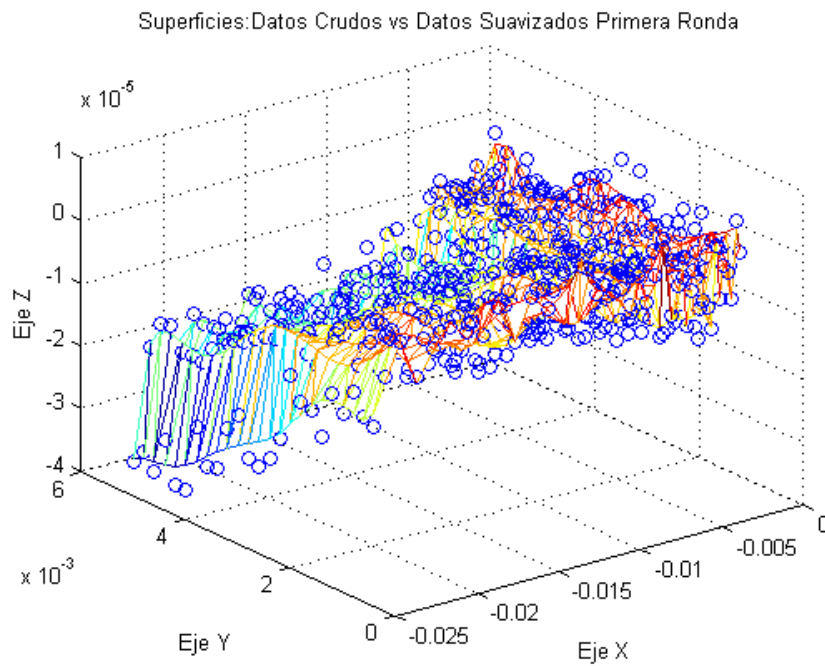


Figura 4-7 Suavizados contra datos crudos.

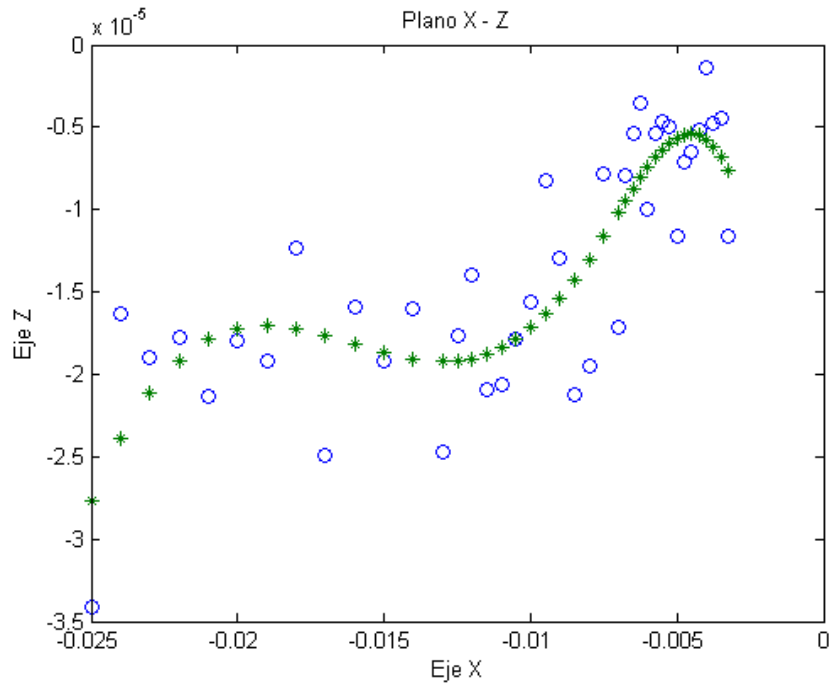


Figura 4-8 Plano x-z

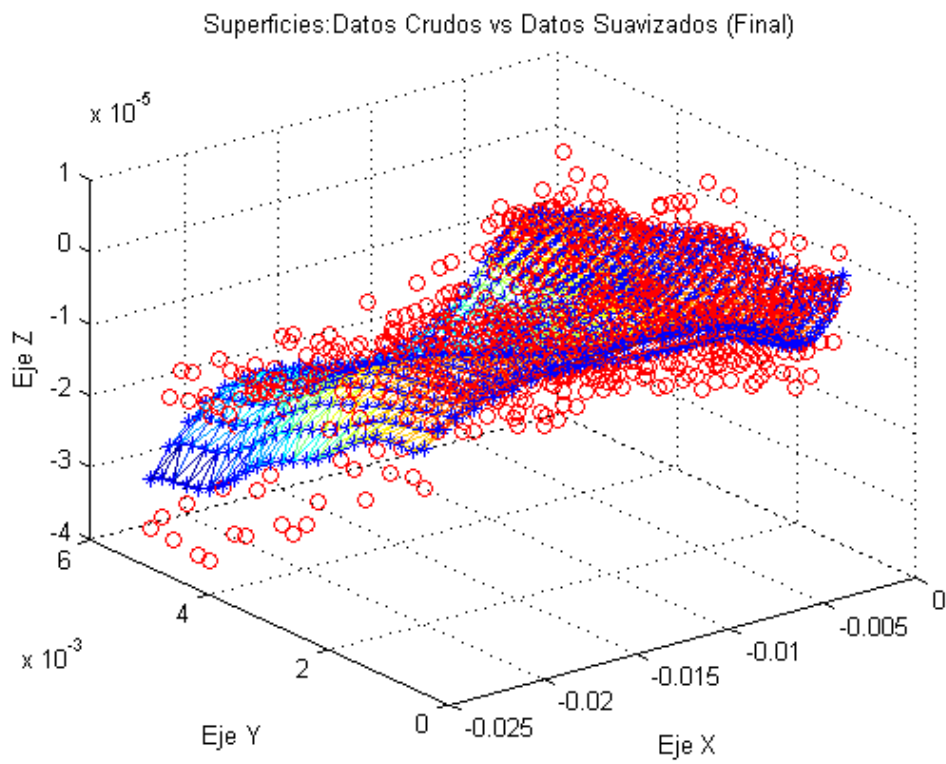


Figura 4-9 Final de datos crudos contra datos suavizado.

4.4 Modelado

El modelado como se explica en la parte 3.6 del capítulo anterior, es el siguiente paso por seguir en el método del contorno que es el inverso de los desplazamientos medidos para calcular los esfuerzos residuales. Para la geometría, es posible hacerlo tomando la mitad de la pieza de cada extremo y los puntos importantes para crear la dimensión de la probeta.

El modelado de elemento finito se ha convertido en la forma predominante de la solución de los grandes problemas de esfuerzo ya que existe en el mercado un gran número de software disponible para este tipo de análisis. Sin embargo, el límite de elemento finito permite la solución de los problemas previamente intratables. El uso de modelo de elemento finito (FEM) en el método de contorno es de la variedad elástico puro. Como se discutió en el capítulo 3, la principal etapa es el modelado en el método del contorno de la superficie medida del corte de la muestra para estimar los esfuerzos y el desarrollo fue el siguiente:

- Modelar la geometría deformada de la mitad de la muestra de corte.
- Establecer las restricciones de los nodos para prevenir el movimiento del cuerpo rígido.
- Aplicar las condiciones de contorno para una spline dada a la superficie de corte del modelo
- Extraer los datos en cada nodo para el análisis y visualización, las coordenadas “z” de la superficie alisada se evaluaron en los lugares de “x-y” de los nodos en el modelo de elemento finito, los signos se invierten, y los resultados se describen en la cubierta de entrada FEM como condiciones de contorno, desplazamiento.

4.4.1 Detalles de modelado

En el procedimiento de modelado desarrollado en esta tesis es una combinación de la funcionalidad de ANSYS.14 APDL classic y fue personalizada con el programa Matlab. Un modelo de elemento finito que representa la mitad de la parte original, la cual se construyó sobre las mediciones de la pieza y este modelo representa la sección transversal en el plano “z”.

4.4.1.1 Mallado

Antes del mallado, se debe establecer el modelo en ANSYS como una guía inicial para dar a entender la densidad de la malla, cada nodo en el esquema se utiliza a lo largo de la longitud, también se encuentra un número para cada nodo que definiremos. La superficie de corte del modelo que es de interés. Debe establecerse en el modelo de Ansys sobre la densidad de la malla, la superficie de corte del modelo es de interés para dar paso a la malla que se dará como se explica en el capítulo 3. El tipo de elemento que se seleccionó para el análisis se muestra en la figura 5, el cual ocupa elemento 3D en Ansys, este elemento es un sólido para modelos de estructuras en 3D, y está definido por 8 nodos, cada uno de los cuales tiene tres grados de libertad [17]. El modelo tiene 31200 elementos y 35280 nodos la razón de espaciamiento. La elección de este modelo se hizo por varias razones:

- El elemento 3D definido por 8 nodos coincide con las piezas que manejaron para analizar diferentes autores en su búsqueda del comportamiento de la expansión en frío. [8], [17], [29]–[31]
- Se utiliza para el modelado 3-D de las estructuras sólidas. Se define por ocho nodos que tienen tres grados de libertad en cada nodo: en las direcciones “x”, “y”, “z” nodales. El elemento tiene plasticidad, hiperelasticidad, rigidez estrés, la fluencia, gran desviación, y la capacidad de deformación de gran tamaño. También tiene la capacidad de formulación mixta para la simulación de deformaciones de los materiales elastoplásticas casi incompresible, y materiales totalmente hiperelásticos

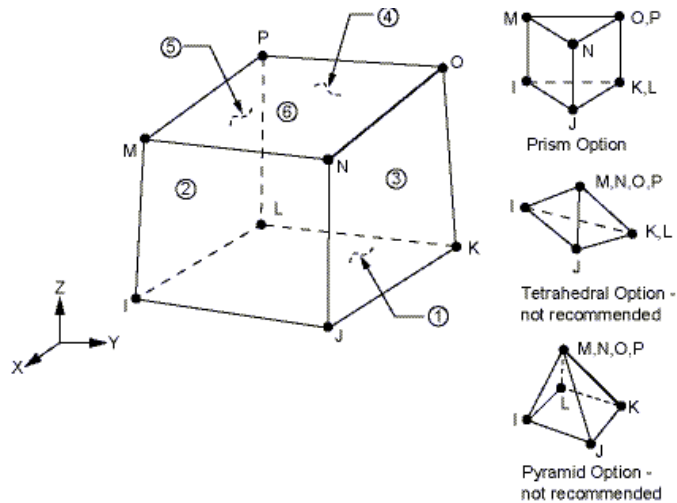


Figura 4-10 Elemento solido 3D.

4.4.1.2 Propiedades del material

En la creación del elemento FEM nos pide especificar la relación de Poisson y el módulo de Young para la muestra para algunas que desarrollamos el grado de expansión y las veces de iteración con el balín. Para el análisis se manejó un material lineal isotrópico para cuestiones de propiedades elásticas del material y se introdujeron dos propiedades del material: el módulo de elasticidad 71.4 (GPa) $S_y=285\text{MPa}$ y el módulo de Poisson (0.3), que definen las propiedades lineales del material isotrópicamente en elementos finitos (aleación de aluminio 6061-T6).[2], [8], [32]

4.4.1.3 Condiciones de frontera

Los desplazamientos finales después de promediar y filtrados de datos deben convertirse sobre la superficie normal e interpolando las ubicaciones de nodo en la superficie de elemento finito como condición de contorno de desplazamiento. Solo el desplazamiento en dirección normal a

la superficie de corte debe ser especificado para los nodos de la superficie de corte. Las condiciones adicionales aplicadas al modelo para frenar el cuerpo rígido, tal disposición asegura el cálculo que satisface las condiciones de equilibrio y por esta misma razón el movimiento de la pieza.

Las condiciones de frontera se aplican a las áreas en la superficie posterior de la pieza para restringir los todos los desplazamientos, para después definir los loads steps y se le nombra de acuerdo con cada probeta para resolverlo y una vez solucionado el problema se revisa los campos de esfuerzos.

