

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



ESTUDIO DEL EFECTO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN EL
FENÓMENO DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA, POR MÉTODO DE HOLE-
DRILLING PARA EL PROCESO DE NIVELADO DE PLACA DE ACERO
HSLA GRADO 050

POR

ING. ÓSCAR AGUILAR DORBECKER

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

NOVIEMBRE, 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

ESTUDIO DEL EFECTO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN EL
FENÓMENO DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA, POR MÉTODO DE HOLE-
DRILLING PARA EL PROCESO DE NIVELADO DE PLACA DE ACERO
HSLA GRADO 050

POR

ING. ÓSCAR AGUILAR DORBECKER

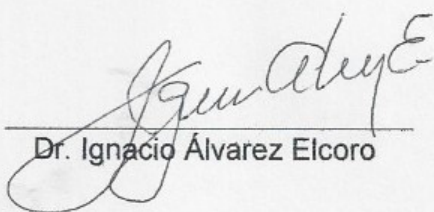
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

NOVIEMBRE, 2013

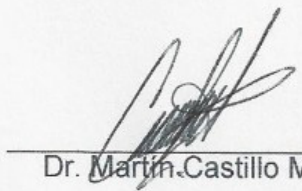
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "estudio del efecto de esfuerzos residuales en el fenómeno de recuperación elástica, por método de hole-drilling para el proceso de nivelado de placa de Acero HSLA grado 050" realizada por el Ing. Oscar Aguilar Dorbecker con matrícula 1400792 sea aceptada como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Especialidad en Materiales.

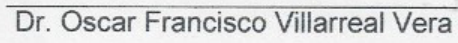
El comité de tesis



Dr. Ignacio Álvarez Elcoro



Dr. Martín Castillo Morales



Dr. Oscar Francisco Villarreal Vera

DEDICATORIA

Dedicada a Dios,

A mis padres:

Luis Manuel Aguilar Valdés y Ma. Rosario Dorbecker de Aguilar

A mi Familia, Maestros, Asesores, Amigos y Compañeros,

A la Universidad Autónoma de Nuevo León

Y al Grupo Villacero S.A de C.V

Agradecimientos

Primeramente doy gracias a Dios por darme salud y tiempo para poder realizar este trabajo, también quiero agradecer a todas las personas con las que tuve contacto durante el tiempo que estuve realizando la maestría, a todos los profesores que me dieron clases, aprendí mucho de ellos, son excelentes como personas y como docentes, gracias también a mis compañeros. En especial quiero agradecer al Dr. Ignacio Álvarez, al Dr. Martín Castillo y al Dr. Luis Leduc por haberme apoyado con paciencia y conocimientos en la realización del proyecto, también quiero agradecer al Dr. Oscar Villarreal que por parte del Grupo Villacero siempre me brindo toda la atención y apoyo solicitado, agradezco al Grupo Villacero, a la Universidad Autónoma de Nuevo León y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, porque gracias al apoyo brindado hicieron posible la realización de este proyecto. Por otra parte quiero aprovechar para dar gracias a mi Familia, a mis tíos Alfonso Cordero Peña y Esperanza Dorbecker de Cordero por haberme brindado su apoyo durante estos años, a mi tío Juan Antonio Dorbecker Aguirre porque siempre ha estado pendiente de mi trayectoria y mi persona, y por supuesto quiero agradecer a mis padres Luis Manuel Aguilar Valdés y Ma Rosario Dorbecker de Aguilar, que me han apoyado en todas las decisiones tomadas y me han aconsejado, guiado y motivado, agradezco a todas las personas familiares y amigos que me han aconsejado y motivado a terminar este trabajo. Gracias

Índice

Simbología	1
Resumen	3
CAPITULO 1	
ESFUERZOS RESIDUALES.....	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Esfuerzo axial.....	5
1.3 Esfuerzos residuales.	6
1.3.1 Clasificación de los esfuerzos residuales.....	6
1.3.2 Patrones de distribución de esfuerzo.....	7
1.3.3 Orígenes de los esfuerzos residuales.....	8
1.4 Técnicas de Medición de esfuerzos residuales.....	9
1.4.1 Difracción de Rayos X.....	9
1.4.2 Difracción de Neutrones.....	10
1.4.3 Técnica de Ultrasonido.....	11
1.4.4 Magnetostricción (Barkhausen noise).....	12
1.4.5 Técnica de orificio ciego “Hole Drilling”	13
1.4.6 Técnica de Anillo anular (Ring Core).....	14
CAPITULO 2	
PROCESOS DE CORRECCIÓN DE FORMA Y PLANEZA.....	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Defectos de forma y planeza.	16
2.2.1 Defectos por diferencia de longitud entre la superficie inferior y superior.	17
2.2.2 Defectos por diferencia de longitudes entre orillas, bordes y centro de la hoja.....	17
2.2.3 Diferencias de espesor en la sección transversal a la laminación.....	20
2.3 Efecto de Recuperación elástica, memoria de forma o Spring Back.....	21
2.4 Algunas recomendaciones para corrección de problemas de forma y planeza..	23
2.5 Proceso de Nivelado.....	26
2.5.1 Efecto de los rodillos del nivelador en el material.....	32

2.5.2 Diagramas Momento-Curvatura.....	36
2.6 Temple Mecánico	41
2.7 Nivelado por elongación.....	43

CAPITULO 3

TEORÍA DEL “HOLE DRILLING”	45
3.1 Introducción	45
3.2 Sensores indicadores de Deformación	47
3.3 Principio de Operación de una galga extensométrica	48
3.3.1 introducción	48
3.3.2 Sensores por cambios en resistividad eléctrica	49
3.3.3 Puente de Wheatstone.....	52
3.4 Principios básicos del método de “Hole-drilling”.....	55
3.5 Principales técnicas de perforación.....	56
3.5.1 Perforado a alta velocidad.	57
3.5.2 Perforado a velocidad media.....	58
3.5.3 Maquinado por chorro abrasivo	59
3.5.4 Perforado orbital a alta velocidad	60
3.6 Obtención de los esfuerzos residuales (Norma ASTM E837).....	61
3.6.1 Pieza de Trabajo delgada. (23) (Esfuerzos Uniformes).....	61
3.6.2 Cálculo de esfuerzo residual no-uniforme.....	62

CAPITULO 4

EXPERIMENTACIÓN.....	65
4.1 Introducción.....	65
4.2 Método Experimental	66
4.3 Descripción del Equipo utilizado (instrumentación)	66
4.3.1 Equipo para medir un perfil de esfuerzos residuales	66
4.3.2 Equipo utilizado en pruebas de Tensión	70
4.4 Conexiones del equipo	70
4.4.1 Ubicación del dispositivo de mecánico/óptico (taladro). Alineación.....	71
4.4.2 Detección de la superficie del material.....	73

4.4.3.- Obtención de Datos.....	74
4.4.4 Medida de diámetro y excentricidad del orificio realizado	76
4.4.5 Obtención de los valores de esfuerzo	78
4.4.6 Tiempos de vida de Brocas, turbinas y shocks	78
4.4.7 Lubricación de la Turbina.....	81
4.5 Diseño de Experimento	82
4.5.1 Material Utilizado	82
4.5.2 Evaluaciones realizadas.....	82

CAPITULO 5

RESULTADOS	93
5.1 Introducción	93
5.2 Resultados de evaluación de esfuerzo residual, utilizando muestra sin proceso, enderezada y con proceso de nivelado de precisión.	94
5.3 Resultados de esfuerzo residual obtenido en la punta, centro y cola del rollo, en distintos espesores de material nivelado.	102
5.4 Resultados obtenidos para comparar muestra procesada por el Temple mecánico con la procesada en el nivelador de precisión.	107
5.5 Resultados obtenidos de la realización de pruebas en materia que fue procesado por ambas tecnologías (nivelado de precisión y temple mecánico).	113
5.6 Ensayos de Tensión	118

CAPITULO 6

DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	122
6.1 Introducción	122
6.2 Efecto del proceso de nivelado en la distribución de los esfuerzos.	128
6.3 Evaluación del perfil de esfuerzo residual en lo ancho y largo de la placa de acero nivelada, obtenida del rollo laminado en caliente.	136
6.4 Efecto del proceso de temple mecánico sobre los esfuerzos residuales al procesar un rollo de acero.	144
6.4.1 Análisis de material con ambos procesos	148

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.....	154
7.1 Conclusiones.....	154
7.2 Recomendaciones y áreas de oportunidad.....	155
7.3 Trabajo a futuro.....	156
Bibliografía	157
Anexo I.....	160
Anexo II.....	166
Anexo III.....	167
Anexo IV	182
Anexo V	200
Anexo VI	218
Anexo VII	242
Anexo VIII	252
Anexo IX	261
Anexo X	265

Simbología

σ	Esfuerzo principal
σ_y	Esfuerzo a la cedencia
σ_{min}	Esfuerzo principal mínimo
σ_{max}	Esfuerzo principal máximo
P	Carga axial aplicada (Pa)
A	Área de aplicación de la carga (mm ²)
λ	Longitud de Onda
φ	Angulo de incidencia de un haz proyectado
ϕ	Angulo del haz reflejado
do	Distancia interplanar de la red cristalina original del material
d	Distancia interplanar de la red cristalina modificada por esfuerzo
ε	Deformación
$\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$	Deformaciones medidas por las galgas extensiométricas 1, 2, 3
ε_y	Deformación al llegar a σ_y
E	Modulo de Young
ν	Coefficiente de poisson
Mhz	Mega Hertz
K	Curvatura residual
Ky	Curvatura de cedencia
M	Momento de flexión
My	Momento de flexión a la cedencia
c	Distancia perpendicular del eje neutro al punto donde actúa la fuerza
I	Momento de inercia

t	Espesor de la placa
β	Angulo entre σ_{max} y la galga extensiométrica de referencia
Do	Diámetro del orificio
D	Diámetro principal de la roseta
R2	Radio principal de la roseta
R1	Distancia del centro de la roseta a las galgas en la roseta
GL	Longitud de la rejilla de la galga extensiométrica
Gw	Ancho de la rejilla de la galga extensiométrica
R 1,2,3,4	Resistencia eléctrica dentro del circuito del puente Wheatstone
e	Salida de voltaje
Eo	Corriente de entrada
Kc	Factor de proporcionalidad de la roseta (proveedor)
RSM6	Medidor de esfuerzo residual 6
Dx	Diámetro del orificio en el eje x
Dy	Diámetro del orificio en el eje y
e_x	Excentricidad en el eje X
e_y	Excentricidad en el eje Y
e_{Tot}	Excentricidad del orificio
φ_{exc}	Angulo de excentricidad
Lop	Lado operador
Ltrans	Lado transmisión
Smax	Esfuerzo principal máximo
Smin	Esfuerzo principal mínimo
Sy'	Esfuerzo calculado en la dirección de laminado
Sx'	Esfuerzo calculado en la dirección transversal al laminado.

Resumen

En los últimos años la demanda de acero ha ido incrementándose debido a un sin número de aplicaciones en las cuales se utiliza, esto ha llevado a desarrollar una gran variedad de aceros para satisfacer las necesidades del consumidor y la aplicación específica para la cual va a ser destinado este material. Para lograr controlar las propiedades mecánicas y estéticas ha sido necesario tener mayor control sobre los procesos industriales.

En este estudio se trabaja con un tema que últimamente ha tomado un gran auge y que no es meramente una propiedad mecánica del material, pero afecta de manera directa las propiedades del material, este tema son los esfuerzos residuales, el estudio se enfoca hacia el efecto de los esfuerzos residuales en el fenómeno de recuperación elástica en placas u hojas de acero niveladas, ya que es un fenómeno que puede afectar las dimensiones y la planicidad de las piezas al ser cortadas (laser, plasma, etc) de la hoja, que originalmente se mostraba plana.

El método "Hole-Drilling" basado en la norma ASTM E837 es utilizado para medir esfuerzos residuales en los diferentes calibres estudiados, se obtuvieron resultados aceptables validados por la misma norma. Con los resultados obtenidos se puede concluir que el nivel de esfuerzo residual en las hojas niveladas es lo suficientemente bajo y uniforme como para no causar el fenómeno de recuperación elástica al momento del corte, por motivos de relajación de esfuerzos.

Además al estudiar los esfuerzos residuales en material procesado por el nivelador de precisión comparado con el material procesado por el temple mecánico, no existe diferencia significativa en los perfiles de esfuerzos obtenidos en las pruebas realizadas.

CAPITULO 1

ESFUERZOS RESIDUALES

1.1 Introducción.

Este capítulo menciona la teoría básica de los esfuerzos residuales, con el propósito de poder comprender un poco más sobre dichos esfuerzos, tratará de responder a las preguntas: ¿Qué son los esfuerzos residuales?, ¿Qué ó como se producen?, ¿Cómo se clasifican?, ¿Cómo pueden ayudar o perjudicar a un material?, ¿Cómo se pueden medir?, ¿Se pueden reducir o eliminar?, ¿Cómo?...Y una serie de cuestiones que podrían salir a discusión cuando se habla de este tema relativamente antiguo, pero que no se le ha dado la importancia necesaria, hasta los últimos años donde se han venido tomando más en cuenta para cuestiones de diseño mecánico, debido a que tienen un papel muy importante en componentes mecánicos, debido a que si no son tomados en cuenta en los cálculos de diseño, los materiales pueden llegar a fallar inesperadamente por sobrecargas, causando en el mejor de los casos solamente pérdidas materiales. Recientemente ha tomado un mayor auge y cada vez se ha demostrado la importancia de conocer las magnitudes y características de los esfuerzos residuales en un producto terminado, debido a que han ocurrido fallas en donde el material está trabajando con cargas menores al esfuerzo de cedencia y aún así existen fallas en su funcionamiento, ha sido demostrado que los esfuerzos residuales, también conocidos como

esfuerzos remanentes, afectan en el desempeño del componente una vez que está en funcionamiento, estos esfuerzos pueden también tener efectos positivos en el material, como es el caso de los esfuerzos residuales a compresión, provocados de manera intencional en algunos materiales mediante el proceso de granallado, de esta manera se logra mejorar la resistencia a la fatiga; Por lo contrario esfuerzos residuales a tensión suelen ser perjudiciales para la vida del material, reduciendo el rango de carga aceptable, antes de pasar la zona de cedencia del material. Por lo anterior los esfuerzos residuales deben ser tomados en cuenta ampliamente en los diseños mecánicos, para evitar fallos repentinos por no tomarlos en cuenta.