4.4.1.4 Creaciones de la plataforma de entrada

Como ya se había especificado anteriormente como la malla es bastante grande y se dividió en negativo y positivo, en dos partes diferentes las cuales fueron suavizadas de manera independiente para después enviarla a la base de entrada de ansys. El archivo contiene el desplazamiento de los nodos ya suavizados contenido en un libro de excell llamado por matlab conocido como datos.ansys.txt Con referencia a las propiedades del material y las condiciones de contorno para cada paso.

4.4.1.5 Ejecución de trabajo

Al aplicar las condiciones de frontera e ingresar los datos.ansys.txt a la plataforma de entrada del ansys se ingresa a la parte de solución de ansys para que se generen los desplazamientos proporcionados de la nube de puntos de nuestra pieza medida en el CMM.

4.4.1.6 Extracción, visualización y análisis de resultados

Los resultados pueden ser visibles desde ansys y los informes se pueden extraer mediante las líneas nombradas como superior (a 1mm de la superficie superior y distancia de 9mm), medio (la mitad de la superficie) e inferior (a 1mm de la superficie inferior). En el programa en matlab para ser ingresada a la plataforma de entrada de ansys se le agregaron una serie de comandos que se le dice a ansys lo siguiente:

- Crea un parámetro cuyo número es #nodo que está posicionado en (x, y, z)
- FLST,2,1,1, ORDE,1 Ya que ubicaste el nodo, prepárate para aplicarle una carga a ese nodo.
- FITEM,2, node, # Al nodo que le vas aplicar la carga es el numero #nodo (parámetro que tiene guardado un numero)
- /GO aplícala
- D, P51x,, -1.0421e-006,,,uz,,,, aplícale un desplazamiento que tenga una magnitud de desplazamiento en la dirección “z”.

Esta serie de comandos permite que el programa ansys sea capaz de aplicarle los desplazamientos en “z” y de esta forma crearle solución para lo que podremos visualizarla en la pantalla al aplicar la solución correspondiente en Ansys se tomó lectura de las regiones de la parte superior, media e inferior como se muestra en la figura 4-11.

Los pasos que se consideraron para cada una de las probetas que se enlistan en la tabla 4-2 y ya cargado, los desplazamientos como se observa en la figura 4-12, son marcados para cada nodo sobre la pieza modelada en ansys.

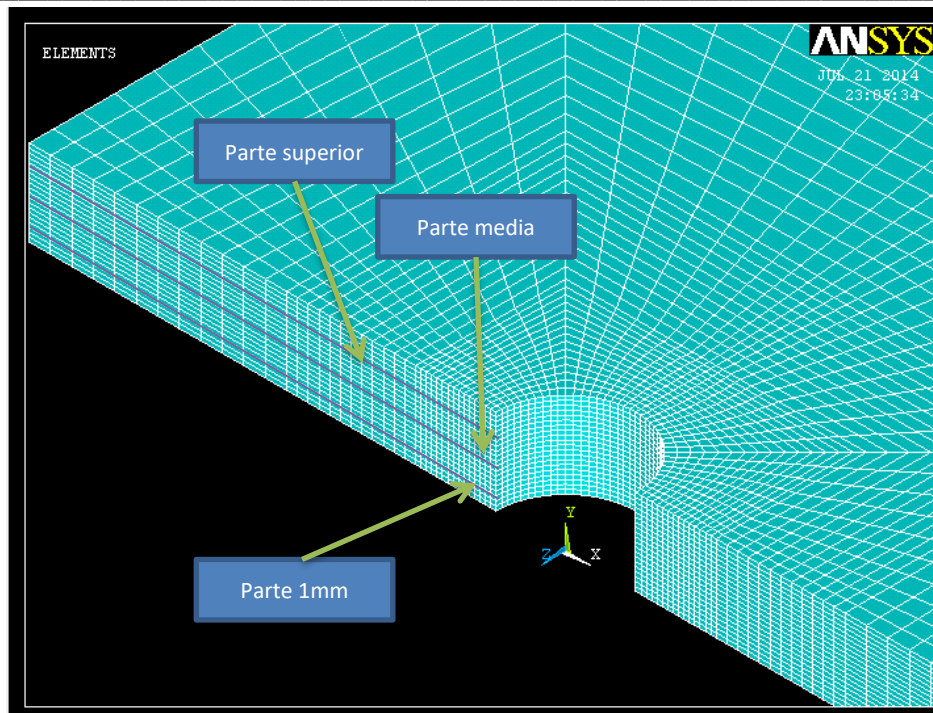


Figura 4-11 Modelo utilizado de las líneas que se tomaron para obtener los esfuerzos residuales tangenciales.

4.5 Resultados

Los resultados a obtener son el resultado de la aproximación forzada elásticamente la superficie de su configuración original en la dirección “z” dejando solamente los desplazamientos transversales sin restricciones.[13]. El análisis de las aplicaciones experimentales para la expansión en frío de 14.5% y 5% en comparativa con la parte superior e inferior se analizan más a detalle en el capítulo 5, siguiendo la misma metodología para todas las probetas en donde se hace una comparativa entre ellas en cuanto los esfuerzos residuales tangenciales como se puede apreciar en la figura 4-11 parte superior, parte media y parte inferior.

Capítulo 5

Resultados y discusión

En este capítulo se hará referencia a los esfuerzos residuales inducidos por la expansión en frío en la simulación creada en ANSYS, análisis de cada probeta, siguiendo la misma metodología mencionada en el capítulo 4, paso por paso de forma independiente, más próximo por los datos proporcionados por la máquina de coordenadas CMM de cada medición realizada de forma única para obtener una mayor precisión y veracidad de resultados para cada probeta.

5.1 Resultado de simulación ANSYS de la expansión en frío de un agujero

Como ya se había mencionado anteriormente la medición de contorno de la superficie proporciona información sobre el desplazamiento en (z) solamente en dirección normal. Por lo tanto la aproximación forzara elásticamente la superficie de su configuración original en la dirección “z” dejando solamente los desplazamientos transversales sin restricciones[13].

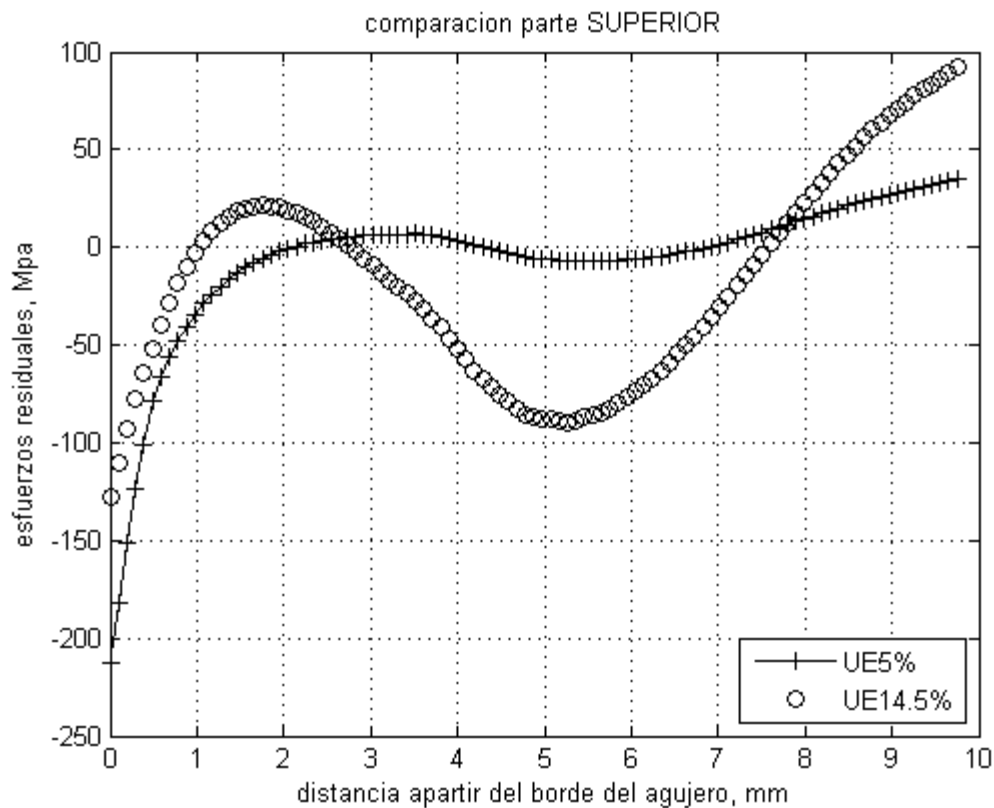


Figura 5-1 UE parte superior 5% y 14.5%

En las aplicaciones experimentales en el análisis para la parte superior de única expansión de 14.5% y 5% podemos observar en la figura 5-1 una máxima de tensión en la expansión de 14.5% y en 5% se mantiene constante en cero en comparación por la otra parte. Sin embargo, podemos observar que tenemos una mínima de compresión de -212MPa en 5% -127MPa en 14.5%. En la parte media se observa un mayor esfuerzo de tensión 151.12MPa para la probeta de 14.5% y mientras tanto en expansión del 5% se mantiene en 68.13MPa, como se aprecia en la figura 5-

2, y podemos visualizar que la mínima de compresión para 14.5% es de -26MPa al no resultar ideal en este experimento.

En la parte inferior se observa una diferencia de esfuerzo de tensión de 195MPa en la probeta de 14.5% en comparación con la de 5% que es de 65MPa, y esta tiene más esfuerzo de compresión de -163MPa, el cual es una respuesta favorable para la experimentación. Analizando cada una con sus diferentes variables que se aplicaron con su respectivo grado de expansión para contemplar el efecto producido en cada parte. Para el caso de la expansión de 14.5% como se representa el estado de esfuerzos residuales generados para los diferentes análisis, es decir UE, 2EMS, 2EDO aplicando lo mismo para 3EDO y 3EMS manteniendo el mismo grado de expansión ya que solo se interactúa con el balín metálico de la misma medida a fin de ver la redistribución de los esfuerzos residuales inducidas en el contorno del agujero.

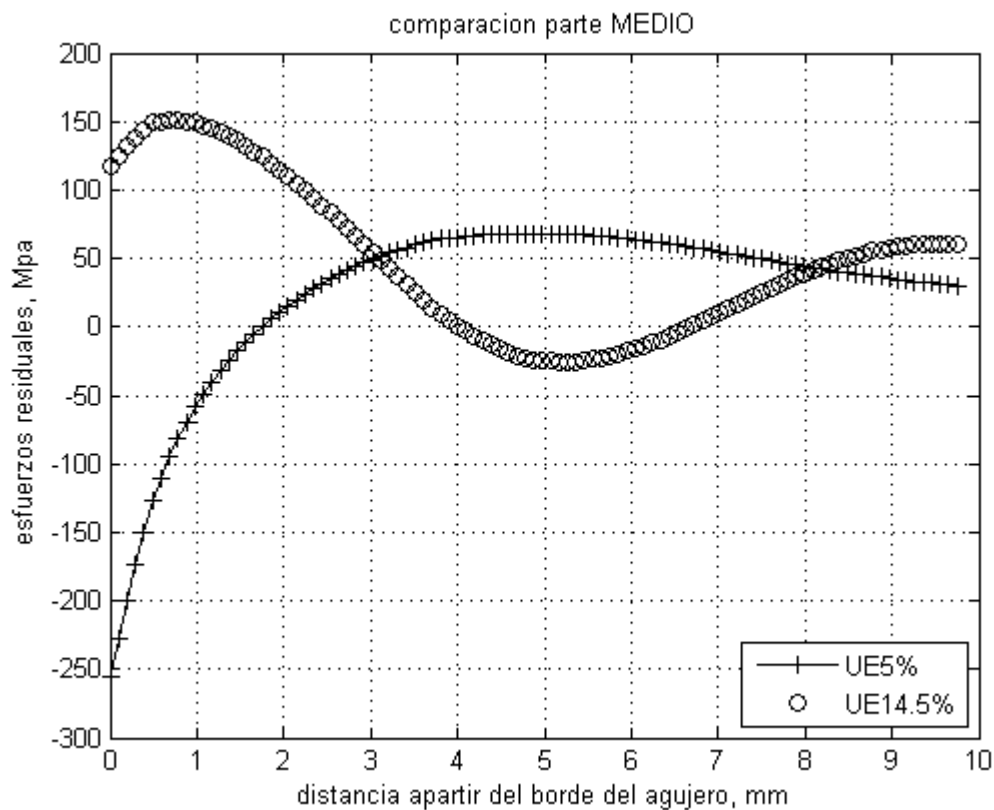


Figura 5-2 UE parte medio 5% y 14.5%

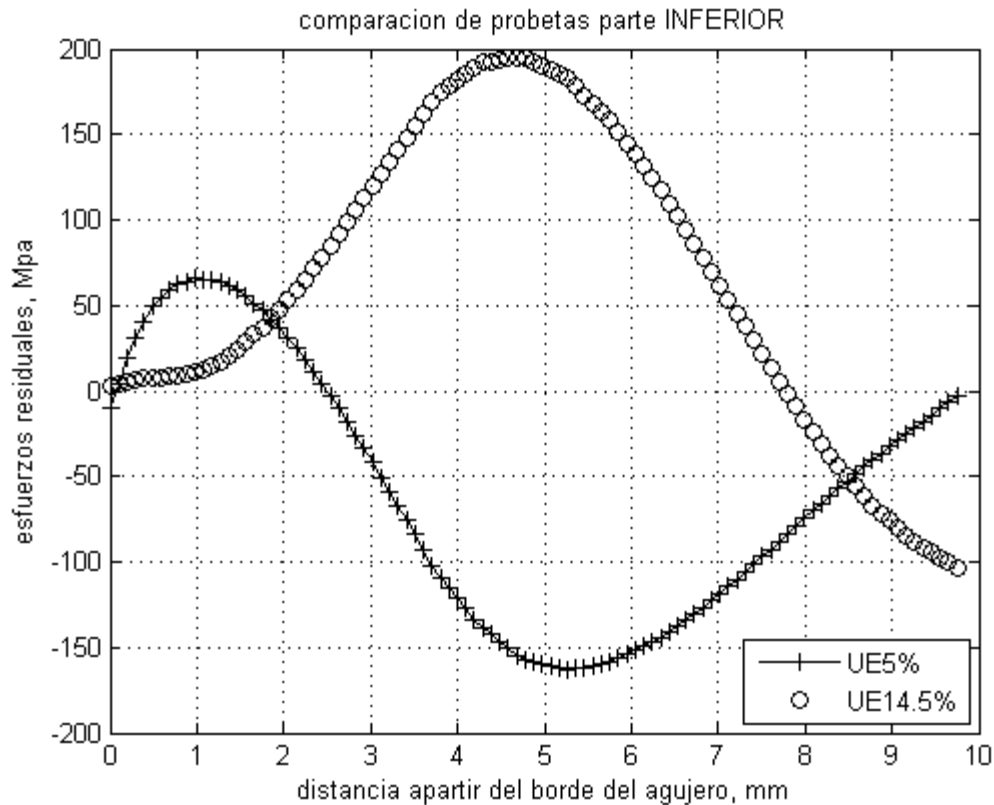


Figura 5-3 UE parte inferior 5% y 14.5%

En la parte superior UE 5% figura 5-7 nos muestra mayor uniformidad en sus diferentes variantes de expansión a diferencia de 2EMS que llega al límite máximo con -374.31MPa, que va más allá del límite máximo permisible, al pasar el balín en el mismo sentido afecta de forma significativa en el aluminio.

En la parte media tenemos un mínimo de compresión de -358.05MPa en 2EMS, lo que podemos notar que también está afectando en la parte media, aunque 2EDO como ya se había mencionado anteriormente también llega al límite elástico máximo permisible.

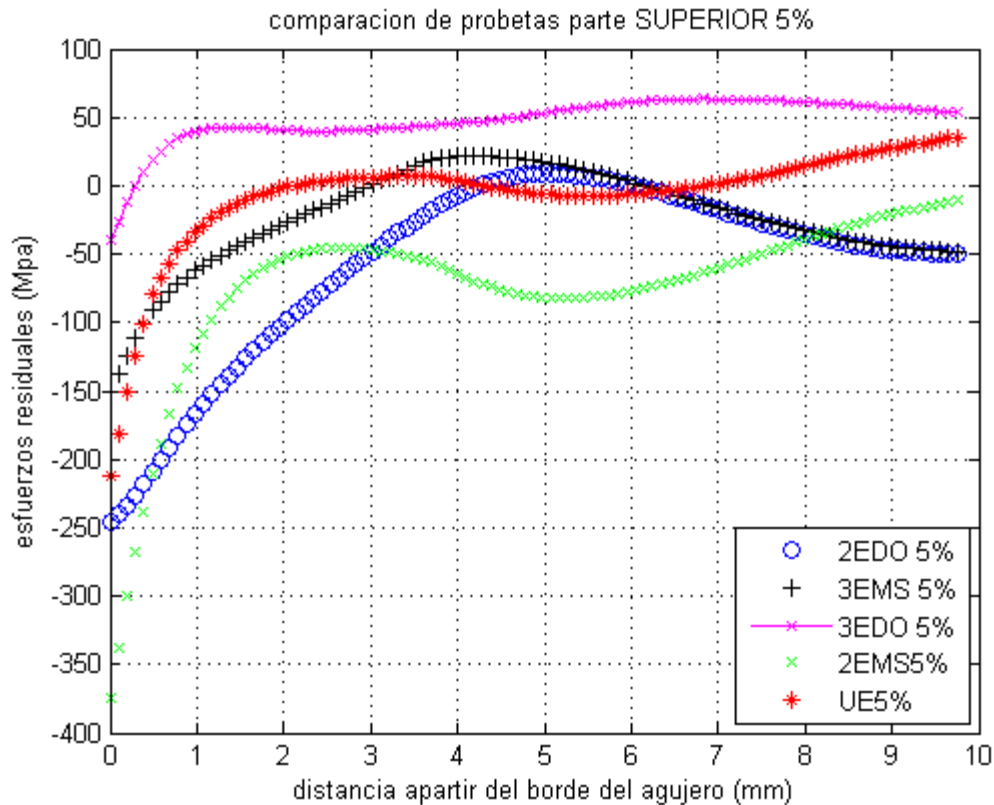


Figura 5-4 Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE5% parte superior.

Pero a diferencia de la parte inferior 3EMS y 3EDO existe una diferencia significativa entre ambos por la iteración del balón en 3EDO. En la figura 5-4 podemos apreciar que la expansión única en color rojo en la gráfica se mantiene con mínimos de compresión de -163MPa y una tensión máxima de 65.5MPa lo que indica que no tiene muchas variantes y hay una uniformidad en sus esfuerzos.

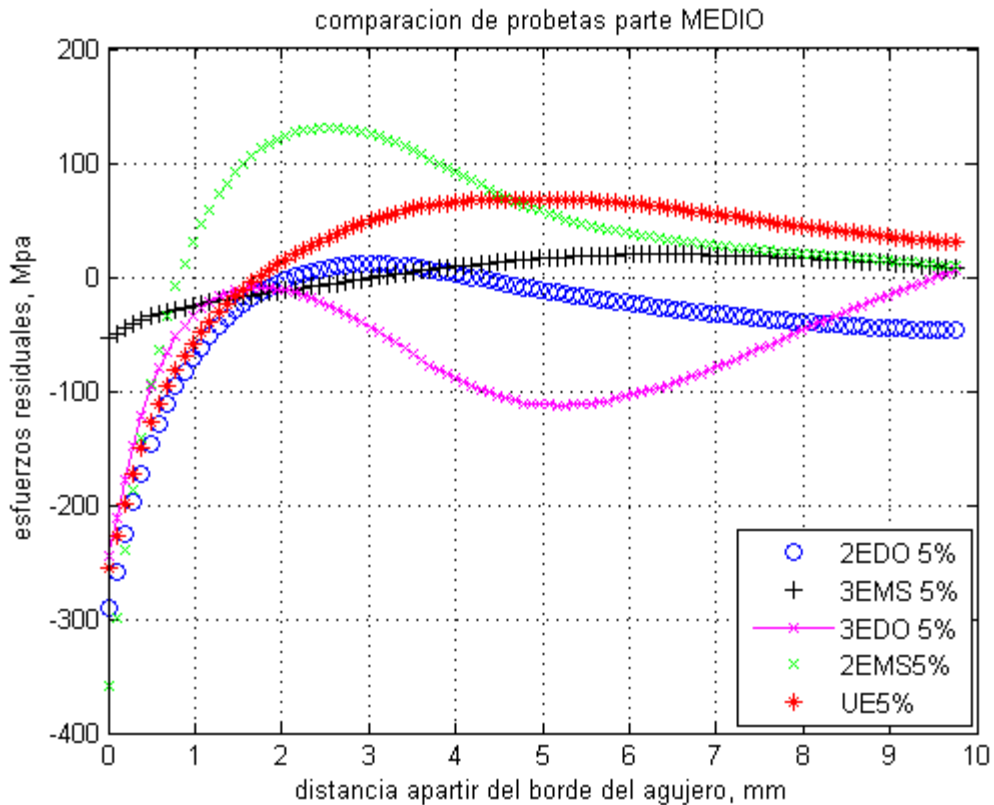


Figura 5-5 Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE5% parte media.

Al aplicar la triple expansión en 14.5% y como esta causa esfuerzos muy evidentes como se observa en la figura 5-7, donde el máximo de tensión en la parte superior en la gráfica de 14.5% la primera expansión nos da un valor de -127.61 MPa un esfuerzo de compresión muy favorable pero si le aplicamos 3EMS y 3EDO sobrepasa el límite elástico.

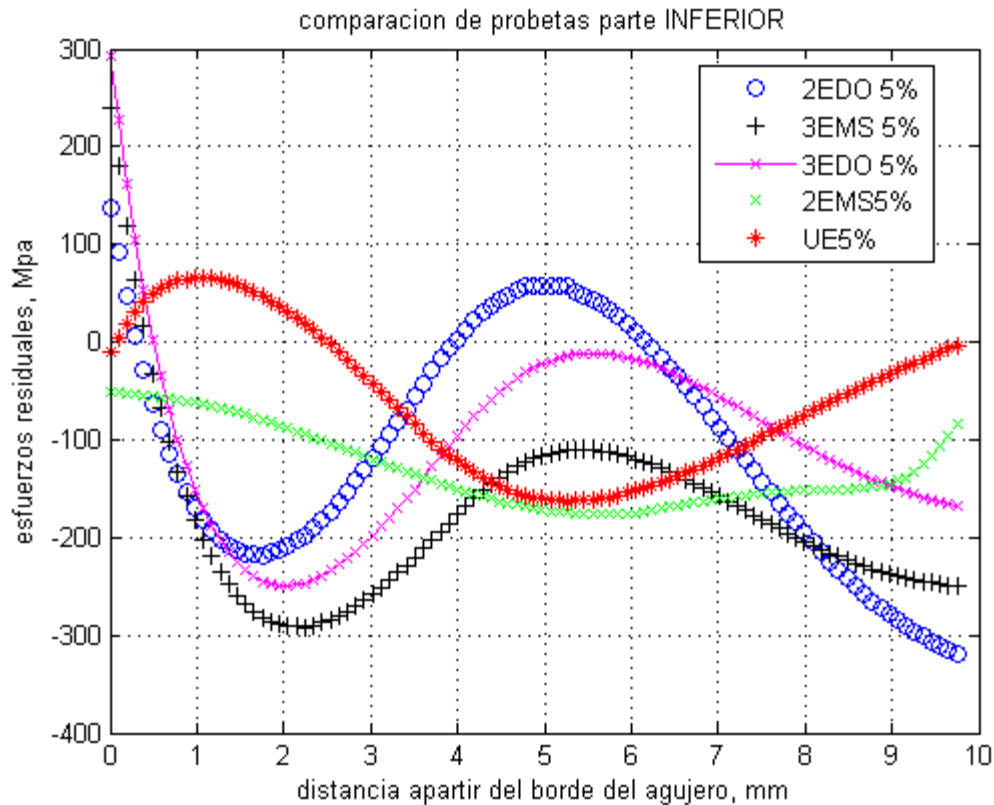


Figura 5-6 Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE5% parte inferior.