1.2 Esfuerzo axial.

Esfuerzo se puede definir a grandes rasgos como la respuesta interna de un material a la aplicación de una carga externa. Esto es una fuerza que al aplicarse a un objeto es distribuida por unidad de área en la sección transversal a la dirección de la fuerza y esto se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.1)$$

Donde: σ = esfuerzo (Pa)

P = carga axial aplicada (Newtons)

A = área transversal a la dirección de la carga (mm^2)

1.3 Esfuerzos residuales.

Los esfuerzos residuales se encuentran presentes en todos los materiales rígidos, sean metálicos o no (cerámicos, polímeros, madera, vidrio) y dichos esfuerzos son el resultado de la historia de los procesos mecánicos y térmicos a los cuales ha sido sometido el material, por consiguiente hay que destacar que todos los procesos de manufactura introducen o modifican el estado de esfuerzos internos. Por lo anterior, esfuerzo residual es normalmente definido como el esfuerzo remanente que se encuentra en el cuerpo de un material sin la presencia de cargas externas u otras fuentes de esfuerzo como gradientes de temperatura los cuales pueden generar esfuerzos internos. Indiferentemente de la naturaleza y origen, estos esfuerzos se encuentran por sí mismos en equilibrio, esto quiere decir que la fuerza resultante y el momento que producen serán siempre cero. La presencia de esfuerzos residuales en un material no significa que tendrán un efecto perjudicial, para entender el efecto que tendrán en el material se debe hacer un estudio basado en las orientaciones y magnitudes de dichos esfuerzos.

1.3.1 Clasificación de los esfuerzos residuales.

Esfuerzos residuales se pueden clasificar de una manera muy general en dos tipos: esfuerzos residuales macro estructurales y esfuerzos residuales micro estructurales. Donde esfuerzos macro estructurales son aquellos generados por dilataciones térmicas o deformaciones mecánicas que ocurren en procesos de formado, gradientes térmicos durante el vaciado, soldaduras, tratamientos térmicos. Todo esto genera esfuerzos internos por las contracciones y dilataciones no uniformes y usualmente tienen efecto o están equilibrados en un volumen grande del material (varios granos). Mientras que los esfuerzos residuales micro-estructurales son aquellos resultantes de cambios a nivel atómico y son equilibrados en volúmenes muy pequeños (un

solo grano) y se pueden originar en la transformación de fases por ejemplo al transformar de una fase austenítica a fase martensítica existe un aumento en el volumen de la red cristalina lo cual provoca esfuerzo residual micro estructural.

1.3.2 Patrones de distribución de esfuerzo.

Basado en el patrón de distribución del estado de esfuerzo residual en el material, están clasificados en tres principales categorías que se muestran en la figura 1.1. La mayoría de las técnicas tradicionales para medir esfuerzos residuales miden el patrón de esfuerzo mostrado en la figura 1.1 (a) donde el esfuerzo residual es uniforme en el plano del componente, pero varia con la profundidad. Pero en situaciones reales podemos encontrar estados de esfuerzos con patrones como en la figura 1.1 (a,b y c), entonces la estimación de esfuerzos residuales puede dejar errores experimentales en ciertos casos.

(1)

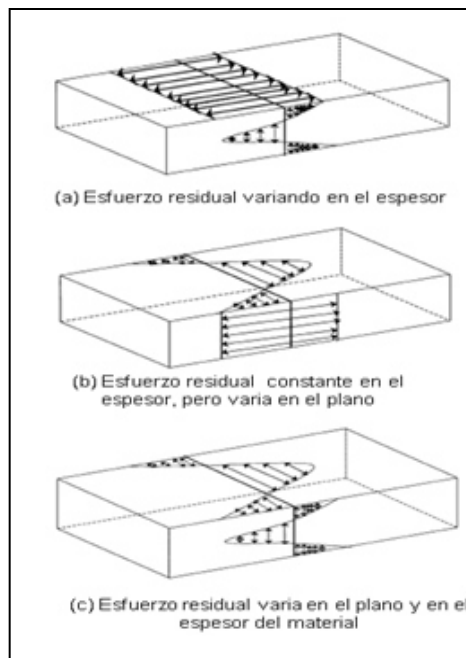


Figura 1.1 Patrones de distribución de esfuerzo residual (1)

1.3.3 Orígenes de los esfuerzos residuales.

En relación a este tema, pueden ser muy variados los procesos y/o las causas que induzcan o modifiquen esfuerzos residuales en el material. En cuanto a esfuerzos residuales macroscópicos pueden ser inducidos mediante:

- Flujo plástico no homogéneo, bajo la acción de un tratamiento externo (Granallado).
- Deformación plástica no homogénea mediante un enfriamiento o calentamiento no uniforme (Temple ordinario)
- Deformación metalúrgica estructural (Tratamientos Térmicos)
- Varios Tratamientos superficiales (Esmaltado, Chapado de níquel y cobre, y recubrimientos por PVD y CVD)
- Diferentes coeficientes de expansión térmica e incompatibilidad mecánica de diferentes componentes en un material compuesto. (compuestos con una matriz orgánica y metálica, recubrimientos cerámicos).

Para el caso de este estudio se analizan los perfiles de esfuerzos residuales macro-estructurales en producto plano de acero HSLA grado 50, que proviene de una bobina laminada en caliente, antes y después de un proceso de nivelado de precisión. Por lo anterior, se tiene la idea de que los esfuerzos residuales que puede contener este material son causados en la mesa de enfriamiento en el proceso de laminación en caliente, debido a un enfriamiento no homogéneo

en el material, sin embargo además de esto también pueden crearse en el proceso de embobinado, donde si el embobinado no sujeta la cinta de manera correcta, aplicará más tensión en algún lado del producto embobinado provocando posibles defectos de forma, los cuales a su vez están ampliamente relacionados con los esfuerzos residuales. Una de las finalidades del proceso de nivelado de precisión es corregir algunos de estos defectos de forma, además de redistribuir los esfuerzos residuales logrando bajar los esfuerzos altos que se pueden tener en algunas zonas, sin embargo si este proceso no es realizado de manera eficiente puede por sí mismo inducir esfuerzos residuales y defectos de forma y planeza.

1.4 Técnicas de Medición de esfuerzos residuales.

1.4.1 Difracción de Rayos X.

La técnica de difracción de rayos x se basa en la ley de Bragg, la cual se utiliza para conocer los parámetros de las redes cristalinas de los diferentes materiales, por esto esta técnica aprovecha que cuando un material se encuentra sometido a un esfuerzo, ya sea residual o aplicado, existe una deformación plástica, lo cual provoca cambios en las distancias interplanares de las redes cristalinas del material. Utilizando estos cambios de dimensiones en el espaciamiento interatómico se pueden calcular los esfuerzos. Los metales están compuestos por átomos que se encuentran agrupados de manera repetitiva formando matrices tridimensionales de átomos y de esta manera llegan a formar cristalitos o granos, los cuales se encuentran orientados en diferentes ángulos respecto a los demás granos y unidos forman un material sólido poli-cristalino. Entonces cuando un material poli-cristalino está bajo un esfuerzo, ya sea aplicado o residual, deformaciones plásticas son producidas individualmente en las redes cristalinas de cada grano. Los valores de esfuerzos son obtenidos desde las deformaciones en los granos por conocimiento de las constantes elásticas del material y asumiendo que el

esfuerzo es proporcional a la deformación, lo cual es una suposición aceptable para la mayoría de los metales y aleaciones de interés práctico. (2)

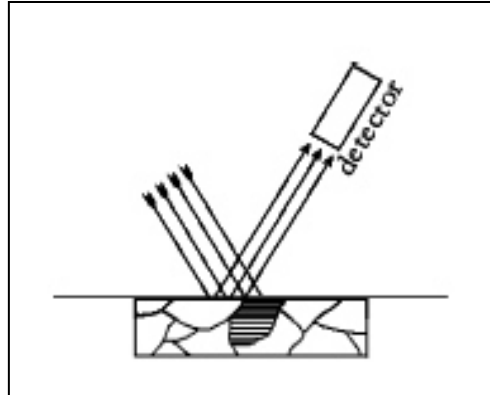


Figura 1.2
Representación técnica
difracción de Rayos x. (2)

1.4.2 Difracción de Neutrones.

Esta técnica es capaz de medir las deformaciones elásticas inducidas por los esfuerzos residuales a través de un volumen, en componentes de acero relativamente gruesos, hasta un volumen mínimo de 1mm^3 . Una de las principales ventajas respecto a la difracción de rayos x, es que proporciona los esfuerzos residuales dentro del material, sin la necesidad de remover capas o seccionar el material. Los métodos de difracción de neutrones al igual que el de rayos x, miden el espacio entre planos cristalográficos de un material, y estos espacios son afectados por esfuerzos aplicados y/o residuales. El espacio que existe en una configuración seleccionada de planos cristalinos está relacionado con el ángulo de incidencia (φ) y reflejado (θ) del haz de neutrones, los cuales son iguales, y la longitud de onda de la radiación de un haz monocromático (λ) por la ley de Bragg.

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

Después la deformación elástica inducida por el esfuerzo residual perpendicular a los planos cristalográficos que difractan son relacionadas con "d" por:

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta - \sin \theta_0} \quad (2)$$

Donde “d₀” es la distancia entre los planos cristalográficos sin influencia de esfuerzo residual ó aplicado y “d” es la distancia entre los planos modificada por la influencia de algún esfuerzo residual o aplicado. Si se conoce la orientación de los esfuerzos principales en el componente, el esfuerzo en cualquier dirección principal puede ser calculado por:

$$\sigma_a = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\varepsilon_a + \frac{\nu}{(1+2\nu)} (\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c) \right] \quad (3)$$

Donde σ_a es el esfuerzo principal en la dirección “a”, y ε_a , ε_b y ε_c son las deformaciones obtenidas en las correspondientes direcciones principales; E y ν son el modulo de Young, y el coeficiente de poissón respectivamente. (2)

1.4.3 Técnica de Ultrasonido.

El principio en el que se basa la medición de esfuerzos y sus deformaciones elásticas por técnicas de ultrasonido (acústico) es el fenómeno provocado por un cambio aproximadamente lineal en la velocidad de ultrasonido con la presencia de un esfuerzo residual o aplicado. Debido a lo anterior se ha demostrado que bajo ciertas condiciones específicas se puede determinar los esfuerzos residuales utilizando este fenómeno. El esfuerzo es medido por la inducción de una onda sonora de varios Mhz de frecuencia en el material y midiendo el tiempo de propagación o algún otro parámetro relacionado con la velocidad. Debido a que muchas otras características de los metales, además de las deformaciones elásticas inducidas por esfuerzos, influyen en la velocidad de propagación de la onda, estas deben descartarse; Sin embargo generalmente no se cuenta con la tecnología, ni con el conocimiento fundamental para hacer esto. El gran interés en esta técnica es la posibilidad de lograr realizar mediciones tridimensionales en el material. (3)

1.4.4 Magnetostricción (Barkhausen noise).

El método de análisis de ruido Barkhausen (BNA), también conocido como método Magneto-elástico o Micro-magnético, está basado en un concepto de medición inductiva de señal como ruido generada cuando un campo magnético es aplicado a una muestra ferro-magnética. Esta señal es llamada ruido de Barkhausen debido a que fue el Profesor y científico alemán Heinrich Barkhausen quien explicó la naturaleza de este fenómeno (4). Los Materiales ferro magnéticos consisten en pequeñas regiones magnéticas que se asemejan a barras de imanes individuales, conocidos como dominios, las cuales se encuentran orientadas en un orden aleatorio en un material no magnetizado. La técnica de análisis de ruido Barakhausen se basa en medir en número y magnitud las reorientaciones magnéticas abruptas provocadas por la expansión y contracción de los dominios magnéticos en un metal ferro-magnético. Estas reorientaciones son observadas como pulsos aleatorios en amplitud, duración y separación temporal, por lo tanto son descritos como ruido. (2) La mayoría de las características magnéticas de un material ferro magnético son fuertemente influenciadas por los esfuerzos mecánicos. De cualquier forma, solo algunas de estas características se han medido convenientemente y correlacionado con el estado de esfuerzos. Una de estas características es el efecto del ruido de Barkhausen. (5)

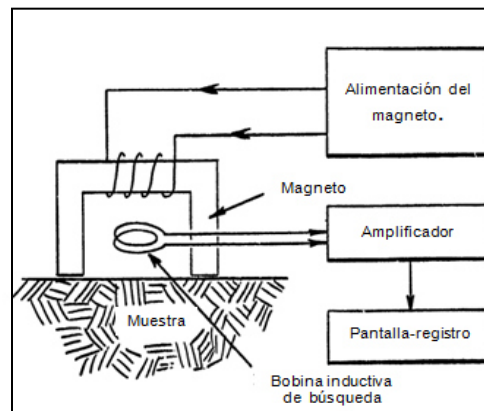


Figura 1.3 Diagrama esquemático de características esenciales de un arreglo para medir inductivamente el efecto de Barkhausen (5).

1.4.5 Técnica de orificio ciego “Hole Drilling”.

Esta técnica es actualmente muy utilizada debido a que cuenta con un procedimiento estandarizado dando un grado de confiabilidad y precisión, además de ser una técnica relativamente sencilla de implementar y con un bajo costo de inversión, si se compara con algunas otras técnicas. A menudo esta técnica es considerada como un método semi-destrutivo debido a que el daño que causa para la realización de la prueba es muy pequeño y en muchas ocasiones puede ser descartado, dependiendo de la aplicación del material. Este método de medición obtiene el perfil de esfuerzos cercano a la superficie, esto debido a la sensibilidad de las galgas extensiométricas. Para realizar mediciones confiables la roseta debe contar como mínimo con tres galgas extensiométricas ubicadas con un cierto ángulo entre ellas, esta roseta es adherida a la zona de medición, la medición consiste en realizar un orificio (el diámetro varía con el tipo de broca y roseta) en el centro geométrico de la roseta, dicho orificio se realiza en una serie de pasos lo cual permite al equipo adquirir datos de los cambios de resistencia en las galgas extensiométricas, estos cambios son traducidos a elongaciones respectivas a cada galga por medio del sistema. Las principales fuentes de error que pueden introducir errores significativos en las mediciones son: introducción de esfuerzos por el maquinado, forma del orificio no cilíndrica, y excentricidad del orificio realizado respecto al centro geométrico de la roseta, así como también una mala instalación de la roseta, temperaturas elevadas que llegan a afectar el funcionamiento del equipo, falta de lubricación y limpieza del dispositivo utilizado para perforar, daño de broca y/o turbina, falta de presión en el aire de entrada, etc. En la figura 1.4a se muestra un esquema representativo de la prueba de “hole drilling” para una roseta de tres galgas extensiométricas. Esta técnica es la utilizada para realizar las mediciones en este proyecto, mas adelante en el capítulo 3 se muestran con mayor detalle las características de

esta prueba, explicando de manera más detallada el funcionamiento y el equipo utilizado para poner en práctica la realización de estas mediciones.

1.4.6 Técnica de Anillo anular (Ring Core).

El método del anillo anular es una variante del método del orificio ciego (hole drilling). Donde el hole drilling utiliza una perforación y mide las deformaciones resultantes en la superficie que lo rodea, el método del anillo involucra medir la deformación en un área central, causada por el corte de una ranura anular alrededor del material y de las galgas extensiométricas. El método de anillo anular (Ring core) evalúa esfuerzos en un plano y también realiza la perforación en incrementos de profundidad. En la figura 1.4b se muestra un esquema de la roseta utilizada para este método y el tipo de ranura utilizada. Este método tiene la ventaja sobre el “hole drilling” en cuanto a que este provee deformaciones de superficie mayores. Sin embargo es menos utilizado debido a que crea mayor daño en la pieza de prueba y es menos conveniente para aplicar en la práctica. (6)

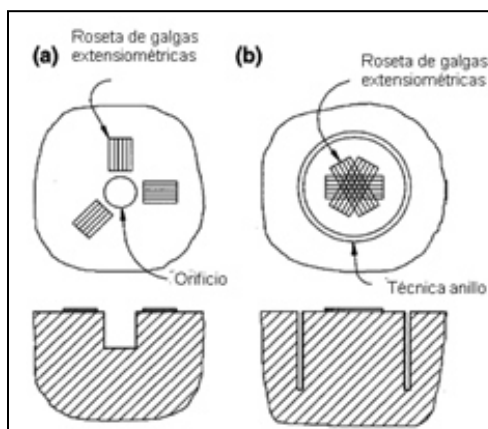


Figura 1.4 Métodos de medición esfuerzos residuales (a) Hole-Drilling (b) Ring-Core (19)

CAPITULO 2

PROCESOS DE CORRECCIÓN DE FORMA Y PLANEZA

2.1 Introducción.

Frecuentemente después del proceso de laminación, se requiere de otros procesos para buscar obtener materiales con propiedades y características de dimensiones deseadas por el cliente, esto para facilitar el proceso de su producto final. Por lo anterior comúnmente es necesario obtener placas y/o hojas de material con un alto grado de planeza y estabilidad dimensional. Este capítulo ayuda a comprender cuales son los problemas de planeza y como se generan, además se presentan algunas teorías de cómo corregir estos defectos, y se mencionan también distintos procesos los cuales son utilizados por la industria para corregir defectos de planeza y controlar la estabilidad del material plano en procesos subsecuentes. Se aborda también uno de los temas más relevantes en los últimos años, en cuanto a estabilidad dimensional, el de los esfuerzos residuales, los cuales son causantes de fallas en el material en procesos de formado y corte, aún después de obtener material plano, como por ejemplo en corte con laser, plasma, etc, provocando cambios en la forma y planeza; estos cambios pueden dañar el equipo de corte, además de que

provocar defectos en el producto final. Aunque los problemas de planeza y esfuerzos residuales están claramente relacionados, cada uno es único y deben ser tratados individualmente.

2.2 Defectos de forma y planeza.

La calidad del rollo laminado al finalizar el proceso utilizado para darle planeza, es muy importante, ya que si tiene defectos de forma, estos se pueden manifestar en el producto final; por lo cual es de suma importancia conocer los tipos de defectos de forma y planeza que se pueden generar en el material laminado. En general los defectos de forma y planeza pueden englobarse en 3 diferentes familias, como se muestra en el diagrama de la figura 2.0.

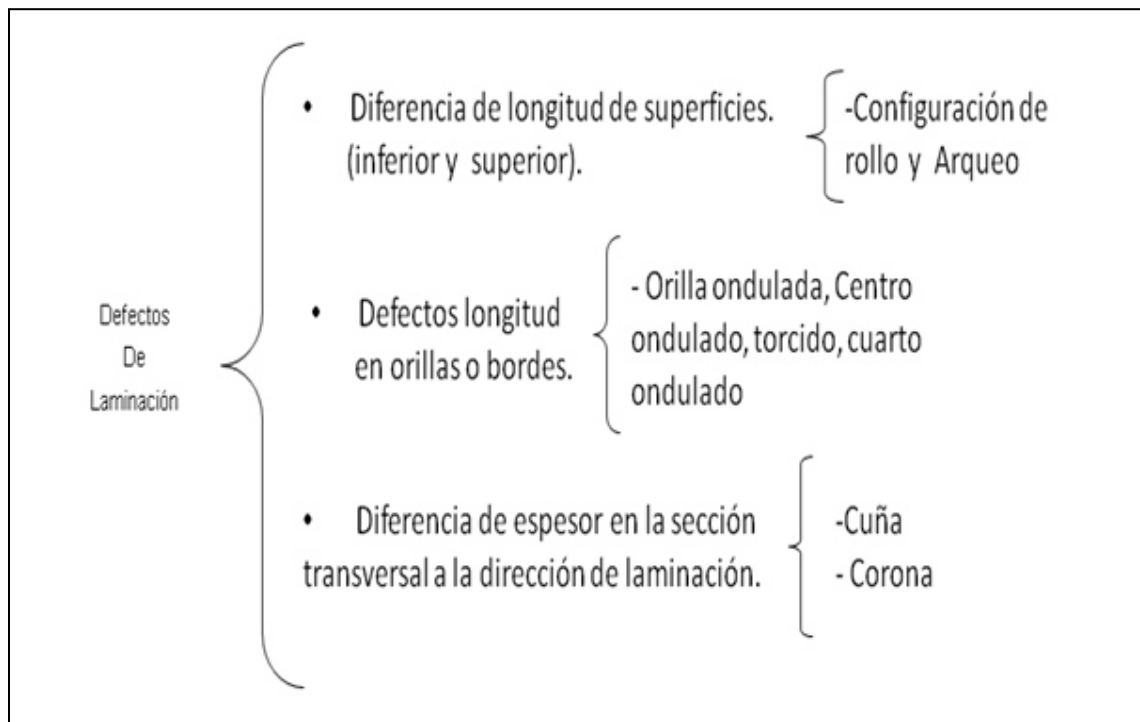


Figura 2.0.- Diagrama tipos de posibles defectos en un rollo laminado en caliente.

2.2.1 Defectos por diferencia de longitud entre la superficie inferior y superior.

El tipo de defectos más comunes en los rollos rolados en caliente son configuración de forma rolo y arqueado figura 2.1, sin embargo también se sabe que son los más fáciles de corregir, más adelante se explica cómo corregir estos defectos. Configuración de forma de rolo, este defecto se origina por la diferencia de longitudes entre la superficie interna y externa de la placa en el sentido de la laminación, efecto que se crea por el simple hecho de enrollar el producto obtenido de laminación, de ahí que su nombre es configuración ó memoria de rolo, el arqueado es un defecto también de diferencia de superficies, pero en este caso la diferencia de superficies se da en la sección transversal a la dirección de laminación o enrollado.

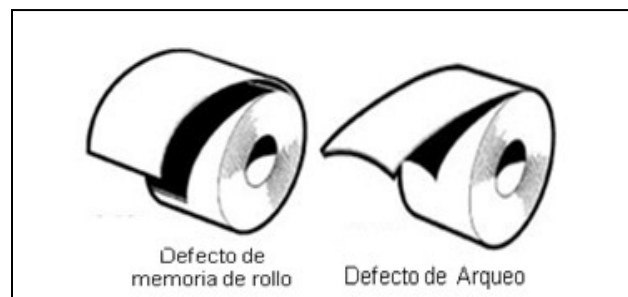


Figura 2.1 Defectos superficiales. (7)

2.2.2 Defectos por diferencia de longitudes entre orillas, bordes y centro de la hoja.

Dentro de esta categoría entran los defectos de orilla ondulada, centro ondulado, curvatura lateral, ondulaciones fuera del centro y cinta torcido. Orilla ondulada es un defecto que se presenta por tener diferentes longitudes en las orillas del rollo con respecto al centro del mismo, esto se debe a que si se

deforman o laminan más las orillas que el centro del rollo, estas tendrán una mayor longitud que el centro lo cual producirá la ondulación para compensar la diferencia de longitudes, lo cual provoca una serie de esfuerzos entre orillas y centro para equilibrar el material. Por lo contrario, al laminar o deformar más el centro que las orillas del rollo, esta zona estará más alargada que las orillas del rollo lo cual provoca un defecto de centro laminado, centro ondulado o defecto de canoa, esto de igual manera se debe a que se encuentra con mayor longitud la zona central y el material busca equilibrar los esfuerzos.

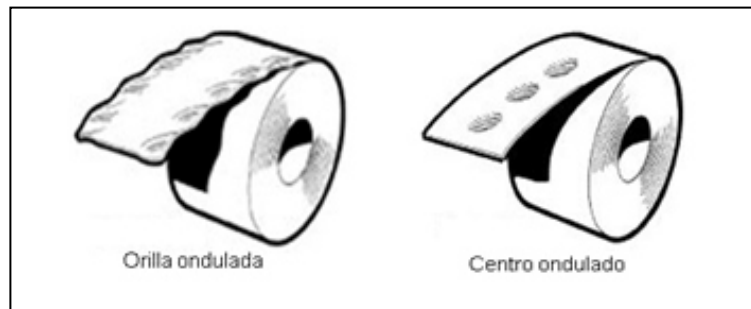


Figura 2.2 Defectos por diferencias de longitud. (7)

De la misma manera que los defectos anteriores, existe la posibilidad que algunas zonas fuera del centro y de las orillas del material sean más largas debido a un proceso defectuoso, lo cual causaría que estas zonas, por ejemplo ubicadas en un cuarto del ancho del material, tengan un efecto de ondulado debido a la diferencia de longitud con las demás zonas del material. El defecto de curva lateral o desviación de la rectitud del material respecto a una línea recta, se debe principalmente a la diferencia de longitud entre una orilla y otra, por lo cual el material tendera a curvarse hacia la orilla con menor longitud.

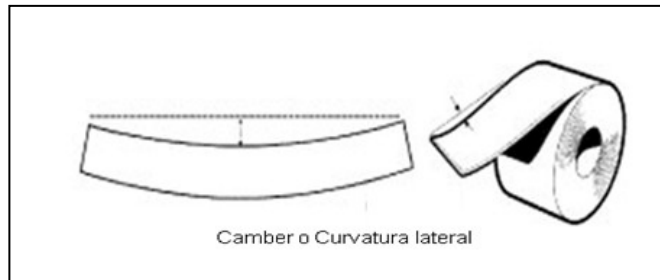


Figura 2.3 Defecto por diferencia de Longitud entre orillas. (7)

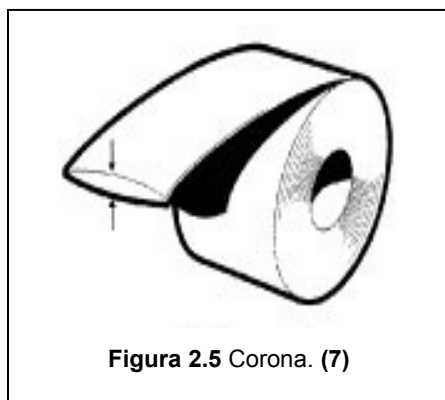
Otro defecto que entra en esta categoría pero es más difícil de comprender como un problema de diferencias de longitud es el torcido de rollo; Podría visualizarse de la manera siguiente, si se corta el rollo en tiras iguales en la dirección de laminado, se puede observar que las tiras obtenidas en el ancho en la dirección de laminación del rollo tendrían longitudes diferentes dependiendo del tipo y dirección del torcido.



Figura 2.4 Diferencias de longitud en toda la sección transversal. (7)

2.2.3 Diferencias de espesor en la sección transversal a la laminación.

Finalmente, otro defecto que aparece en las cintas es la corona (Figura 2.5), que se genera en el molino caliente derivado de la corona que tienen los rodillos del molino tándem acabador. Propiamente no debería de ser considerado un defecto porque la operación del molino acabador no tiene rodillos rectos si no que tienen una corona que compensa la corona térmica que se genera por la laminación, por lo que siempre se va a presentar una corona en la sección transversal de la cinta. Este defecto es muy notable en las líneas de corte longitudinal, donde la cinta central es más corta que las de las orillas. Este defecto no se puede corregir de manera significativa con una línea de nivelado, se requiere un molino que puede aplicar presión en las dos superficies de la cinta al mismo tiempo, como es el caso del temple mecánico. Adicionalmente a este defecto está el de cuña o “wedge”, que se describe como la diferencia de espesores en el ancho de la cinta, donde un lado tiene mayor espesor que el otro.



2.3 Efecto de Recuperación elástica, memoria de forma o Spring Back.

Como se menciona anteriormente durante los procesos de fabricación del material se inducen esfuerzos residuales, por ejemplo durante el proceso de laminación donde algunas secciones de la cinta pueden ser sobretrabajadas, además de que el enfriamiento no ocurre de manera homogénea a lo largo del material, así como tampoco en ambas superficies (superior e inferior) con respecto al centro del material, todos estos procesos generan esfuerzos residuales en el material, estos esfuerzos pueden contribuir a un comportamiento inestable del material en procesos posteriores como por ejemplo el corte por láser, plasma, etc. produciendo cambios de dimensiones en el material, que generalmente se observa como distorsión en la forma y planicidad de la hoja o cinta, este fenómeno es comúnmente conocido en la industria como Memoria de Forma, pero el término de recuperación elástica o “Spring Back” describe de mejor manera este fenómeno. En la figura 2.6 se puede observar los efectos de los esfuerzos residuales contenidos en el material, y después del corte se observa un cambio de dimensión y forma en la hoja de acero que antes del corte permanecía aparentemente plana. Además otro factor que puede influir en provocar este efecto de recuperación es que la hoja al finalizar el proceso de nivelado tenga pequeñas curvaturas residuales provocadas por su paso por el nivelador, de manera que al colocarla sobre una mesa calibrada para verificar la planeza del material estas pequeñas curvaturas serían imperceptibles debido al efecto de la gravedad y estas pequeñas curvaturas pueden causar distorsiones en las piezas cortas de estas hojas o placas.



Figura 2.6 Efecto de recuperación elástica.