En la parte media podemos notar que UE resulta más favorable al tener un mínimo de compresión de -26. MPa y un máximo de tensión de 151MPa, aunque no es ideal para lo que se persigue en este proyecto. Mas, sin embargo, analizando desde un punto de vista de la distribución de esfuerzos podemos notar que 2EDO se mantiene mejor distribuido los esfuerzos residuales pasando de tensión en EU a compresión en 2EDO 5% en la parte inferior como lo muestra la figura 5-6.

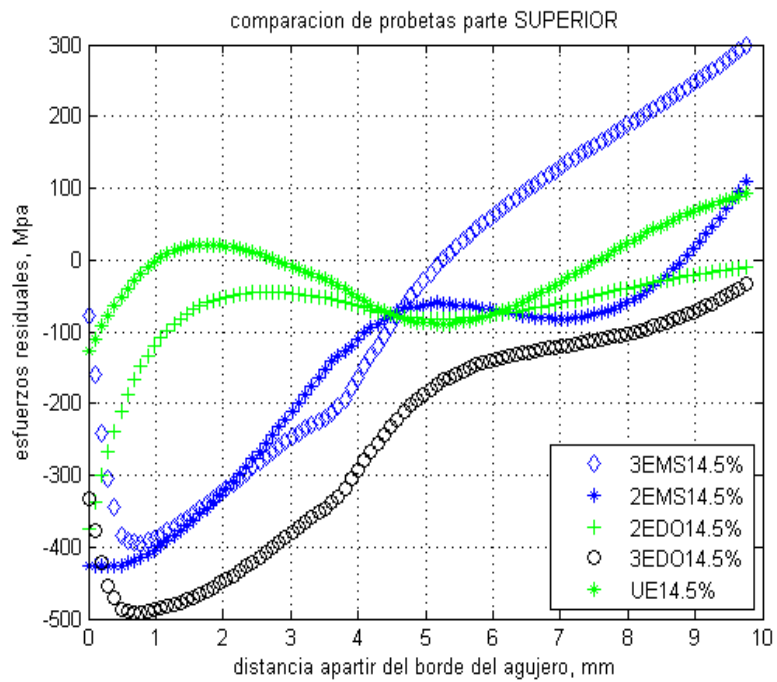


Figura 5-7 Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE14.5% parte superior.

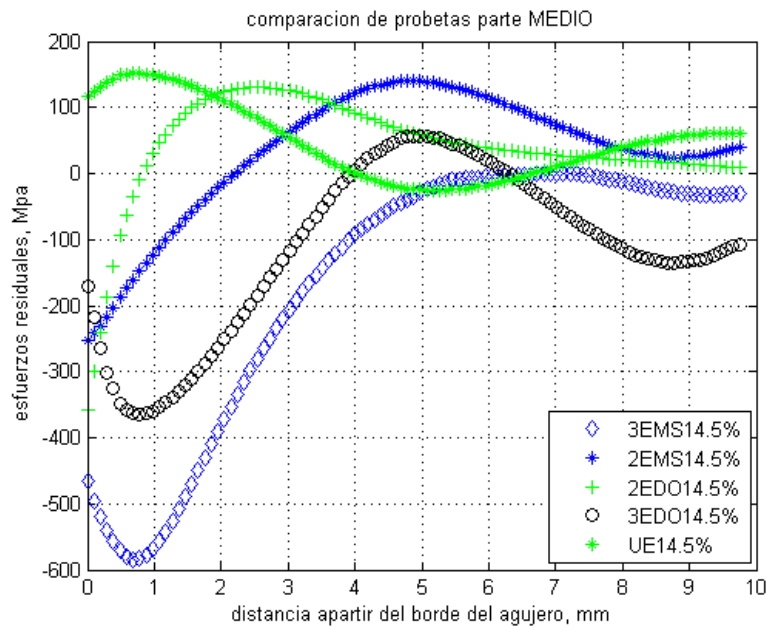


Figura 5-8 Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE14.5% parte media.

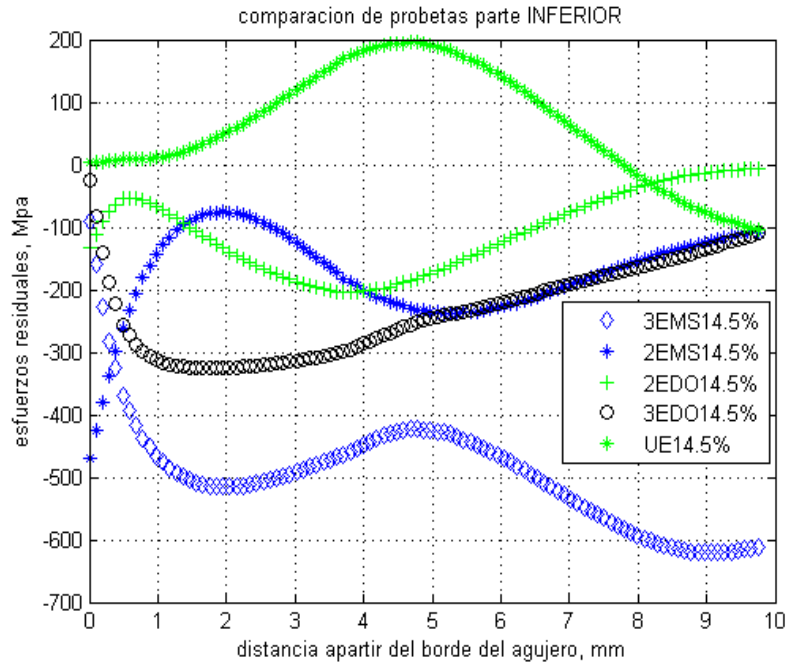


Figura 5-9 Grafica de esfuerzos tangenciales para los 3GE14.5% parte inferior.

5.2 Discusión de resultados

Para el espécimen expandido a 6 mm de diámetro con un agujero de 5.5 y el trabajo de expansión en frío fue conducido a forzar el balín de 6.3mm de diámetro logrando un GE de 14.5% y 5% respectivamente. En la expansión de 5% se le aplicó UE, 2EMS, 2EDO, 3EMS y 3EDO manteniendo el mismo grado de expansión e interactuando con el movimiento del balín y cumplir los criterios establecidos del mismo modo con GE5%.

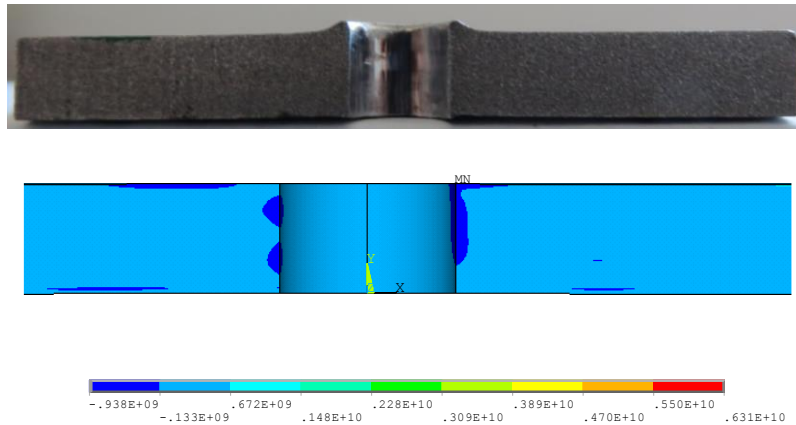


Figura 5-10 Bulto de 0.38mm provocado por UE 5%

Para la probeta que se aplicó una expansión de 5% notamos que la expansión única entrega valores más favorables tanto en la ruta de superior e inferior entrada y salida del balín, el bulto en el contorno del agujero por la UE5% es de 0.38mm poco significativo como se observa en la figura 5-10 a diferencia de la figura 5-13 con un bulto de 0.54mm por la expansión de 3EDO, aunque podemos notar que es poco significativo uno de otro ya que el material removido por el balín es menor debido a la presión ejercida, en comparación con la expansión a 14.5% que se observa más adelante.

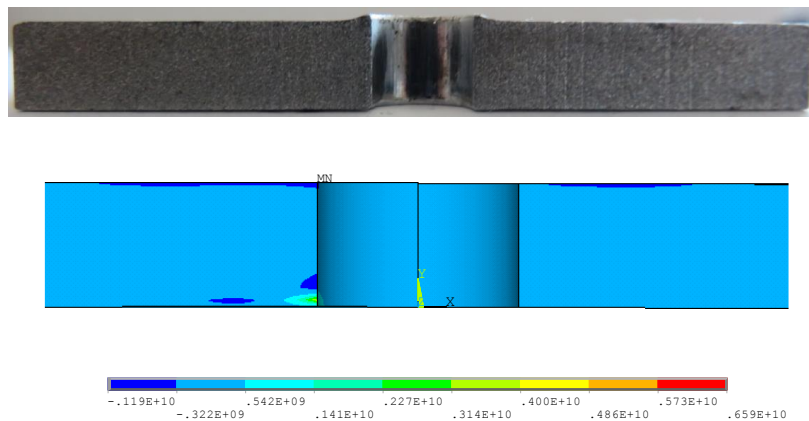


Figura 5-11 Bulto de 0.51mm provocado por 2EDO 5%

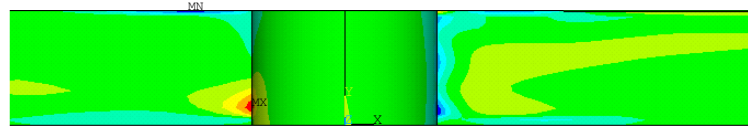
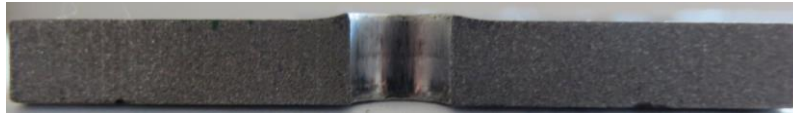


Figura 5-12 Bulto de 0.38mm provocado por 2EMS 5%

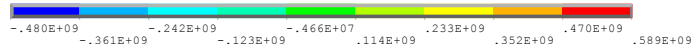
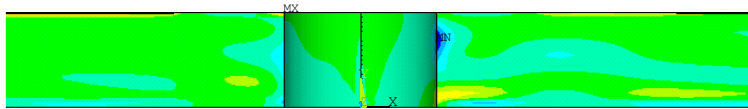


Figura 5-13 Bulto de 0.54mm provocado por 3EDO 5%

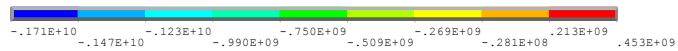
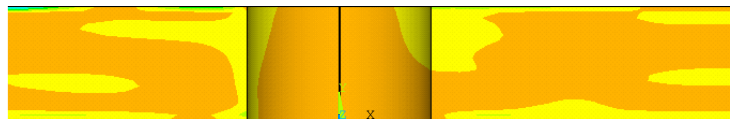


Figura 5-14 Bulto de 0.35mm provocado por 3EMS 5%

Al ver más a detalle en la parte de UE 14.5% como podemos observar en la figura 5-15 creó una grieta por el esfuerzo producido por la expansión de 5.5mm de diámetro a un balín de 6.3mm de diámetro creando un bulto en el contorno del agujero de 0.97mm provocado por la expansión en frío.

Como podemos observar en las gráficas anteriores en la ruta superior, inferior y medio obtuvimos mayor número de esfuerzos de tensión que de compresión en la única expansión para 14.5% y es más notorio en la salida de la probeta al alcanzar esfuerzos de tensión muy altos y sucede lo mismo para 2EDO y 3EDO obteniendo resultados muy desfavorables para este tipo de expansión, como podemos observar en la figura 5-18 el bulto en el contorno del agujero es más grande que el de la única expansión llegando a 1.13mm de espesor.

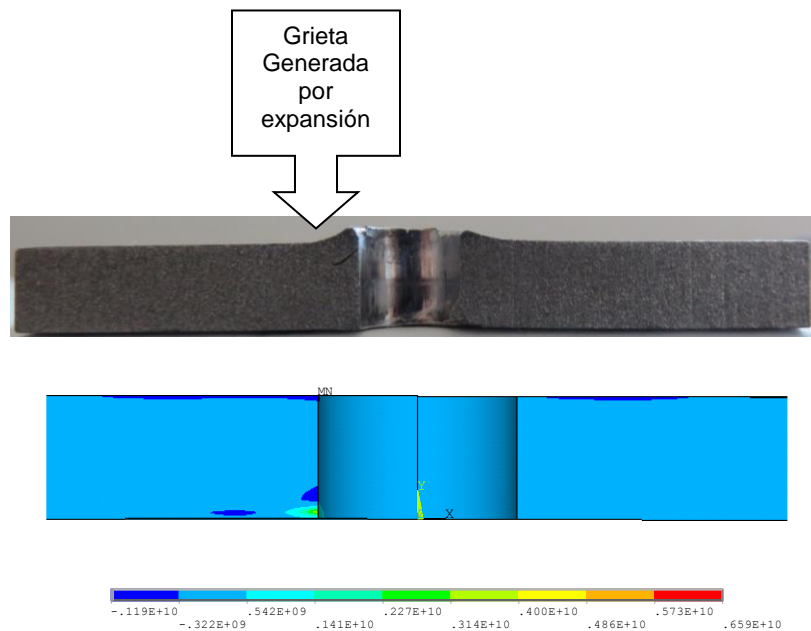


Figura 5-15 Bulto de 0.97mm provocado por UE14.5%

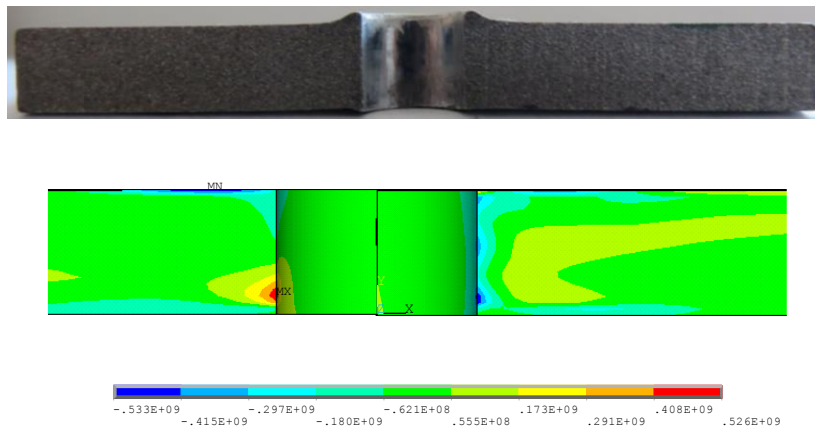


Figura 5-16 Bulto de 0.95mm provocado por 2EDO 14.5%

Sin embargo, la diferencia entre ambos es poco significativa, y esto nos muestra que 3EDO si llega afectar, aunque se mantenga el mismo grado de expansión porque el balón mueve el material en las diferentes direcciones y concentra pronunciación de bulto por el efecto de 3EDO.

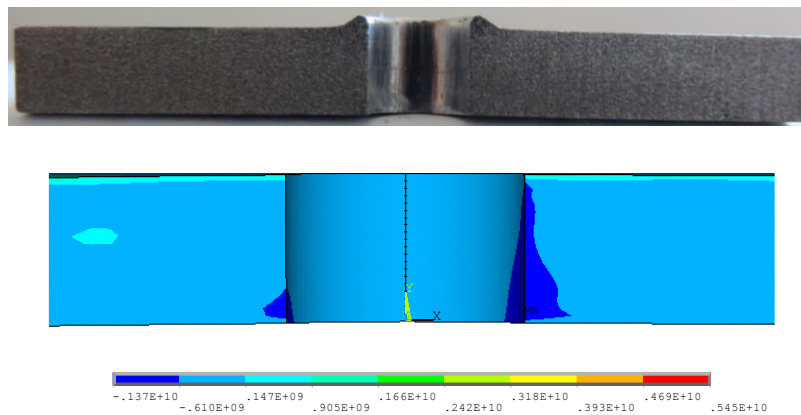


Figura 5-17 Bulto de 0.89mm provocado por 2EMS 14.5%

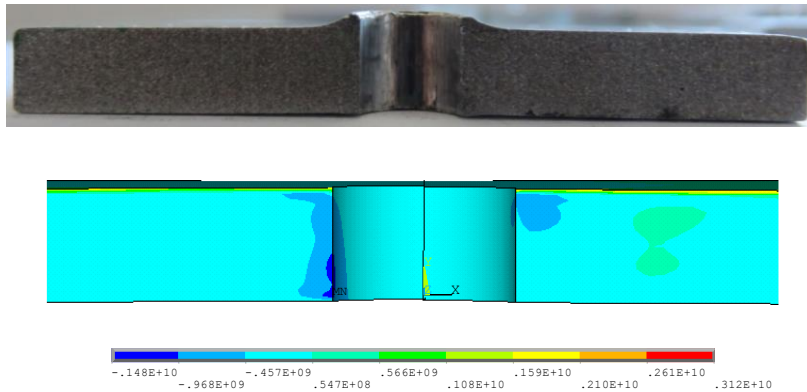


Figura 5-18 Bulto de 1.13mm provocado por 3EDO 14.5%

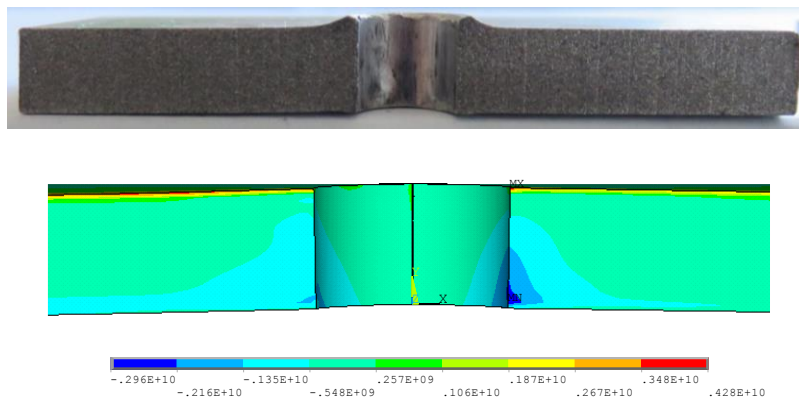


Figura 5-19 Bulto de 0.86mm provocado por 3EMS 14.5%

5.3 Comparación de resultados FEM y método del contorno

En esta parte se hace un comparativo de los datos obtenidos en FEM con expansión de 5% realizado en ansys 14 como lo referencia en el apéndice A, para ver más a detalle. El modelo de 2-D ANSYS nos muestra la tendencia de la gráfica de la línea roja que tiene un esfuerzo de compresión de -259MPa para FEM y -212.53MPa m-contorno; un máximo de tensión en 56.55MPa en FEM y 35.40MPa m-contorno medio, ver figura 5-19.

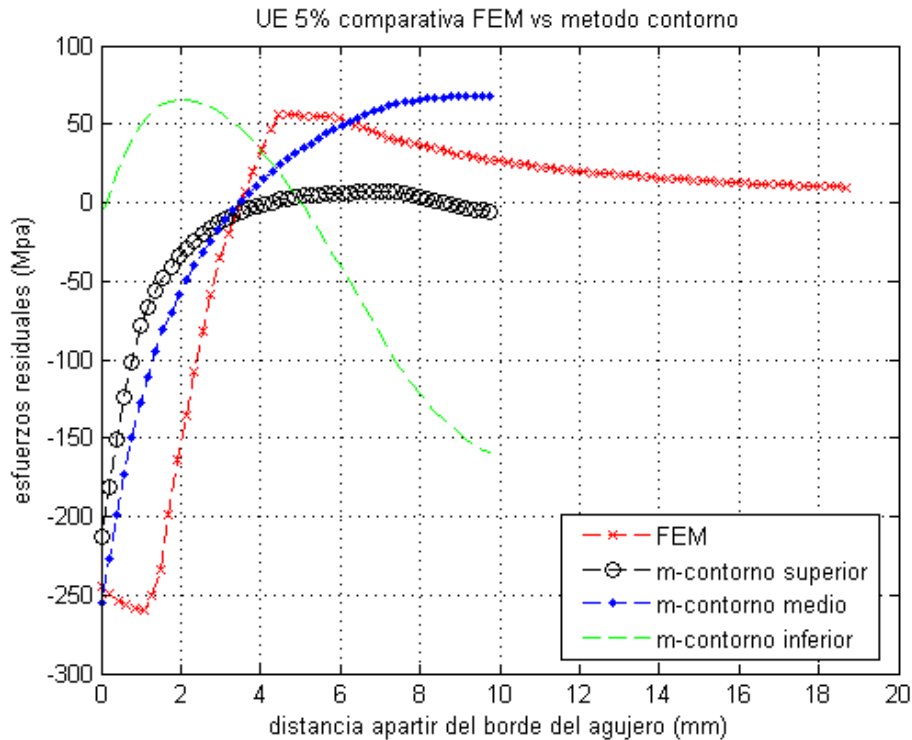


Figura 5-20 Comparación de los perfiles de esfuerzo residual a diferentes profundidades determinadas por el método de contorno y los obtenidos por una simulación FE. Única Expansión en frío de 5%

En la tabla 5.1 se puede apreciar la comparativa de esfuerzos máximos de tensión y esfuerzo mínimo de compresión obtenidos por FEM y método del contorno. Podemos observar que el mismo comportamiento se dio en el método del contorno en la parte media y parte superior. Este análisis nos indica que tiene similitud tanto en el método del contorno como la simulación FEM, lo que nos garantiza una veracidad en la experimentación.

Un análisis no lineal fue realizado en el código Ansys. Fueron usados elementos isoparamétricos con 8 nodos en dos dimensiones. Se asumieron las condiciones en el plano de esfuerzos. Un modelo no lineal de la curva experimental de esfuerzo deformación fue considerado. El mallado es mostrado en la figura A-1(a), porque es simétrico; solo es considerada la parte superior y en la figura A-1(b) muestra la distribución de esfuerzos residuales de von Mises.

En la figura A-1(a) muestra las condiciones de frontera para el caso de agujero abierto; sin embargo, la sujeción del orificio puede ser obtenido por restricción de los desplazamientos de

la cara expandida; ambas situaciones son analizadas en la figura 5 -20 que muestra los esfuerzos residuales tangenciales del componente obtenido por el análisis de elemento finito de 2D.

Tabla 5-1 Comparación de esfuerzos obtenidos de FEM y método del contorno

Comparación	Máximo de tensión (MPa)	Mínimo de compresión (MPa)
FEM 5%	56.55	-259.85
M. Contorno UE5%	35.40	-212.53

5.4 Análisis de regresión múltiple en probetas

Se hizo un análisis de regresión múltiple con los datos de la nube de puntos recibidos de la máquina de coordenadas CCM, para las probetas que se le aplicó la expansión en sus diferentes direcciones y grados de expansión. Analizando la regresión para 5% en UE5%, 2EDO5%, 2EMS, 3EDO5%, 3EMS5% obtenemos un coeficiente de correlación múltiple R^2 0.46, lo que indica poca asociación entre el conjunto de las variables dependientes e independientes ante la expansión en frío de 5%, el 46.65% es la variación de los grados de expansión obtenidos y el 53.35% es el porcentaje del error aleatorio o variables no incluidas en el análisis, o la variación de otra fuente producida por la expansión en frío.

$$1-R^2= 1-0.46= 53.35\%$$

La ecuación de regresión estimada es

$$0.009+41.87X_1-308.529X_2-200.107X_3-241.823X_4-155.09X_5$$

Es posible demostrar la capacidad de las variables dependientes X_1, X_2, \dots, X_k para explicar el comportamiento de la variable dependiente Y . Para lograr esto es posible haciendo una prueba global, mediante esta prueba se investiga si es posible que todas las variables independientes tengan coeficiente de regresión cero de forma independiente[33]. Al aplicar la regresión múltiple obtuvimos una tabla anova ver tabla 5.2

Tabla 5-2 ANOVA para 5% diferentes grados de expansión

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	0.01896017	0.003792034	173.78607	6.93E-133
Residuos	994	0.02168921	2.18201E-05		
Total	999	0.04064938			

Los detalles de la prueba global son los siguientes

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5$$

$$H_1: \text{No todas las } \beta_i = 0$$

La tabla ANOVA entrega un valor F, lo cual nos indica que es menor al valor significativo 0.05, por lo que rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa, por lo que podemos concluir que cuando menos uno de los coeficientes de regresión es distinto a cero.