2.4 Algunas recomendaciones para corrección de problemas de forma y planeza.

Para la corrección de algunos de estos defectos de forma y planeza, existen diferentes procesos. Estos procesos operan de diferentes formas pero tienen el mismo objetivo, obtener material plano que permanezca así aún en procesos posteriores, reduciendo o eliminando el efecto de recuperación elástica. Para entender un poco más acerca de cómo se logra corregir los defectos de planeza y también cómo se logra reducir las probabilidades de tener un efecto de recuperación elástica (“spring back”) y por consiguiente lograr tener estabilidad dimensional, es necesario dividir la hoja en tiras longitudinales imaginarias en la dirección de laminación como se muestra en la figura 2.7, de esta manera se observa que si una tira o sección de la hoja es más larga que otra y al estar unida a la tira corta, esta tenderá a ondularse, dando origen a su vez a esfuerzos internos en el material debido a que parte de la tira corta será sometida a una tensión aplicada por la tira de mayor longitud, y de manera contraria la sección con mayor longitud se ondulará y tenderá a tener esfuerzos de compresión para equilibrar el estado de esfuerzos.



Figura 2.7 Seccionamiento de una hoja con buena planeza

Por lo anterior la meta de los procesos utilizados para corregir planeza es disminuir o eliminar estas diferencias de longitud entre las diferentes tiras o secciones de la cinta. Con la finalidad de disminuir la diferencia entre secciones,

se elórgan las secciones más cortas y se busca que la hoja tenga dimensiones de longitud iguales en todo el ancho de la placa u hoja.

Con la finalidad de eliminar el efecto de memoria de forma o recuperación elástica es necesario uniformizar los esfuerzos residuales en toda la sección transversal mediante la elongación del material, en el caso del proceso de nivelado de precisión por rodillos, la clave para lograr obtener y mantener un material plano y sin el efecto de recuperación elástica, es necesario deformar el material superando el esfuerzo de cedencia con el fin de crear deformaciones permanentes en el material. Una vez que el punto de cedencia es superado, los esfuerzos internos causados por procesos anteriores se modifican, logrando homogeneizarlos en el ancho de la cinta debido a una deformación plástica uniforme, dando una nueva configuración de esfuerzos y eliminando el efecto de procesos anteriores en el material. Es necesario mencionar que se puede tener esfuerzos residuales distribuidos uniformemente y no necesariamente se tendrá un material con buena planeza, y por lo contrario también se puede dar el caso donde se tenga material plano pero no necesariamente con esfuerzos bajos o uniformemente distribuidos en el material. (8)

Existen algunos criterios que se pueden tomar como base para corregir problemas de planeza y estos se basan en el esfuerzo de cedencia, por ejemplo para eliminar la forma de configuración de rollo es necesario deformar el material de manera que las superficies del material superior e interior sufran una elongación de dos veces la elongación de cedencia (figura 2.8), este procedimiento crea deformación permanente únicamente en un 20% del espesor del material y un 80% interno permanece sin cambios permanentes (9), por lo cual el defecto de configuración de rollo es meramente un problema superficial.

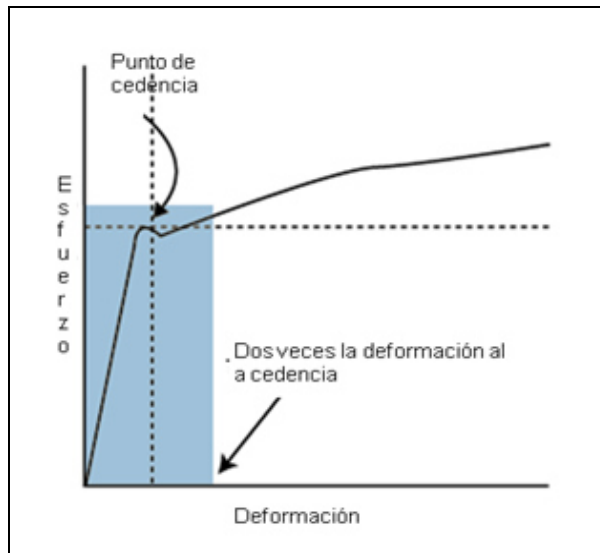


Figura 2.8 Elongación necesaria para eliminar el defecto provocado por el embobinado (9)

Para corregir el problema de arqueado, que es un problema de superficie en el ancho de la cinta, se requiere dar una mayor elongación teniendo mayor efecto en el espesor de la cinta, para esto se busca superar de 4 a 5 veces la elongación de cedencia. Esto afecta aproximadamente el 80% del espesor y esta zona sobrepasa el esfuerzo de cedencia. Prácticamente todo el espesor de la cinta es afectado cambiando su estado, corrigiendo la diferencia de longitud entre las superficies (9).

De igual manera, los defectos de orilla ondulada y centro laminado se pueden corregir con una deformación equivalente a 4 o 5 veces la elongación de cedencia (figura 2.9). Estos defectos ya no son solo superficiales, si no, prácticamente se corrigen en todo el espesor. Aunque esta regla se aplica para los tres últimos defectos por igual, las zonas donde se debe aplicar la carga es localizada, por lo cual estos defectos no pueden ser corregidos por un nivelador convencional, es necesario un nivelador de precisión el cual nos permite seleccionar las zonas de carga sobre la cinta.

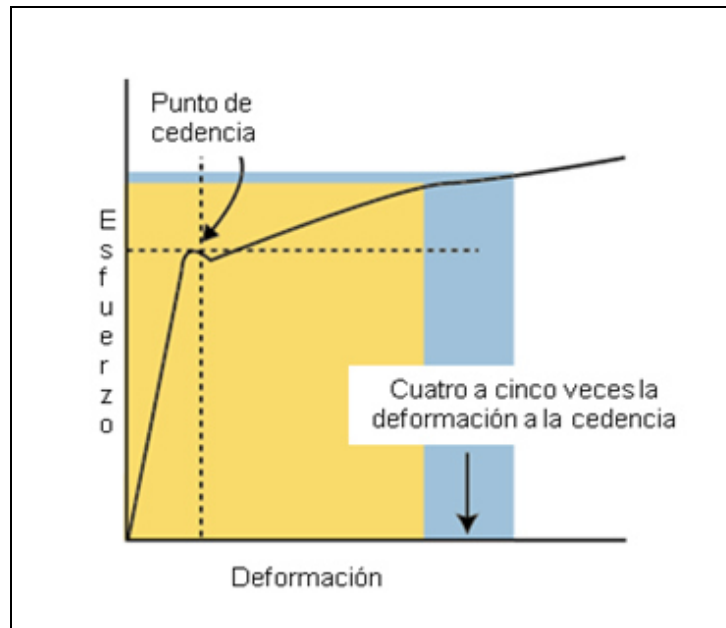


Figura 2.8 Deformación 4 a 5 veces la de cedencia, necesaria para corregir defectos de longitud, Afectados por todo el espesor de la cinta. (9)

Por último hay que mencionar que defectos como el curvado lateral y la corona no es posible corregirlos con un nivelador.

2.5 Proceso de Nivelado.

El principal objetivo de realizar este proceso de nivelado, como su nombre lo dice, tiene la finalidad de nivelar el material, esto significa que se corregirán defectos que tengan que ver con diferencias de longitud y también se busca nivelar o estabilizar los esfuerzos retenidos dentro del material, también conocidos como esfuerzos residuales, esfuerzos remanentes, esfuerzos inducidos, etc. Como se menciona anteriormente existen diferentes defectos que provienen en su mayoría del proceso de laminación, además es evidente que el producto terminado obtenido de la laminación y embobinado cuenta con una distribución de esfuerzos residuales aleatoria a lo largo y ancho del rollo, esto se debe principalmente a que no hay un enfriamiento homogéneo, dichos esfuerzos pueden causar daños y cambios de dimensión en el material de

manera inesperada, debido que al cortar un material plano no se esperaría que cambiaran sus dimensiones. Para cambiar esta configuración de esfuerzos aleatoria mediante el nivelado, es necesario deformar el material sobrepasando el valor de esfuerzo de cedencia del material (figura 2.9), llegando a deformar plásticamente el material provocando el cambio permanente en las dimensiones y redistribuyendo o reiniciando la configuración de esfuerzos del material logrando que las zonas donde se encontraban esfuerzos altos, se reduzcan lo suficiente de manera que ya no representan problemas en procesos posteriores al nivelado como el corte con laser, plasma, etc.

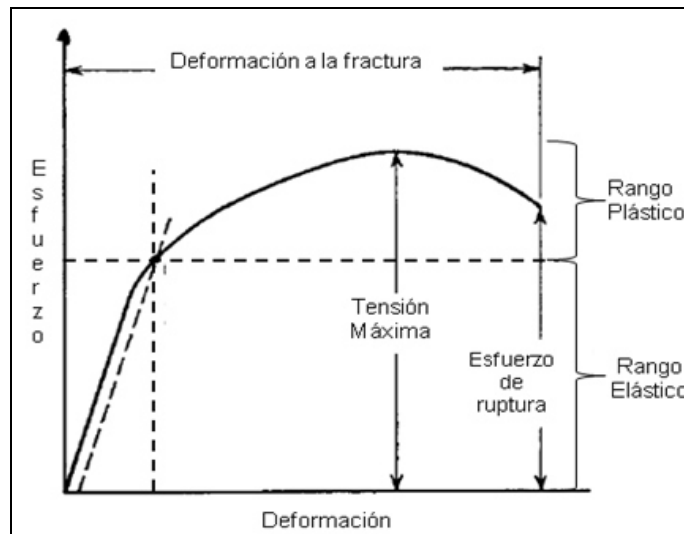


Figura 2.9 Esfuerzo vs Deformación (YP) (10)

El proceso de pasar el material por rodillos provoca deformaciones en la cinta, las cuales pueden pasar o no el esfuerzo de cedencia del material, lo cual depende en gran medida del diámetro del rodillo y el espesor de la cinta, como se puede ver en la figura 2.10, se considera un eje neutro en el centro del material, en ese eje el esfuerzo es cero, esto debido a que es el punto donde el material cambia de estar sometido a tensión a un estado de compresión. De manera que, la superficie interna de la cinta o la que se encuentra en contacto con el rodillo estará sufriendo esfuerzos de compresión y la superficie externa

de la cinta estará a tensión. Las zonas del material que se encuentran más lejanas al eje neutro son las que están sujetas a un mayor esfuerzo.

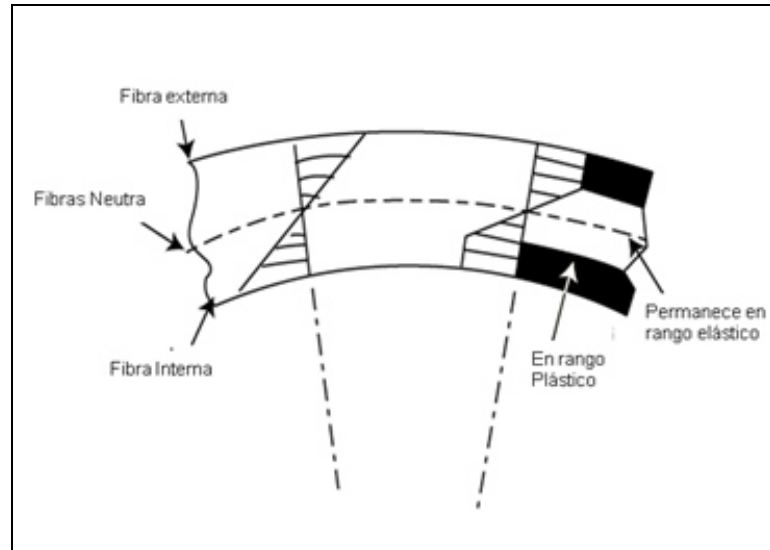
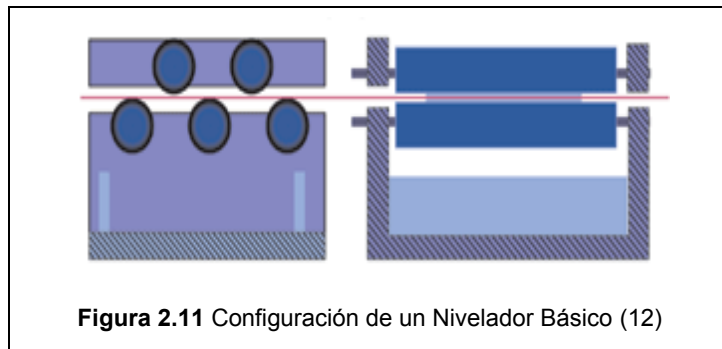


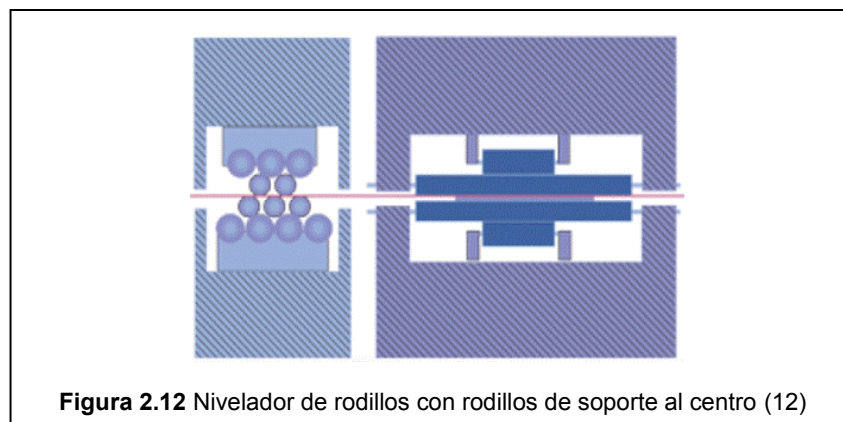
Figura 2.10 Distribución de Esfuerzos en el espesor de la cinta. (7)

La configuración de los rodillos en un nivelador indica la deformación que se puede lograr en la cinta, así como también el radio de curvatura de la lámina a través de los rodillos, los diámetros y el espaciamiento entre ellos. Dependiendo de las propiedades de la cinta, calibre, ancho y esfuerzo de cedencia, se diseña la configuración del nivelador para lograr una deformación permanente, ya sea superficial o a través de todo el espesor de la cinta. (11) Existen diferentes configuraciones de rodillos en los niveladores, teniendo como resultado diferentes capacidades, funcionamientos y aplicaciones. La configuración básica de un nivelador consta de una serie de 5 a 9 rodillos de diámetros grandes como se muestra en la figura 2.11, la separación entre centros de los rodillos es amplia permitiendo que cada rodillo de la parte superior pueda caber entre los dos de la parte inferior, estos rodillos soportan las cargas solamente con sus propios soportes (rodamientos) y en este arreglo comúnmente los rodillos no son motorizados. Este arreglo es el más económico, y está diseñado para corregir el sobre enrollado solamente, debido a que la configuración de los

rodillos únicamente permite doblar el material lo suficiente para provocar una elongación de dos veces la elongación a la cedencia.