El siguiente paso es analizar la prueba de coeficientes de regresión de forma individual. Se desea saber si uno o ambos de los coeficientes de regresión son diferentes de cero. La hipótesis nula y alternativa para cada uno de las variables independientes son explicadas en la tabla 5.3 y la evaluación de los coeficientes individuales, por lo tanto se considera eliminar la variable X_1 y mantener las demás variables, lo que indica que no cumple con la condición. Por lo tanto, no es tanto razonable considerar 2EDO como un coeficiente de expansión ideal.

Tabla 5-3 Evaluación de los coeficientes de regresión individuales 5%.

Ho:	H1:	Probabilidad				
$\beta_1=0$	$\beta_1 \neq 0$	0.179421452	FALSO	X_1	2EDO5%	Descartar
$\beta_2=0$	$\beta_2 \neq 0$	1.49868E-19	VERDADERO	X_2	3EMS5%	
$\beta_3=0$	$\beta_3 \neq 0$	2.13689E-08	VERDADERO	X_3	3EDO5%	
$\beta_4=0$	$\beta_4 \neq 0$	1.52469E-12	VERDADERO	X_4	2EMS5%	
$\beta_5=0$	$\beta_5 \neq 0$	1.34723E-17	VERDADERO	X_5	UE5%	

Para el caso de la regresión de 14.5% en UE14.5%, 2EDO14.5%, 2EMS14.5%, 3EDO14.5%, 3EMS14.5% obtenemos un coeficiente de correlación múltiple R^2 0.6, lo que indica mayor asociación entre el conjunto de las variables dependientes e independientes ante la expansión en frío de 14.5%, el 60.20% es la variación de los grados de expansión obtenidos y el 39.99% es el porcentaje del error aleatorio o variables no incluidas en el análisis, o la variación de otra fuente producida por la expansión en frío.

La ecuación de regresión estimada para 14.5% es

$$0.01077-33.97X_1-290.44X_2-2.1455X_3+126.46X_4-35.36X_5$$

Al aplicar la regresión múltiple obtuvimos una tabla anova ver tabla 5.4 y los detalles de la prueba global son los siguientes[33]

$$H_0: \beta_1=\beta_2=\beta_3=\beta_4=\beta_5$$

$$H_1: \text{No todas las } \beta_i=0$$

En la tabla ANOVA entrega un valor F de 5.102E-196, nos indica es menor al valor significativo de 0.05, por lo tanto, aceptamos la hipótesis alternativa y rechazamos la hipótesis nula, por lo que podemos concluir que cuando menos uno de los coeficientes de regresión es distinto de cero.

Tabla 5-4 ANOVA para 14.5% diferentes grados de expansión

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	0.024472943	0.004894589	300.7598	5.1026E-196
Residuos	994	0.016176432	1.62741E-05		
Total	999	0.040649375			

Tabla 5.5 Evaluación de los coeficientes de regresión individuales 14.5%.

Ho:	H1:	<i>Probabilidad</i>				
$\beta_1=0$	$\beta_1 \neq 0$	0.001324454	VERDADERO	X_1	3EMS	14.5%
$\beta_2=0$	$\beta_2 \neq 0$	2.75853E-38	VERDADERO	X_2	2EMS	14.5%
$\beta_3=0$	$\beta_3 \neq 0$	0.946643943	FALSO	X_3	2EDO	14.5% descartar
$\beta_4=0$	$\beta_4 \neq 0$	5.73134E-46	VERDADERO	X_4	3EDO	14.5%
$\beta_5=0$	$\beta_5 \neq 0$	0.073778237	FALSO	X_5	UE	14.5% descartar

Para el siguiente paso es analizar la prueba de coeficientes de regresión de forma individual. Se desea saber si uno o ambos de los coeficientes de regresión son diferentes de cero, para esto aplicamos la hipótesis nula y alternativa para cada una de las variables que se aprecia en la tabla 5.5. Revisando cada uno de los datos descartamos X_3 que es 2EDO y X_5 que es UE, por lo tanto se considera mantener las demás variables, y eliminar la de única expansión, lo cual sería demostrar que el experimento desde la primera expansión tiene datos bastante diferentes que alteran el resultado.

5.5 Resumen

Este estudio ha demostrado que la expansión en frío consigue forzar directamente el ajuste de una bola a través de un agujero y que la tracción sustancial de tensiones residuales puede ocurrir en una ubicación de entrada del agujero. En lugar de anular el efecto de la concentración de esfuerzos del agujero, como se pretende, esto puede tener el efecto contrario y exagerar el elevador de esfuerzo. Esto puede reducir de este modo la resistencia a la fatiga de un orificio de fijación en lugar de aumentarlo.

Las distribuciones de tensiones tangenciales residuales obtenidos en las gráficas para diferentes grados de expansión a 5% observamos que es más conveniente la UE tanto en la parte superior como en la parte inferior en figura 5-7 y 5-9 muestra que las magnitudes de tensión residual son diferentes en la cara de entrada, como en la salida, pero mantienen esfuerzo de compresión favorables. Esto es contrario al estado ideal, como se muestra en la Figura 5-7 y 5-9 es motivo de preocupación ya que el esfuerzo residual llega a magnitudes de hasta 500 MPa por el grado de expansión tan amplio en 2EMS, 3EDO, 2EDO. Esto puede tener una profunda influencia en la probabilidad de crear micro grietas en un agujero de fijación y ayudaría a explicar que no existe ventaja en una expansión tan amplia. El análisis realizado en la regresión múltiple de 5% para los diferentes grados de expansión X_1 como la variable de 2EDO y fue descartada debido a que no es una expansión ideal y manteniendo las demás, pero el coeficiente de correlación nos muestra que las variables de expansión son muy independientes y diferentes de cero lo que no hay una relación en cada expansión porque cada una tiene sus diferentes variables como lo pudimos observar en las gráficas entregadas 5-7, 5-8 y 5-9; las tablas de regresión múltiple 5.2 y 5.3 Por otra parte, si se hubiera tratado de una expansión de 14.5% hubiera resultado favorable aplicar 2EDO porque entrega valores gráficos más uniformes en esfuerzos residuales de compresión. Comparando el análisis gráfico que entrega la figura 5-4 y 5-6 para 5%, pudimos notar que en la expansión única en la parte superior son favorables los esfuerzos en la parte media e inferior. Por lo tanto, la expansión en frío para 5% es el más propicio para que los esfuerzos sean adecuados y se cumpla las condiciones perseguidas en este proyecto. Sin embargo, para la expansión de 14.5% no se tuvieron respuestas positivas al analizar la regresión múltiple ya que las variables X_3 que es 2EDO y X_5 que es UE son descartadas y desde un inicio

la de única expansión, por lo que la inclinación hacia este resultado es nula e inaceptable desde el punto de vista estadístico que coincide con las gráficas obtenidas en los esfuerzos residuales. Por otra parte, al comparar los esfuerzos residuales máximos de tensión y mínimos de compresión obtenidos por FEM y método del contorno que se muestra en la tabla 5.1 y la figura 5-20 nos indica que tienen un comportamiento similar.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

En el presente capítulo se dará una descripción breve de las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto para analizar los resultados obtenidos a fin de tener una visión clara y precisa como una propuesta para trabajos futuros.

6.1 Conclusiones

El proceso de expansión en frío implica ampliar el agujero más allá del rendimiento local con el objetivo de producir esfuerzos residuales de compresión alrededor de la circunferencia y una vez que se retira la carga, causando la expansión. Por lo general si esto se logra la carga puede ser deseable ya que ayuda a contrarrestar el efecto de la concentración de esfuerzos residuales localizados y por lo tanto reducir la probabilidad de daños por fatiga. Cuando los diámetros de la esfera son más grandes que los agujeros pueden causar presiones suficientemente altas a comparación de diámetros pequeños. [17]

Durante la expansión de agujeros no achaflanados, la entrada y salida del agujero se deforman sin ningún tipo de limitaciones; por lo tanto, estas superficies se mueven libremente en la dirección axial. [2]

Al ser este un método destructivo se obtuvieron las mediciones de cada una de las expansiones realizadas en sus diferentes etapas como es la expansión en frío en 3 sentidos misma dirección y en sentido opuesto con la finalidad de incrementar los esfuerzos residuales de tensión en la zona del barreno manejando un porcentaje de 5% y 14.5%.

Sin duda alguna el método del contorno es un método que permite tomar mediciones físicas y obtener resultados más certeros experimentalmente como pudimos notar desde la primera expansión que para GE5% solo era suficiente con única expansión a diferencia que 14.5% que cambio de forma positiva la iteración del balón en 2EDO, mas sin embargo el grado de expansión no es el ideal para aplicarlo por el incremento de esfuerzos residuales en única expansión 14.5% como lo pudimos notar en las gráficas y en el análisis de regresión múltiple, pero por el lado contrario pudimos notar que la iteración del balón que atravesó el orificio si presento datos gráficos variables y es un tanto perjudicial la expansión en un mismo sentido en 3EMS y 2EMS a diferencia de 2EDO porque este distribuye mejor los esfuerzos residuales pasando el balón del mismo diámetro a través del agujero.

6.2 Trabajo Futuro.

En futuros trabajos pueden aplicar este método para posibles soluciones a fallas cíclicas y en caso de tener grados de expansión muchos mayores no será necesario manejar diferentes grados de expansión en una misma probeta, será suficiente con aplicar el mismo balín en diferentes direcciones y este resultará una forma favorable para ganar ciclos de vida del componente. Adicionalmente este campo de la expansión en frío y el método de contorno aún tienen más por explorarse y es un tema interesante porque la mayoría de los componentes mecánicos están unidos por agujeros donde pasan tornillos que pueden afectar la vida útil del componente.

APÉNDICES

APÉNDICE A

FE Modelado de la expansión en frío

1.1 Modelado

El experimento de tensión estática ha sido llevado a cabo por medio del estudio de elemento finito. El material usado fue de aluminio 6061-T6. Este es una especificación del material en donde es una aleación baja y es isotrópico por simplicidad. El balín fue hecho de acero.

Para el experimento de pasar el balín en el aluminio con un espesor de 5mm del material cortado como fue especificado y la separación del centro con el material modelado es el diámetro hecho con el taladro de 6mm especificados para cada uno. El diámetro del balín que fue forzado a través del agujero es de 6.3mm de diámetro; esto es igual para el barreno a un coeficiente de expansión de 5%.

1.1.1 FEM geometría

Una placa de forma anular fue elegida para el modelo de elementos finitos en lugar de una placa rectangular con un agujero central (tal como se utiliza para la muestra de prueba), ya que permite un elemento de simetría axial malla para ser utilizado, como se muestra en la Figura A-1. Esto se consideró justificado debido a que el comportamiento de tensión en la región del agujero es la misma en ambas formas de placas y la facilidad en el modelado de una placa circular ofrece ventajas considerables.

1.1.2 Condiciones de frontera

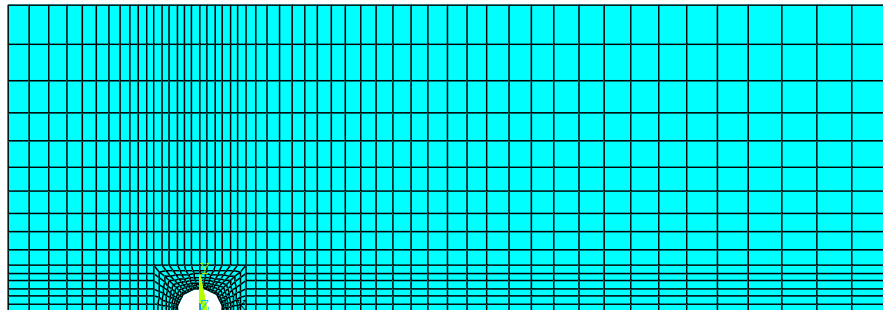
Fue usado un análisis no lineal para simular el proceso de la expansión en frío. El elemento isoparamétricos de 2-D con 8 nodos fue utilizado y un modelo multilineal de la curva esfuerzo-deformación se consideró junto a la simulación ansys. [28]

En la figura A-1 a) se aprecia el mallado aplicado y debido a la simetría solo se consideró la parte media superior de la pieza. Las condiciones de esfuerzo planas fueron aplicadas para la cara de la placa, se asumieron las condiciones de esfuerzos en el plano. El proceso consiste en una expansión radial uniforme de los nodos en la superficie del agujero, un cambio desde el control de desplazamiento hasta el control de la fuerza fueron aplicadas, finalmente se eliminan las fuerzas en los nodos de la superficie del agujero y el esfuerzo residual es calculada.[32]

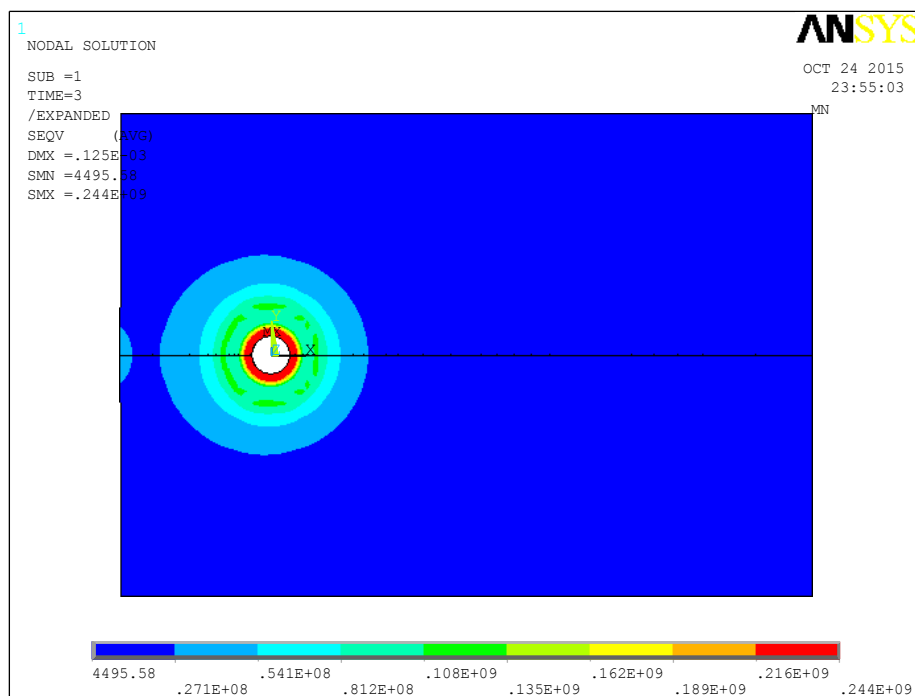
Considere una placa rectangular con un agujero central que se expandió en un porcentaje de 5% CE. La distribución de la tensión residual se muestra en la Figura A-1 b).

1.1.3 Simulación paso a paso

Conocido el fenómeno de mi experimentación, y en base a lo que se requiere se prosiguió a modelar la placa y el balín que pasara a través de mi barreno como se aprecia en la figura A-1 a). Ya obtenido esos resultados se prosiguió a establecer las condiciones de frontera donde se limitó el movimiento de la placa en el eje x, creando una simetría, para expandir en la superficie circular donde pasara el balín. Para lograrlo se siguieron una serie de pasos para dar movimiento de desplazamiento largo estático con un número de pasos de 30, una máxima de 50 y mínima de 20. Y la solución nos dio los esfuerzos obtenidos por la deformación para proseguir a seleccionar las rutas analizar, similar al procedimiento ejecutado en el método del contorno como lo describe el capítulo 4.[34]



(a)



(b)

Figura A-1 (a) Discretización en 2-D de elementos finitos de la muestra. (b) campo de tensión residual (von Mises) después de la expansión en frío de un agujero expandido al 5%

1.1.4 Mallado

El mallado fue usado en cuadrilátero y se dividió en dos áreas en franja para hacer más fino el mallado, la primer área es la que va a resultar afectada cuando pasa el balón a través de la placa por ese motivo se utilizó una malla Quad, mapped en el programa de ansys lo encontramos en la barra mesh tool, se dividió la malla en 0.25mm de espacio al igual que en el método del contorno, como se observa en la figura A-1 a).[35]

1.1.5 Elementos de modelado elástico-plástico

En este modelo se utilizó PLANE 82 que es un elemento solido estructural 2-D se define por 8 nodos que tienen dos grados de libertad en cada nodo: traslaciones en los X nodales y direcciones y. Este elemento puede ser utilizado como un elemento de plano o como un elemento de simetría axial; tiene plasticidad, fluencia, esfuerzo de rigidez y sobre todo la capacidad de deformación a gran tamaño.

El PLANE82 proporciona resultados más precisos para mallas en automático (cuadrilátero-triangular), puede tolerar formas irregulares sin tanta pérdida de precisión. Los elementos de ocho nodos tienen formas de desplazamiento compatibles y son muy adecuadas para modelar límites curvos.

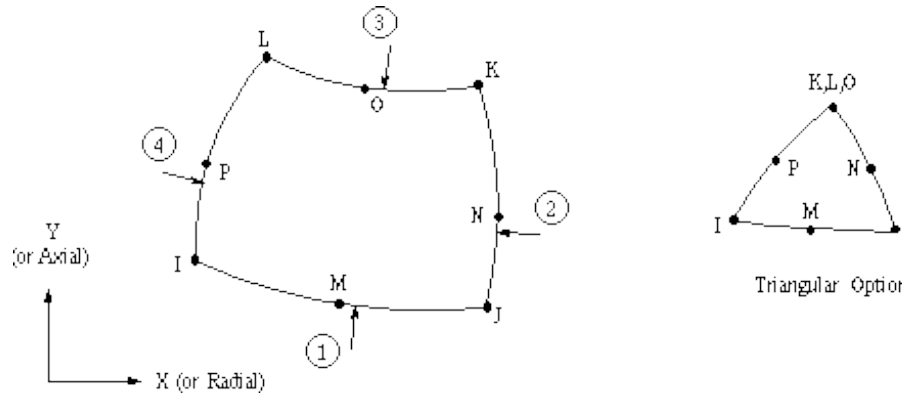


Figura A-2 Elemento PLANE82

1.2 Elementos de entrada ANSYS

En la figura A-1 b) muestra la distribución de esfuerzo residual de von misses y esta es definida por

$$s_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(s_{xx} - s_{yy})^2 + (s_{yy} - s_{zz})^2 + (s_{xx} - s_{zz})^2 + 6(s_{xy}^2 + s_{yz}^2 + s_{xz}^2) \right]^{1/2}$$

Donde S_{ij} son componentes de esfuerzo tensor. Para este análisis de expansión en frío fue de 5% con un diámetro de 6mm. Podemos observar en la Figura A-1 (b) la compresión distribución del esfuerzo tangencial residual.

Las distribuciones de tensiones tangenciales residuales obtenidos por análisis de elementos finitos se muestran en la Figura A-1 b) Esta figura muestra que las magnitudes de tensión residual son significativas en la cara de entrada, los esfuerzos residuales (von mises) después de la expansión y se puede apreciar en el borde del agujero en la superficie de entrada. La influencia favorable de estos esfuerzos de compresión. En el capítulo 5 se explica la comparativa de ambos con el método del contorno y FEM ver grafico de la figura 5.

APÉNDICE B

El código fuente matlab `nega_positivo.m` es un programa diseñado para dividir los datos negativos del lado izquierdo y positivos del lado derecho entregado por la nube de puntos con la máquina de coordenadas CMM.

```
% Primer calíz para dividir datos positivos y negativos Medicion4.txt
```

```
clear all
```

```
close all
```

```
clc
```

```
load pr.txt
```

```
pos=[];
```

```
neg=[];
```

```
for i=1:size(prob3,1);
```

```
    if prob3(i,1)<0
```

```
        neg=[neg; prob3(i,:)];
```

```
    else
```

```
        pos=[pos; prob3(i,:)];
```

```
    end
```

```
end
```

```
dlmwrite('Xpos1.txt',pos,'delimiter',' ','precision',6)
```

```
dlmwrite('Xneg1.txt',neg,'delimiter',' ','precision',6)
```

APÉNDICE C

El código fuente matlab suavizados_pos.m es un programa que permite suavizar los datos del lado positivo y suavizados_neg.m permite suavizar los datos del lado negativo de la nube de puntos entregado por la máquina de coordenadas ‘datos crudos’ los cuales se pueden apreciar en el capítulo 4 en la figura 4-8.

```
%% Programa suavizado

clear all

close all

clc

%% Carga los datos crudos de uno de los lados

load Xpos1.txt % En el siguiente orden (X,Y,Z) (para negativos Xneg1.txt)

[m,n]=size(Xpos1); % Tamaño de los datos (m x n)

X=Xpos1(:,1); % Coordenadas X

Y=Xpos1(:,2); % Coordenadas Y

Z=Xpos1(:,3); % Coordendas Z = UZ sin suavizar

%% Figura que grafica los datos crudos (solo visual)

figure(1)

plot3(X,Y,Z,'o')

axis on

grid on

hold on

tri=delaunay(X,Y);
```

```

trimesh(tri,X,Y,Z)

xlabel('Eje X')

ylabel('Eje Y')

zlabel('Eje Z')

title('Superficie:Datos Crudos')

%% Suavizado en los planos Y-Z % ----- Ordenar Datos -----

Mitchie=X(1:40); % Contiene los valores a buscar (X)

Demi=[]; % Contiene los valores (X,y,Z) ordenadas respecto al barrido de y

for j=1:40

    for l=1:1000

        if Mitchie(j)==X(l,1)

            Demi=[Demi;X(l,1),Y(l,1),Z(l,1)];

        end

    end

end

% -----

Zzb=[];

mo=40; % Es el numero de planos Y-Z (igual al numero de mediciones en X)

intervalo=1:25:1000 % Vector con los pasos (agrupa 40 datos en X)

X1=Demi(:,1);

Y1=Demi(:,2);

```

```

Z1=Demi(:,3);

for i=1:mo

x=X1(intervalo(i):intervalo(i)+24)

y=Y1(intervalo(i):intervalo(i)+24) % Conjunto de valores y a interpolar

z=Z1(intervalo(i):intervalo(i)+24) % Conjunto de valores z a interpolar

sp1 = spap2(3,6,y,z);          % Funcion de ajuste spline

Zb = fnval(sp1,y);            % Evalua la funcion en los valores de x (no interpola)

Zzb=[Zzb;Zb];                % Vector con los valores de Z totalmente suavizados

figure(2)

plot(y,z,'*',y,Zb,'+r')

xlabel('Eje Y')

ylabel('Eje Z')

title('Plano Y - Z')

end

Bella=[X1,Y1,Zzb];          % Vector con los valores suavizados

figure(3)

tri=delaunay(X1,Y1);

trimesh(tri,X1,Y1,Zzb)

hold on

plot3(X,Y,Z,'o')

axis on

```

```

grid on

xlabel('Eje X')

ylabel('Eje Y')

zlabel('Eje Z')

title('Superficies:Datos Crudos vs Datos Suavizados Primera Ronda')

%% Suavizado en los planos X-Z

x=[];

z=[];

Zza=[];

X2=[Bella(:,1)];

Y2=[Bella(:,2)];

Z2=[Bella(:,3)];

% -----

no=25          % Es el numero de planos X-Z (igual al numero de mediciones en Y)

intervalo=1:40:1000  % Vector con los pasos (agrupa 40 datos en X)

% -----

%-----ORDENAR DATOS

ashley=Y2(1:25);

sunny=[];

for j=1:25

    for l=1:1000