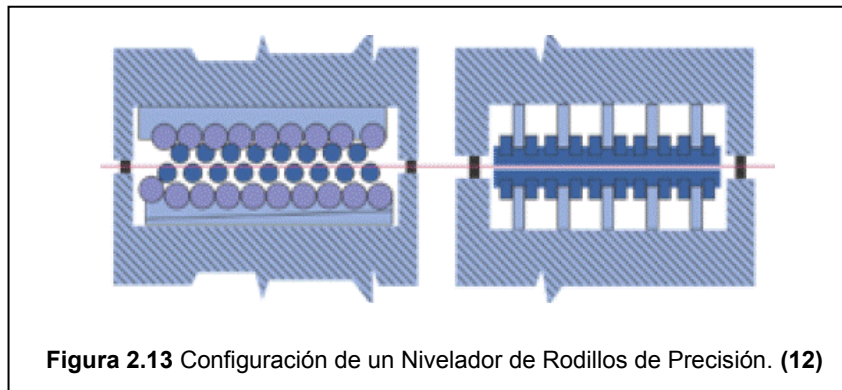


Si se cierra el espacio vertical entre rodillos para lograr un mayor doblado de la cinta, los rodillos se pueden flexionar por la falta de soporte, generando orilla ondulada en la cinta. La configuración de rodillos que le sigue en complejidad, consta básicamente de rodillos de trabajo de diámetro pequeño con poca separación entre ellos con rodillos de apoyo arriba y abajo en la parte central de la máquina para minimizar la deflexión de los rodillos de trabajo. (Figura 2.12).



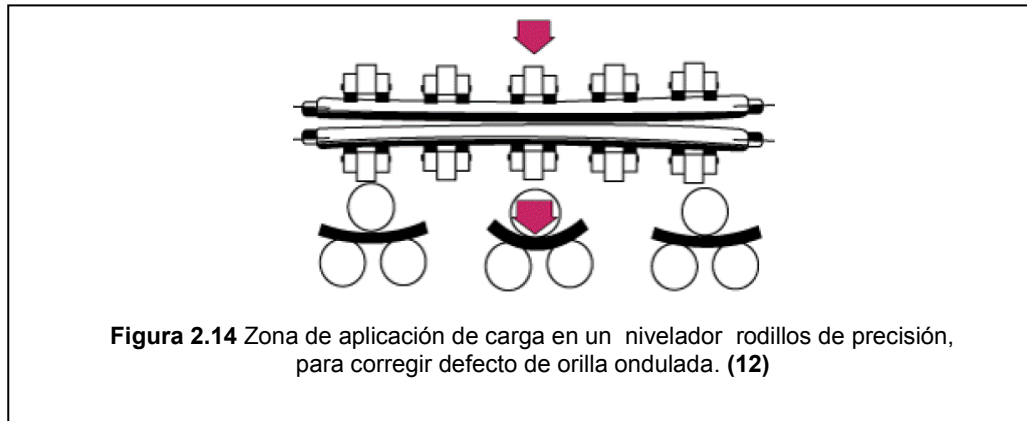
Estos arreglos constan de entre 11 y 19 rodillos, usando un menor número para calibres gruesos y un número mayor para calibres delgados, generalmente están motorizados. Esta configuración de rodillos está diseñada para producir una elongación de 4 a 5 veces la elongación de cedencia para corregir, además

del sobre enrollado, el arqueado y otros defectos de superficie. La siguiente opción en complejidad es la configuración del nivelador de rodillos de precisión (figura 2.13) la cual nos ayuda para corregir defectos de superficie, así como defectos de cambio de longitud entre las orillas y otras zonas de la cinta. En principio este arreglo es similar al descrito anteriormente, tiene el mismo número de rodillos de trabajo y apoyo y del mismo diámetro, generalmente son entre 11 y 19 rodillos y están motorizados.

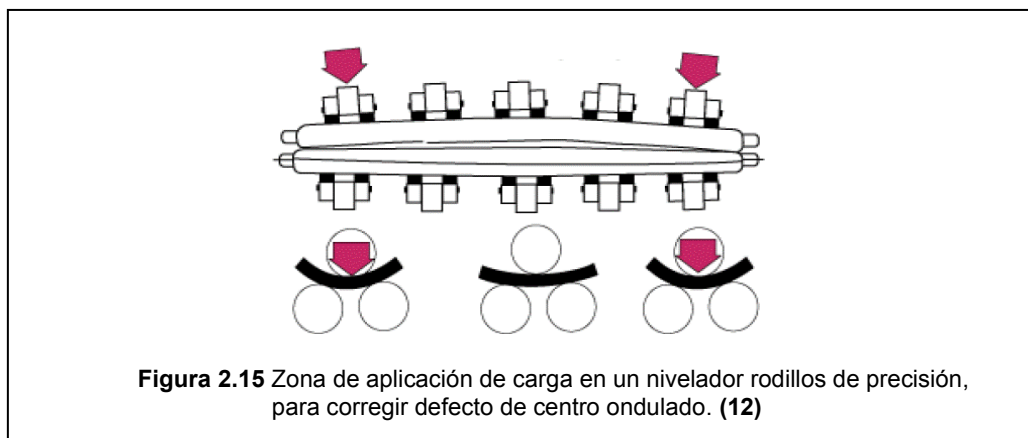


También este arreglo se diseña para producir de 4 a 5 veces la elongación de cedencia. A diferencia del arreglo anterior, la configuración de los rodillos de apoyo permite desplazarlos verticalmente de una manera independiente de los otros rodillos, de manera que los rodillos de trabajo se pueden flexionar de una manera controlada y mantenerlos en esa posición con carga. Los defectos de orilla ondulada y centro laminado son defectos de diferencia de longitud entre las orillas y el centro por lo que se requiere elongar las orillas o el centro de manera independiente para que tengan la misma longitud y así lograr la planeza. Para esto se requiere de un control de flexión de los rodillos aplicando carga de una manera localizada en ciertas áreas. De los tres arreglos mencionados anteriormente, solamente el nivelador de precisión con ajuste individual de los rodillos de apoyo puede controlar o eliminar diferencias de longitud entre orillas y centro. Por ejemplo para eliminar el defecto de orilla ondulada por medio de un nivelador de precisión, es necesario aplicar una

carga en el centro del material como se indica en la figura 2.14, debido a que esta zona es más corta provocando la ondulación en las orillas del material, por lo que el centro debe ser alargado igualando las longitudes de la cinta en el ancho de la misma.



Por el contrario al tener orillas más cortas que el centro, se forma el defecto de planeza conocido como centro ondulado o centro laminado, el cual puede ser retirado con el nivelador de precisión aplicando carga en las orillas (figura 2.15) para extender el material en esta zona e igualar las longitudes de toda la cinta.



2.5.1 Efecto de los rodillos del nivelador en el material.

El proceso de nivelado de rodillos de precisión, está basado en el principio de controlar la deformación plástica a través del espesor del material, esto se logra al pasar el material a través de una serie de rodillos (figura 2.16) los cuales doblan el material alternando la dirección del doblado y de esta manera logran que el esfuerzo aplicado supere el esfuerzo de cedencia en un porcentaje del espesor del material, por lo anterior para llevar a cabo este proceso es fundamental conocer el esfuerzo de cedencia y el espesor del material que se va nivelar, esto para lograr configurar de manera adecuada la apertura entre los rodillos del nivelador.

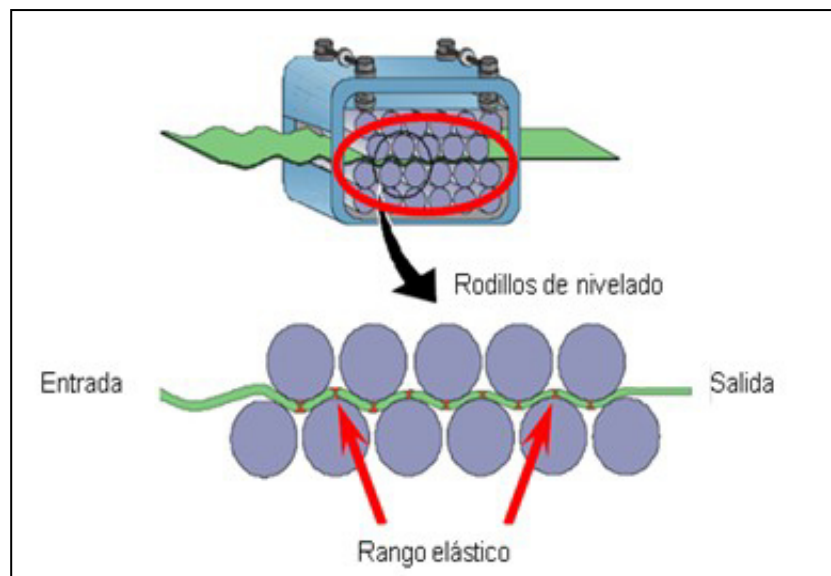
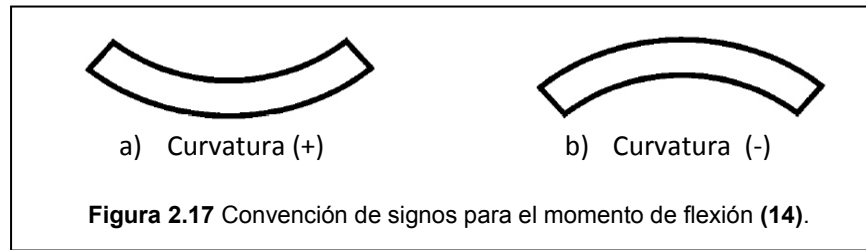


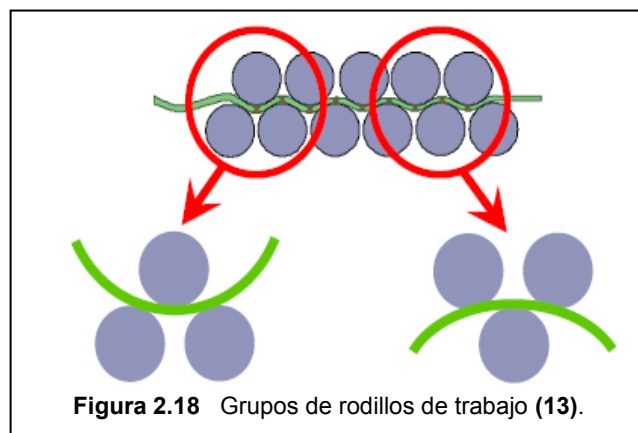
Figura 2.16 Configuración de un nivelador con 11 rodillos de trabajo (13).

Generalmente el material que entra al nivelador tiene condiciones de planicidad que se encuentran fuera de rango, estos defectos de planeza varían en dirección, magnitud y se caracterizan por su curvatura. La curvatura (k) es

inversa al radio de curvatura, R , a veces se define como $k = 1/R$. Algunas áreas del material pueden entrar con una curvatura positiva ($k > 0$) figura 2.17a, también de manera contraria pueden entrar con una curvatura negativa ($k < 0$) figura 2.17b y finalmente algunas áreas entran al nivelador sin curvatura ($k = 0$).



Los rodillos de trabajo dentro del nivelador trabajan en grupos de tres (figura 2.18) para lograr doblar la placa, el nivelador contiene múltiples rodillos dependiendo de la capacidad del nivelador, pero todos estos trabajan en grupos de tres rodillos para realizar la acción de dobles reversible necesario.



Los tres primeros rodillos o el primer grupo de rodillos de trabajo tienen la apertura entre rodillos más pequeña de todo el nivelador y esta apertura se va incrementando conforme el material se acerca a la salida del nivelador, esto se

debe a que en los primeros grupos de rodillos se requiere crear una curvatura mayor en el material con la finalidad de igualar la dirección de la curvatura en todas las zonas del material, y pasar de un material que entra con defectos de planeza en diferentes direcciones y magnitudes, a un material con una sola dirección de curvatura con diferentes magnitudes de curvatura (figura 2.19). Por lo que el objetivo de las primeras dos flexiones es corregir las peores curvaturas de entrada y el propósito de los rodillos restantes es remover sistemáticamente la curvatura residual creada en las primeras flexiones, y la función del último rodillo es doblar el material únicamente la cantidad requerida para obtener producto uniformemente plano.

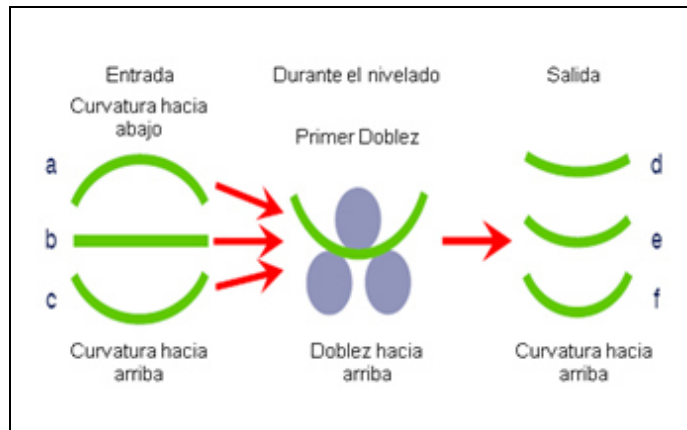


Figura 2.19 Condiciones de planeza de entrada y salida en el primer grupo de trabajo de un nivelador (13).

Cada grupo de rodillos aplica un momento de flexión al segmento del rollo que pasa a través del nivelador. En la figura 2.20 se observa la manera en que cambia el momento de flexión dependiendo de la zona en que se encuentre del nivelador y de cada rodillo. El primer rodillo no aplica flexión alguna por lo cual el momento es cero, conforme la cinta se acerca al primer rodillo superior el momento de flexión aplicado aumenta, hasta llegar a un máximo en el área cercana al punto de contacto entre el rodillo 2 y el material. El momento de flexión induce deformación en la cinta y si esta deformación sobrepasa la

deformación a la cedencia del material, ocurrirá deformación plástica. La curvatura aplicada a la cinta está determinada por la posición de los rodillos y por configuración de la apertura entre los rodillos del nivelador.