```

```

if ashley(j)==Y2(1,1)

    sunny=[sunny;X2(1,1),Y2(1,1),Z2(1,1)];

end

end

end

sunny; %Contiene los datos ordenados

%-----

X2=[sunny(:,1)];

Y2=[sunny(:,2)];

Z2=[sunny(:,3)];

for i=1:no

    y=Y2(intervalo(i):intervalo(i)+39);

    x=X2(intervalo(i):intervalo(i)+39); % Conjunto de valores x a interpolar

    z=Z2(intervalo(i):intervalo(i)+39); % Conjunto de valores z a interpolar

    sp = spap2(3,4,x,z);          % Funcion de ajuste spline

    Za = fnval(sp,x);            % Evalua la funcion en los valores de x (no interpola)

    Zza=[Zza;Za];                % Vector con los valores de Z suavizados

    figure(4)

    plot(x,z,'o',x,Za, '*')

    xlabel('Eje X')

    ylabel('Eje Z')

```

```
title('Plano X - Z')

end

%% Graficas

Cammy=[X2,Y2,Zza];

figure(5)

tri=delaunay(X2,Y2);

trimesh(tri,X2,Y2,Zza)

hold on

axis on

grid on

plot3(X,Y,Z,'or')

plot3(X2,Y2,Zza,'*')

xlabel('Eje X')

ylabel('Eje Y')

zlabel('Eje Z')

title('Superficies:Datos Crudos vs Datos Suavizados (Final)')

%% Tarar a cero e invertir los desplazamientos.

%MINU = min(Cammy(:,3));

for i= 1:1000;

    ZZZ(i,1)= (Cammy(i,3))*-1;

end
```

```
%% Exportar datos

FINAL= [Cammy(:,1), Cammy(:,2), ZZZ] %Matriz Final

dlmwrite('datossuavizados1.txt',FINAL,'delimiter',' ','precision',6)

figure(6)

tri=delaunay(FINAL(:,1),FINAL(:,2));

trimesh(tri,FINAL(:,1),FINAL(:,2),FINAL(:,3))

hold on

axis on

grid on

plot3(Cammy(:,1),Cammy(:,2),Cammy(:,3),'or')
```

APÉNDICE D

Programa ANSYS para cálculo de esfuerzos residuales.

% Primer calíz para tratamiento de datos Medicion1.txt

clear all

close all

clc

PrM=0;

C=[];

load datossuavizados1.txt

load datossuavizados2.txt

DLO=[datossuavizados1;datossuavizados2];

%Medicion1 es tres columnas en cuya tercera columna está el perfil medido

%que se ingresa a Ansys

X=DLO(:,1);

Y=DLO(:,2);

Z=DLO(:,3);

M=[DLO(:,1),DLO(:,2),DLO(:,3)];

t3='node';

t4='=node(';

t5='0)';

```

for i=1:2000

x=num2str(M(i,1));

y=num2str(M(i,2));

d=num2str(M(i,3));

cont=num2str(i);

%esta linea crea el parametro nodoi, asignandole su numeracion de ansys

PrM=strcat(t3,cont,t4,x,',',y,',',t5);

C=[C; cellstr(PrM)];

%estas lineas le aplican el desplazamiento al nodo correspondiente

PrM='FLST,2,1,1,ORDE,1';

C=[C;cellstr(PrM)];

PrM=strcat('FITEM,2,node',cont);

C=[C; cellstr(PrM)];

PrM='/GO';

C=[C; cellstr(PrM)];

PrM=strcat('D,P51X, ',d,', , , ,UZ, , , , ');

C=[C; cellstr(PrM)];

end

writevar(C,1,'Datos Vielka.xlsx');

%El comando clave en ansys es "nodenumber=node(x,y,z)"

dlmwrite('demilovato.txt',DLO,'delimiter',',','precision',6)

```

```

%%%%%% writevar:

function writevar(x,k,filename)

col = char(64+k);

N = size(x,1);

Rg = sprintf([col '1:' col '%i' ],N);

xlswrite(filename,x,Rg);

end

%%%%%%%%

```

SE INTRODUCEN LOS DESPLAZAMIENTOS GENERADOS EN MATLAB.PARA NO AGREGAR TODO EL PROGRAMA SOLO SE PONEN LOS PRIMEROS Y ULTIMOS DESPLAZAMIENTOS YA QUE SON 2000 DESPLAZAMIENTOS GENERADOS

```

node1=node(0.025,0.0002,0)
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,node1
/GO
D,P51X, ,7.7461e-006, , , ,UZ, , , ,
node2=node(0.024,0.0002,0)
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,node2
/GO
D,P51X, ,5.3136e-006, , , ,UZ, , , ,

```

ESTOS SON LOS COMANDOS GENERADOS POR EL PROGRAMA MATLAB PARA SER INGRESADOS A LA ENTRADA DE ANSYS COMO SE EXPLICA EN EL CAPITULO 4 EN LA SECCION 4.4.1.6 EXTRACCION, VISUALIZACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Ismonov, S. R. Daniewicz, J. C. Newman, M. R. Hill, and M. R. Urban, “Three Dimensional Finite Element Analysis of a Split-Sleeve Cold Expansion Process,” *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 131, no. 3, p. 031007, 2009.
- [2] J.-S. Jang, D. Kim, and M.-R. Cho, “The Effect of Cold Expansion on the Fatigue Life of the Chamfered Holes,” *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 130, no. 3, p. 031014, 2008.
- [3] G. Johnson, “Residual Stress Measurements Using the Contour Method,” University of Manchester for degree of Ph.D., 2008.
- [4] M. B. Prime and A. L. Kastengren, “The Contour Method Cutting Assumption : Error Minimization and Correction,” *Exp. Appl. Mech.*, vol. 6, pp. 233–250, 2011.
- [5] M. B. Prime, “Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour After a Cut,” *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 123, no. 2, p. 162, 2001.
- [6] P. Pagliaro, M. B. Prime, H. Swenson, and B. Zuccarello, “Measuring multiple residual-stress components using the Contour method and multiple cuts,” *Exp. Mech.*, vol. 50, no. 2, pp. 187–194, 2010.
- [7] S. Pasta and G. V. Mariotti, “Effect of residual stresses and their redistribution on the fatigue crack growth in cold-worked holes,” *Int. Conf. CRACK PATHS (CP 2009)*, pp. 895–902, 2009.
- [8] A. Alejandro, M. Castillo, R. L. Arroyo, J. S. G. Miranda, and L. Daniel, “análisis numérico de esfuerzos residuales en un elemento pre-agrietado después del proceso de expansión en frío,” *XVII Congr. Int. Anu. somim*, pp. 92–102, 2011.
- [9] R. Seifi, M. H. Zolfaghari, and A. Shirazi, “Experimental and numerical study of residual stresses caused by cold expansion of adjacent holes,” *Meccanica*, vol. 49, no. 3, pp. 687–706, 2013.

-
- [10] R. Seifi, “Accuracy of Numerical Methods in Determination of Residual Stresses Due to Cold Expansion in Metallic Materials,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 64, no. 4–5, pp. 465–469, Dec. 2011.
- [11] S. J. Houghton, S. K. Campbell, and A. D. James, “Investigations into the Fatigue Enhancement Provided by the Hole Cold Expansion Process Using Accurate 3D FEA Simulations and Fatigue Testing,” no. June, pp. 839–853, 2011.
- [12] P. Pagliaro, M. B. Prime, J. S. Robinson, B. Clausen, H. Swenson, M. Steinzig, and B. Zuccarello, “Measuring Inaccessible Residual Stresses Using Multiple Methods and Superposition,” *Exp. Mech.*, vol. 51, no. 7, pp. 1123–1134, 2011.
- [13] M. B. Prime and A. T. Dewald, “The Contour Method,” *Pract. Residual Stress Meas. Methods*, vol. Chapter 5, pp. 109–138, 2013.
- [14] M. Howes, T. Inoue, and M. Park, “Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel Edited by,” *Mater. Sci.*, vol. 06700G, 2002.
- [15] F. a Kandil, J. D. Lord, a T. Fry, and P. V Grant, “A review of residual stress measurement methods - A guide to technical selection,” United Kingdom, 2001.
- [16] G. S. Schajer and C. O. Ruud, “Overview of Residual Stresses and Their Measurement CO,” Canada, 2013.
- [17] J. M. M. J. Vogwell, T Navid-Chakherlou, “The Effect of Cold Expansion on the Fatigue resistance of fastener holes,” *10th Int. Congr. Fract.*, vol. 130, no. 3, p. 7, 2008.
- [18] R. W. Fitzgerald, *Mecánica de materiales*, Primera ed. Colombia: Fondo Educativo Interamericano, 2000.
- [19] G. S. Schajer, *Practical Residual Stress Measurement Methods*, Firts., vol. 4, no. September. United Kingdom, 2013.

-
- [20] O. S. Zaroog, C. Yap, W. Ken, A. Noorlina, and A. Manap, “Current and Challenge of Residual Stress Measurement Techniques,” *Int. J. Sci. Res.*, vol. 3, no. 9, pp. 210–216, 2014.
- [21] M. B. Prime, R. J. Sebring, J. M. Edwards, D. J. Hughes, and P. J. Webster, “Erratum to ‘Laser Surface-contouring and Spline Data-smoothing for Residual Stress Measurement,’” *Exp. Mech.*, vol. 44, no. 5, pp. 541–541, 2004.
- [22] V. Richter-Trummer, P. M. G. P. Moreira, J. Ribeiro, and P. M. S. T. de Castro, “The Contour Method for Residual Stress Determination Applied to an AA6082-T6 Friction Stir Butt Weld,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 681, pp. 177–181, 2011.
- [23] Y. Traore, S. Paddea, P. J. Bouchard, and M. a. Gharghouri, “Measurement of the Residual Stress Tensor in a Compact Tension Weld Specimen,” *Exp. Mech.*, vol. 53, no. 4, pp. 605–618, 2013.
- [24] M. B. Prime, M. A. Newborn, A. Technology, and J. A. Balog, “Quenching and Cold-Work Residual Stresses in Aluminum Hand Forgings : Contour Method Measurement and FEM Prediction,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 426–432, pp. 435–440, 2003.
- [25] A. T. DeWald and M. R. Hill, “Method for Mapping Multi-Axial Residual Stresses in Continuously-Processed Bodies,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 524–525, no. 4, pp. 473–490, 2006.
- [26] Mathworks, “MATLAB Programming Fundamentals.” Natick, MA, p. 1064, 2014.
- [27] M. B. Prime and M. R. Hill, “Uncertainty, Model Error, and Order Selection for Series-Expanded, Residual-Stress Inverse Solutions,” *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 128, no. 2, p. 175, 2006.
- [28] L. S. (Eds. . Horst Czichos, Tetsuya Saito, *Handbook of Metrology and Testing*, 2nd ed. USA, 2011.

-
- [29] M. H. Gozin, “Cold Work Simulation of Hole Expansion Process and Its Effect on Crack Closure,” vol. 1, no. 1, pp. 11–23, 2014.
- [30] J. T. Maximov, G. V. Duncheva, N. Ganev, and I. M. Amudjev, “Modeling of residual stress distribution around fastener holes in thin plates after symmetric cold expansion,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 355–369, 2013.
- [31] V. Nigrelli and S. Pasta, “Finite-element simulation of residual stress induced by split-sleeve cold-expansion process of holes,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 205, no. 1–3, pp. 290–296, 2008.
- [32] G. Mesmacque and A. Amrouche, “Effect of body geometry and material properties on residual stress distribution on arresting crack holes.,” vol. 52, no. 4, pp. 1–11, 2003.
- [33] D. A. Lind, W. G. Marchal, S. A. Wathen, and E. Mac, *Estadística Inferencial*, Decimoquin. Mexico, 2012.
- [34] C. Rubio-gonzalez, R. Ruiz, M. Nait, and A. Amrouche, “Effect of laser shock peening and cold expansion on fatigue performance of open hole samples,” vol. 53, no. 5, pp. 867–880, 2015.
- [35] M. (University O. N. D. Paisner, “ANSYS Instructions Outline,” *Text*, pp. 1–19, 2008.