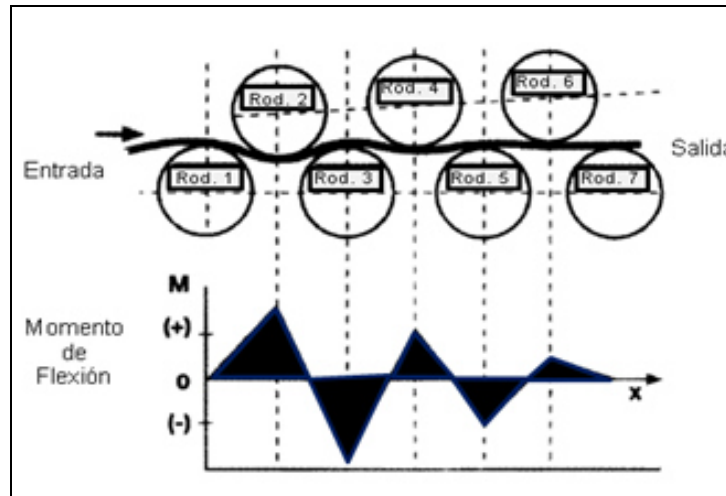


Figura 2.20 Variación del momento de flexión aplicado en un nivelador de rodillos (14).

En la figura 2.19 se puede observar que dependiendo de la curvatura ($K < > = 0$) del material de entrada al primer grupo de rodillos, a la salida de este grupo se obtiene una sola dirección de curvatura $K > 0$ ó flexión positiva pero con diferentes magnitudes o curvaturas residuales, lo anterior debido al efecto de recuperación elástica ya que la zona que está sujeta a un esfuerzo mayor es el área donde la curvatura al inicio del nivelador era negativa, por lo que al salir del primer grupo de rodillos tendrá una mayor recuperación elástica y una menor curvatura residual como se muestra en la imagen. Por lo anterior es necesario dar seguimiento a las curvaturas creadas por el momento de flexión aplicado en cada grupo de rodillos para verificar que la curvatura residual al final del nivelador es cero, obteniendo de esta manera material uniformemente plano. (13)

2.5.2 Diagramas Momento-Curvatura

La relación entre el momento de flexión y la curvatura de la cinta es más clara cuando se observa un diagrama de momento de flexión vs curvatura de la cinta (figura 2.21). La relación mostrada en la imagen mencionada anteriormente es adimensional ya que resulta de dividir la curvatura aplicada entre la curvatura a la cedencia (k_y) y el momento de flexión resultante entre el momento de flexión a la cedencia (M_y). El diagrama M-k se asimila al diagrama de esfuerzo deformación debido a que el momento de flexión está relacionado con el esfuerzo a través de la ecuación.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.1)$$

Y la curvatura (k) está relacionada con la deformación (ε) a través de la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{t}{2R} = \frac{t}{2} * \frac{1}{R} = t * \frac{k}{2} \quad (2.2)$$

Donde “c” es la distancia perpendicular del eje neutral al punto al cual actúa la fuerza, I es el momento de inercia de la sección transversal de la placa, t es el espesor de la placa.

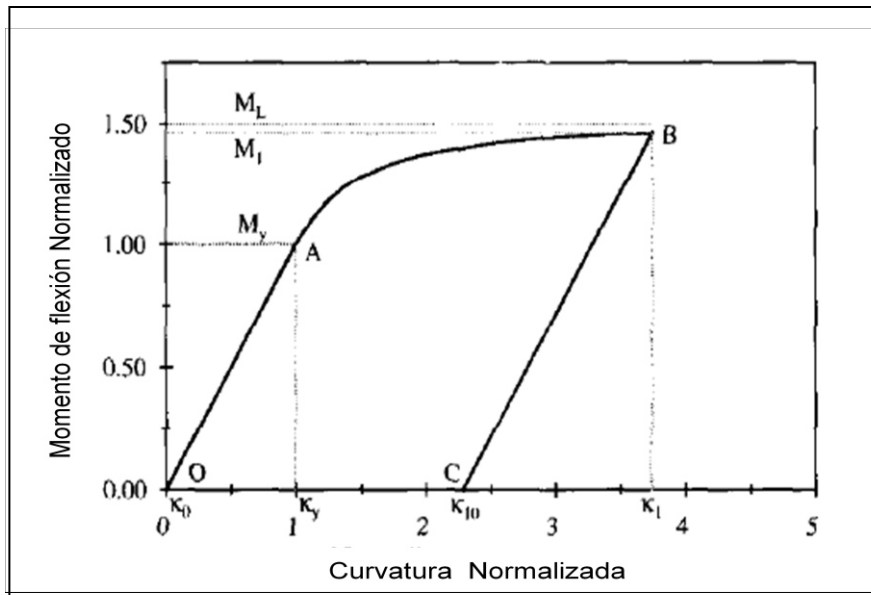


Figura 2.21 Diagrama de momento de flexión vs curvatura, para el primer ciclo de flexión de un nivelador de rodillos (14).

La figura 2.21 muestra la curvatura para una cinta de acero inicialmente plana ($k = 0$) en la primer flexión al entrar al nivelador, la cinta es flexionada a una curvatura positiva en el punto B (k_1) bajo la acción de un momento de flexión positivo con una magnitud de M_1 . La acción del momento de flexión es inicialmente elástica, no provoca un cambio permanente en la planeza de entrada, y esta zona está representada por la porción lineal de la curva (OA) y la sección (AB) representa la deformación permanente o plástica. Para estimar la sección transversal del espesor que fue deformada plásticamente se utiliza la curvatura normalizada en la siguiente ecuación:

$$\text{Fracción plástica} = 1 - 1 / (\text{Curvatura Normalizada})$$

Esto quiere decir que si el primer grupo de rodillos aplica una curvatura mayor a (k_y), la superficie del material será deformada plásticamente y conforme se aumente este valor de curvatura, la deformación plástica se lograra en mayor porcentaje de espesor, por lo que una curvatura de $5 k_y$ que corresponde a $5 \varepsilon_y$ provocara un deformación plástica en el 80% del espesor

de la cinta en la primer flexión. Para la segunda flexión el diagrama se muestra en la figura 2.22 y continúa con la curva de la primera flexión, en el punto K10 (pto. C) que equivale a la curvatura residual después de la primera flexión. El momento de flexión al inicio del segundo ciclo es nuevamente elástico y tiene comportamiento lineal entre los puntos C y D de la curva, flexión plástica comienza al sobrepasar el punto D y hasta llegar al punto E, y al retirar el momento (M2) negativo de flexión aplicado, el fenómeno de recuperación elástica provoca un retroceso (ptos. B – F) en la curvatura final al salir de este grupo de rodillos, dejando una curvatura residual negativa (k_{20}), y esta curvatura es el punto inicial para el tercer ciclo de flexión.

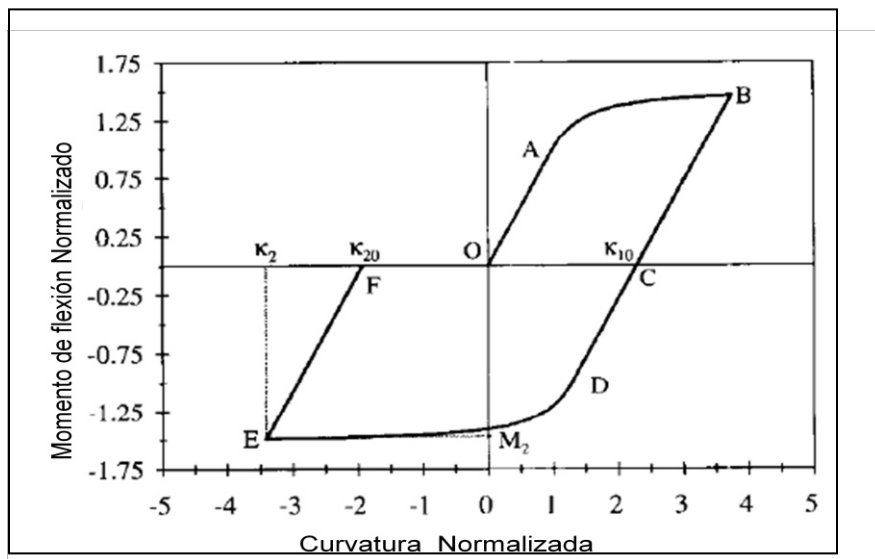


Figura 2.22 Diagrama de momento de flexión vs curvatura, para los primeros dos ciclos de flexión de un nivelador de rodillos (14).

Al iniciar el tercer ciclo de flexión, se cuenta con una curvatura residual (k_2) obtenida en el grupo de rodillos de trabajo anterior, y de igual manera como se observa en la figura 2.23 al iniciar el ciclo la curvatura provocada por el momento de flexión se comporta de una manera lineal y elástica (ptos. F – G), donde la cedencia comienza en el punto G de la curva y se incrementa hasta

llegar a un punto máximo de curvatura en el punto H donde se tiene el momento de flexión M_3 el cual es mayor a la magnitud del momento del primer ciclo M_1 esto se debe a que la curvatura total aplicada es mayor ($k_3 - k_{20} > k_1 - k_0$), sin embargo debido a la configuración de la apertura entre rodillos, en este grupo de rodillos la apertura es mayor que en los primeros, por lo cual la curvatura final alcanzada en este tercer ciclo (k_3) es menor que en la primer flexión (k_1) y que al retirar el momento de flexión aplicado, el efecto de recuperación elástica es correspondientemente mayor en el tercer ciclo reduciendo la curvatura desde el punto marcado con la letra H hasta el punto I. La curvatura positiva residual obtenida después del tercer ciclo ha disminuido con respecto al primer ciclo de flexión ($k_{30} < k_{10}$) y esto representa que el proceso de disminución de los defectos de ondulación comienzan a disminuir y los rodillos restantes en el nivelador se encargaran de reducir las curvaturas residuales hasta cero, tomando en cuenta el efecto de recuperación elástica.

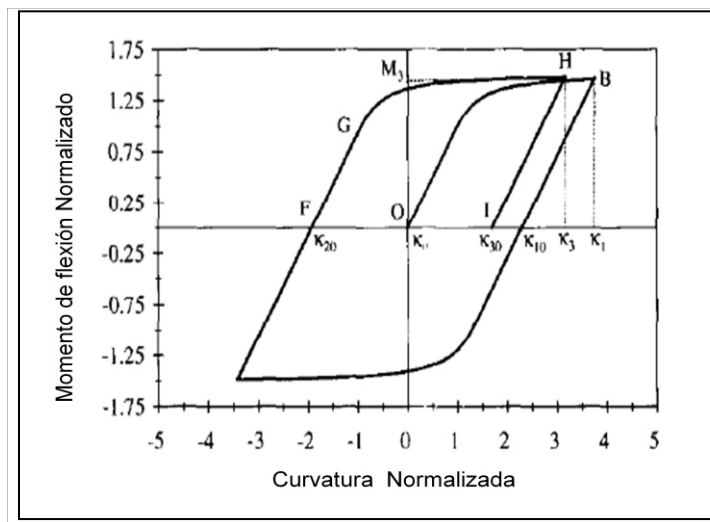


Figura 2.23 Diagrama de momento de flexión vs curvatura, para los primeros tres ciclos de flexión de un nivelador de rodillos (14).

Continuando con la cuarta flexión en sentido contrario en el cuarto grupo de rodillos, disminuyendo la curvatura residual (k_{40}) al final del ciclo (punto L),

como se muestra en la imagen (figura 2.24) debido al incremento sucesivo y gradual de la apertura entre los rodillos, ahora esta curvatura será el inicio de la próxima flexión.

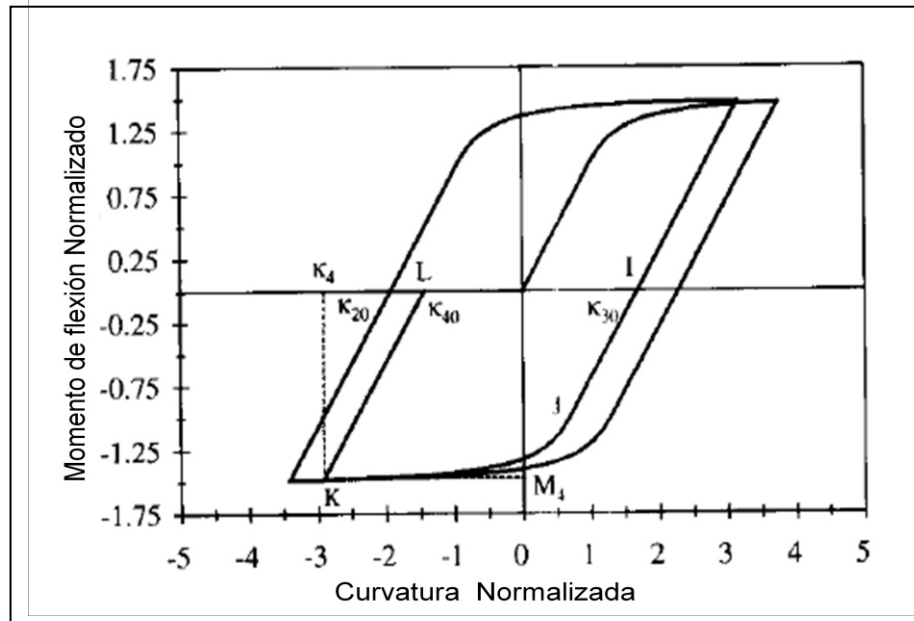


Figura 2.24 Diagrama de momento de flexión vs curvatura, para los primeros cuatro ciclos de flexión de un nivelador de rodillos (14).

Las flexiones aplicadas en los rodillos restantes trabajan en el mismo principio de las primeras 4 flexiones, y el número total de flexiones siempre será el número total de rodillos de trabajo menos dos, por lo que un nivelador de 11 rodillos de trabajo provocara un total de 9 flexiones, en la figura 2.25 se puede observar un diagrama momento – curvatura completo (M-k), y se observa que el material es sujeto a momentos de flexión de magnitud decreciente conforme la apertura entre rodillos se incrementa, por consecuencia los niveles de curvatura impartida al material es cada vez menor y se aproxima a cero conforme se acerca al final del nivelador. El noveno momento de flexión para un nivelador de 11 rodillos debe ser tal que aplique la cantidad precisa de curvatura para que al retirar el momento de flexión, esta curvatura regrese exactamente a cero después del efecto de recuperación elástica. (14)

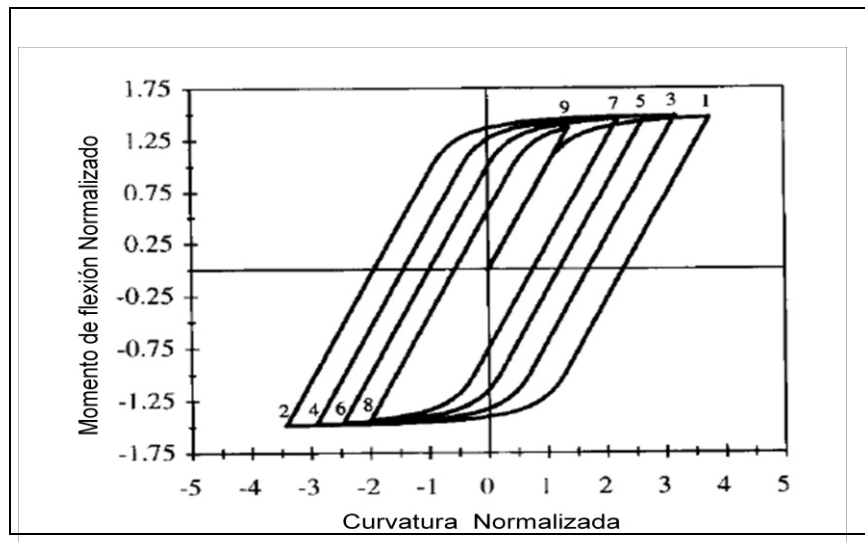


Figura 2.25 Diagrama de momento de flexión vs curvatura, para los nueve ciclos de flexión de un nivelador de once rodillos (14).

2.6 Temple Mecánico

En el proceso de temple mecánico básicamente lo que se hace es reducir el espesor de la cinta en un porcentaje del orden del 2% máximo y además lo elonga de acuerdo a la reducción de espesor, sin incrementar el ancho de una manera apreciable. Con esta reducción de espesor se incrementa la resistencia a la cedencia en la superficie deformada por el trabajo mecánico realizado y mejora el acabado superficial. Este molino ayuda a corregir defectos de perfil, es decir problemas de corona, corrige la sección transversal de la cinta. Un nivelador no puede corregir estos defectos. El Temple Mecánico puede ayudar a mejorar la planeza de la cinta pero no es tan eficiente como un nivelador de precisión, sin embargo, ayuda a mejorar la superficie y a distribuir de manera homogénea los esfuerzos residuales.

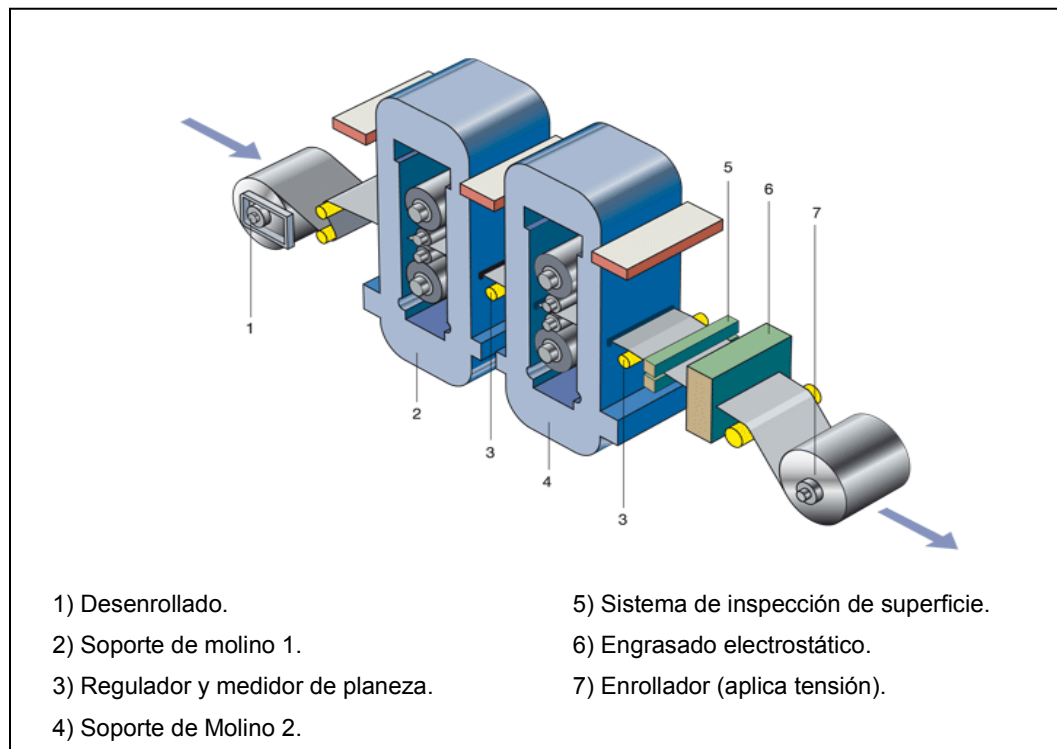


Figura 2.26 Arreglo de un molino "Temple mecánico" (15).

Al incrementar la resistencia a la elongación en la superficie, incrementa el esfuerzo de cedencia del material en esa zona, por lo que el material en esa zona es más difícil de deformar, limitando el efecto de los esfuerzos residuales para deformarlo y haciendolo más estable. Este proceso se lleva a cabo con tensión, que ayuda a mejorar la planeza al elongar el material que es procesado. Sin embargo, esto tiene sus limitaciones debido a que a medida que aumenta el espesor de la lamina, se hace más complicado aplicar una tensión adecuada para elongar el material, debido a que se requiere mayor potencia y en calibres mayores de $\frac{1}{2}$ " no es costearable el proceso debido a que se requieren motores grandes para lograr dar la tension adecuada. En general este proceso de temple mecánico se utiliza para mejorar calidad superficial de la cinta y mejorar un poco la planeza. El proceso ideal para mejorar la estabilidad, planeza y perfil de la cinta es la combianacion de un temple

mecánico y un nivelador de precisión, el molino de temple se usa para mejorar la forma y acabado superficial y el nivelador para mejorar la planeza, en su conjunto mejoran la estabilidad dimensional. Actualmente hay un buen número de instalaciones con esta combinación que mencionan que mejora la planeza, la forma y la estabilidad de material. Sin embargo esta combinación también tiene sus limitaciones pues no existen referencias para espesores de lámina mayores de $\frac{1}{2}$ ", sin embargo si hay líneas niveladoras para cinta hasta de 1".

(11)

2.7 Nivelado por elongación

A diferencia de las líneas de nivelado, ya sea nivelado simple o de precisión, en este proceso no se utiliza el doblado del material sobre rodillos. La línea de nivelado por elongación trabaja en conjunto con la línea de corte. La cinta es primeramente elongada y después cortada a la medida específica de la hoja. Una línea de nivelado por elongación consta de un marco de entrada y uno de salida, estos marcos se pueden ajustar dependiendo de la longitud de hoja deseada y están unidos por dos cilindros hidráulicos, la función de estos marcos es sujetar la cinta en dos puntos y por medio de los cilindros hidráulicos que mueven en dirección contraria a dichos marcos logrando estirar el material. El material es alargado longitudinalmente lo suficiente para superar el esfuerzo de cedencia del material, de arriba a abajo y de borde a borde, en este proceso porciones de la cinta se alargan más que otras al mismo tiempo. En efecto toda la sección transversal es estirada una longitud o distancia consiguiendo que todo el espesor pase a la zona de deformación plástica, lo cual es suficiente para modificar y homogenizar el perfil de esfuerzos y corregir los defectos de planeza al mismo tiempo. El nivelado por elongación realiza más trabajo sobre el material para lograr que todo el espesor del material sea estirado, pero de cualquier forma se consiguen resultados similares al proceso de nivelado de precisión. De igual manera que en el nivelado, se logra eliminar el efecto de

recuperación elástica, siempre y cuando la elongación del material sea tal que el esfuerzo en el material supere el esfuerzo de cedencia, teniendo así una configuración de esfuerzos nueva y más homogénea. De cualquier manera si el material se nivela doblándolo sobre una serie de rodillos, alargado mediante el uso de las fuerzas de compresión o simplemente extendido mediante la fuerza bruta, los resultados finales son muy similares y para seleccionar el proceso que se utilizara para corregir defectos de forma y planeza debe tomar en cuenta las características y limitaciones de cada proceso y utilizar el proceso que se adapte más para la aplicación en particular del material que se va a procesar.

(8)

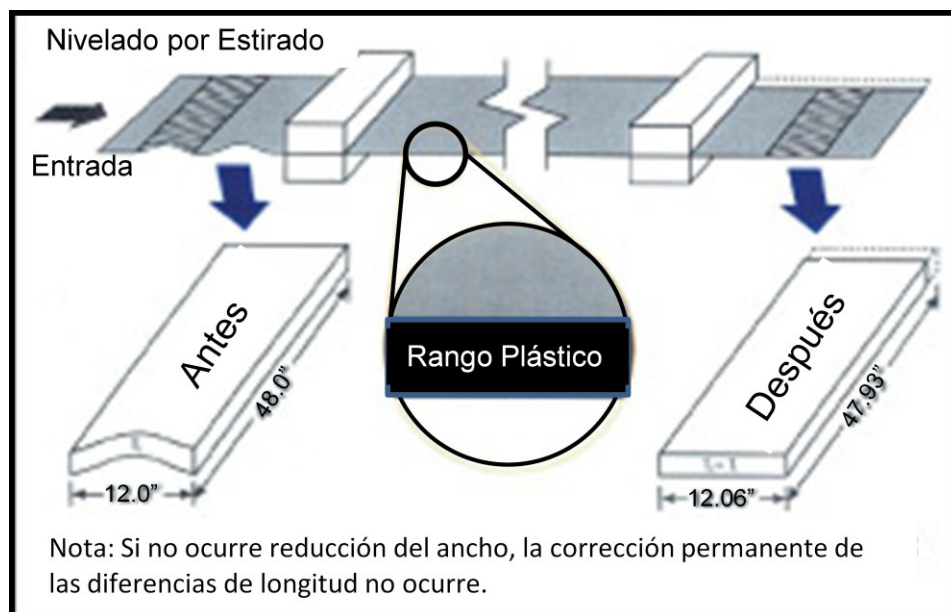


Figura 2.27 Diagrama representativo del Nivelado por Elongación. (16)

CAPITULO 3

TEORÍA DEL “HOLE DRILLING”

3.1 Introducción

El método “hole-drilling” es uno de los métodos más utilizados para medir esfuerzos residuales, ya que cuenta con la ventaja de tener alta precisión y confiabilidad en sus mediciones, además de que es la única técnica de medición de esfuerzos residuales que ha sido estandarizada por la ASTM y su implementación es prácticamente sencilla. Esta prueba es considerada como una prueba semi-destructiva ya que el orificio que realiza es muy pequeño (1.8 a 2.0 mm) y dependiendo de la aplicación del material, puede ser tolerable. El orificio cambia las dimensiones iniciales, lo cual permite una redistribución de los esfuerzos residuales que originalmente existían en el material.

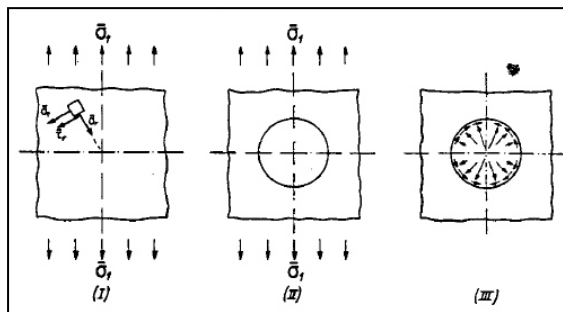


Figura 3.0.- Distribución de esfuerzos en una placa bajo esfuerzo uniaxial con al realizar un orificio (17)

Teóricamente se puede explicar con la figura 3.0 donde podemos observar que partiendo de una placa (I, fig. 3.0) con esfuerzo puro a tensión o compresión uniaxial. Cuando esta placa es perforada su estado es perturbado y el resultado de esto es otro estado de esfuerzos (II), el cambio del estado de esfuerzos que existe entre I y II, es el estado de esfuerzos que nos interesa, debido a que es este cambio es detectado y medido por las galgas extensométricas cuando el orificio es perforado (17). Esta prueba es capaz de medir esfuerzos principalmente en la superficie de materiales isotrópicos linealmente elásticos (18). Este método tiene sus bases en los trabajos pioneros de Mathar en los 1930's (19), desde sus inicios hasta ahora el método se ha ido desarrollando favorablemente gracias al trabajo de muchos investigadores. En la actualidad el método cuenta con una norma estandarizada la cual nos da las características y los parámetros que se deben seguir para llevar a cabo esta prueba, esta norma es la ASTM-E837 la cual hace que este método este mejor establecido y se cuente con mayor información sobre el mismo.

El método en resumen consta de 4 pasos principales que son:

- Preparación de la muestra
- Perforación del orificio
- Medición de deformaciones relajadas por la perforación
- Calcular los esfuerzos residuales.

Desde que Mathar inicio su trabajo con este método hasta la actualidad, se han realizado importantes avances en el modo de llevar a cabo estos pasos, modificaciones que han hecho cada vez más simple realizar este tipo de mediciones. Josef Mathar quien fue docente privado (19), quien trabajaba en un laboratorio privado en la Universidad

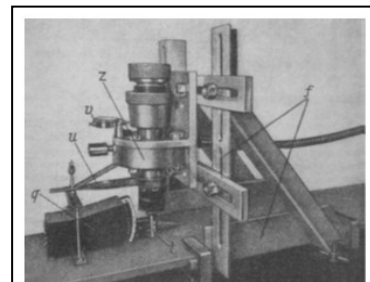


Figura 3.1 Aparato de Mathar "Hole-Drilling" (19)

de Achen, Alemania. En la figura 3.1 se muestra la imagen del aparato desarrollado para medir esfuerzos residuales en placas metálicas. Mathar

utilizaba un taladro de baja velocidad para perforar un orificio de 12mm de diámetro a través de la placa, un extensómetro mecánico para obtener la deformación relajada del material y calibraciones experimentales para medir el esfuerzo axial, tres de los aspectos principales están presentes desde el inicio.

3.2 Sensores indicadores de Deformación

Deformación es el cambio de dimensiones de un objeto, debido a una fuerza aplicada, como se muestra en la figura 3.2 se puede evaluar como un cambio de longitud por unidad de longitud y es adimensional (mm/mm, in/in). Comúnmente, cuando las deformaciones medidas son muy pequeñas suele utilizarse para expresar la deformación $\epsilon * 10^{-6}$. La deformación puede ser positiva o negativa dependiendo de las direcciones de la fuerza aplicada a tensión o compresión.

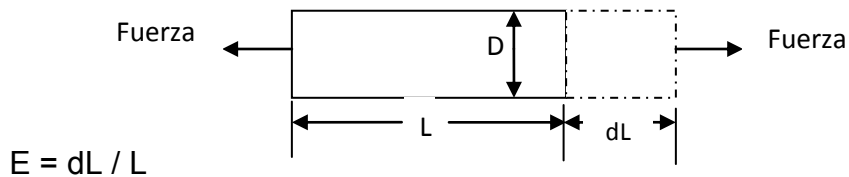


Figura 3.2 Deformación lineal

Desde el comienzo del método uno de los factores considerados como limitantes de la precisión y confiabilidad eran los extensómetros mecánicos utilizados por Mathar para medir la deformación en el material. Para beneficio del método en el año de 1940 ^[2] se desarrolló la galga extensométrica la cual daba la oportunidad de obtener mediciones de deformación de mayor calidad.

En 1950 Soete (19) introdujo el uso de las galgas extensométricas para las mediciones de “Hole-Drilling” permitiendo de esta manera realizar orificios más pequeños, y obteniendo resultados más precisos y confiables; trabajos futuros fueron realizados por Riparbelli, Boiten y Ten Cate. En estos mismos años fue introducido un método alternativo, el cual es una adaptación del “hole-Drilling” y trabaja sobre el mismo principio, pero con la diferencia de que se taladra un orificio en forma de anillo alrededor de un sensor de deformación por lo que es nombrado “Ring-core Method”, el cual fue desarrollado por Gunnert and Hast (19). Los dos métodos son matemáticamente iguales, y difieren en las constantes utilizadas para calcular los esfuerzos residuales, el método de anillo, se caracteriza por que obtiene mayores deformaciones, pero de cualquier forma es más utilizado el método Hole Drilling debido a que produce un menor daño en la pieza. La aplicación moderna de los sensores de deformación viene de las investigaciones de Rendler and Vigness en 1966 (20). Ellos fueron los que establecieron una configuración geométrica estándar para la realización de la prueba por el método Hole-Drilling, sus trabajos fueron base para la norma ASTM-E837 establecida en el año de 1981, desde entonces ha tenido numerosas actualizaciones.

3.3 Principio de Operación de una galga extensométrica

3.3.1 introducción

La medición de esfuerzos por medio de galgas extensométricas da por hecho que el material el cual es evaluado, transfiere sin pérdidas toda la deformación al sensor. Para esto se requiere una unión muy estrecha entre el sensor y el material a evaluar. Para pegar el sensor lo suficientemente estrecho o junto al material se utiliza un adhesivo el cual tiene un tiempo de secado corto, dependiendo de condiciones de humedad y temperatura, pero generalmente deberá secar entre 60 y 240 segundos, esto es para el caso de unión con la superficie del material. Con resistencias eléctricas en los sensores

de deformación unidas al material, la deformación aplicada a la muestra, se transfiere a la rejilla metálica del sensor causando un cambio en su resistencia eléctrica.

3.3.2 Sensores por cambios en resistividad eléctrica

3.3.2.1 Estructura de una galga extensométrica

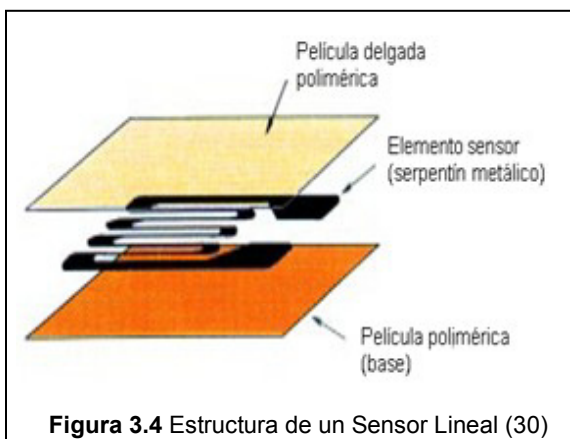


Figura 3.4 Estructura de un Sensor Lineal (30)

Existe una amplia variedad de estructuras de galgas, entre ellas una galga extensométrica universal tiene una estructura, la cual tiene un elemento metálico delgado ($3-6 \mu\text{m}$) en forma de serpentin (figura 3.4) que censa los cambios de resistencia por la deformación que le transmite el

material de prueba, y este serpentin se coloca sobre una base el cual es una película delgada ($15-16 \mu\text{m}$) de plástico y cerrada con una lamina de plástico dejando descubierta la zona donde se soldaran los cables.

3.3.2.2 Principio de Funcionamiento

El funcionamiento de estos sensores se basa en los trabajos relacionados con la relación entre resistencia y deformación de conductores eléctricos la cual fue descubierta por Wheatstone y Thompson (21). Una galga extensométrica con tres o más elementos de conducción eléctrica (resistencias eléctricas) de tipo general, con una configuración como la que se muestra en la figura 3.5 es pegada en la superficie de la pieza trabajo en la zona considerada para hacer la medición. Por lo cual al estar unido a la pieza de trabajo, cualquier deformación del material de trabajo será transferida a los sensores provocando un cambio de

resistencia al paso de la corriente y con estos datos de cambios de resistencia y la utilización del circuito o puente de Wheatstone se puede traducir a una elongación ya sea positiva como respuesta a un esfuerzo a tensión o negativa por un esfuerzo de compresión.

3.3.2.3 Configuraciones Típicas de Rosetas con galgas extensométricas.

En la actualidad se han desarrollado una variedad importante de configuraciones para las rosetas las cuales se utilizan para medir deformaciones pequeñas, por lo que investigadores y científicos han tratado de hacer de estas galgas más precisas y cada vez más sofisticadas, ya que cada vez se van tomando en cuenta un mayor número de factores que pueden influir en los valores adquiridos por las galgas, como por ejemplo los cambios de temperatura, la sensibilidad de la roseta, el número de elementos o resistencias dentro de la roseta. Una de las configuraciones más utilizadas, típica en las mediciones de esfuerzos residuales por el método de Hole-drilling se muestra en la Figura 3.5, la cual consta de tres elementos (resistencias eléctricas) que detectan la deformación en diferentes direcciones en un mismo plano.

La Norma ASTM E837 muestra tres configuraciones principales de roseta (figura 3.6), el uso de rosetas estandarizadas facilitan los cálculos de los esfuerzos residuales ya que se tienen tabuladas las constantes de calibración

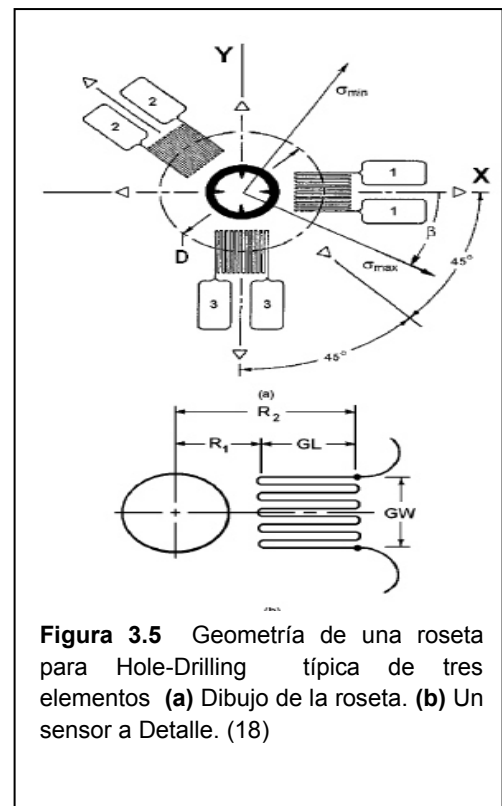
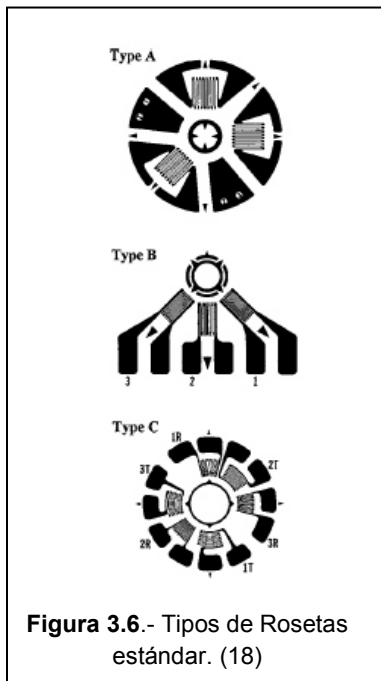


Figura 3.5 Geometría de una roseta para Hole-Drilling típica de tres elementos (a) Dibujo de la roseta. (b) Un sensor a Detalle. (18)

las cuales son utilizadas en las ecuaciones para calcular los esfuerzos residuales según la norma. (18)



Según la literatura una roseta debe tener al menos tres elementos de medición o tres rejillas. La numeración de estos elementos en la figura 3.6 sigue la convención (18) de numeración a favor del sentido en que giran manecillas del reloj que es la utilizada comúnmente para propósitos generales, esta numeración además sirve para tener una galga de referencia que es la numerada con el número 1, la cual sirve para medir el ángulo de orientación del esfuerzo principal máximo. Por lo contrario, la figura 3.5 utiliza una numeración en sentido contrario a las manecillas del reloj. Esto no

influye en los cálculos, la única diferencia es que serán intercambiados el sensor 1 por el 3 y el ángulo β será medido en relación a la nueva configuración.

Otras características que menciona la norma ASTM E837 (18) sobre las rosetas se mencionan a continuación:

- Los sensores de deformación deberán de tener un arreglo en un patrón circular equidistantes del centro de la roseta (centro geométrico).
- Los sensores deberán ser orientados en tres direcciones, 1.- una dirección de referencia, 2.- un segundo elemento deberá ser colocado a 45° o 135° , 3.- el tercer elemento deberá ser orientado perpendicularmente a la dirección de referencia.

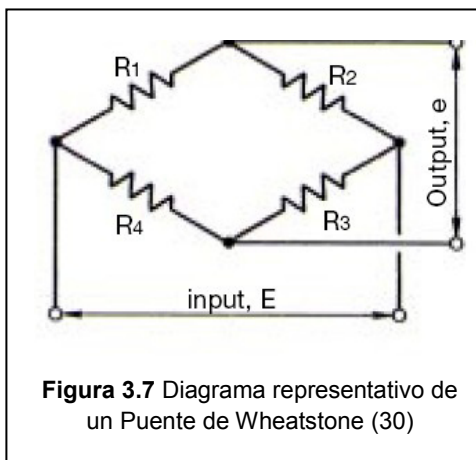
3.3.3 Puente de Wheatstone

3.3.3.1 Principio de operación

Charles Wheatstone (1802-1875) reportó en 1843 (21) un circuito el cual era apto para hacer mediciones precisas de resistencias eléctricas. Este circuito es conocido como circuito de puente de Wheatstone. Dicho puente puede ser utilizado de varias maneras para medir resistencias eléctricas (22):

- Para determinar el valor absoluto de una resistencia para compararlo con una resistencia conocida.
- Para determinar los cambios relativos en la resistencia.

Para las técnicas de medición de deformación con estos sensores, medir los cambios relativos de la resistencia es lo que nos interesa, ya que es capaz de medir cambios en la resistencias con una gran precisión en un orden de magnitud de 10^{-4} a $10^{-2} \Omega/\Omega$.



El puente de Wheatstone es un circuito eléctrico capaz de medir y detectar cambios en una resistencia. Es por eso que se utiliza para medir los cambios en la resistencia de los sensores de deformación. El puente es una combinación de resistencias como se muestra en la figura 3.7.

Suponiendo que:

$$R1=R2=R3=R4 \quad \text{ó} \quad R1 \times R3 = R2 \times R4$$

Entonces cuando se aplica un voltaje de entrada, el voltaje de salida es cero. En este punto el puente se encuentra balanceado. Cuando el puente pierde el balance, el voltaje que obtenemos en la salida, corresponde al cambio de la resistencia. Como se observa en la figura 3.8 el sensor de deformación (gage) es conectado en la posición de la resistencia 1. Cuando el sensor se deforma debido a la deformación de la muestra existen cambios en la resistencia del sensor, los cuales se reflejan en la salida del voltaje (e) del circuito:

$$e = \frac{1}{4} \times \frac{\Delta R}{R} \times E = \frac{1}{4} \times K \times \varepsilon \times E \quad (3.1)$$

Donde:

E=Voltaje de entrada.

e = Salida de Voltaje.

R= Resistencia original del sensor Ω

ΔR = Cambio de resistencia en el sensor Ω

K_c = Constante de proporcionalidad
(Factor del sensor).

El factor k_c difiere dependiendo del material metálico del cual está construido el sensor. Por ejemplo la aleación cobre-nickel tiene un factor de sensor de alrededor de 2. En la ecuación (3.1) podemos conocer todos los valores con excepción del valor de la deformación (ε), la cual puede ser calculada a partir de medir el voltaje de salida (e).

3.3.3.2 Configuraciones de Puente de Wheatstone

Existen algunas variaciones en la configuración básica del puente de Wheatstone, las cuales varían de acuerdo a la forma en que se realizan las conexiones de las resistencias, cambiando cuales y cuantas resistencias

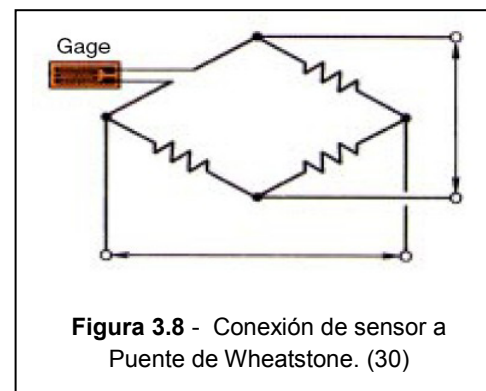


Figura 3.8 - Conexión de sensor a Puente de Wheatstone. (30)

quedan con valores conocidos fijos y cuales resistencias pueden variar. En la figura 3.9 podemos observar las diferentes configuraciones del puente de Wheatstone, cabe destacar que aunque cambia la configuración del circuito, la forma de operar utiliza el mismo principio.

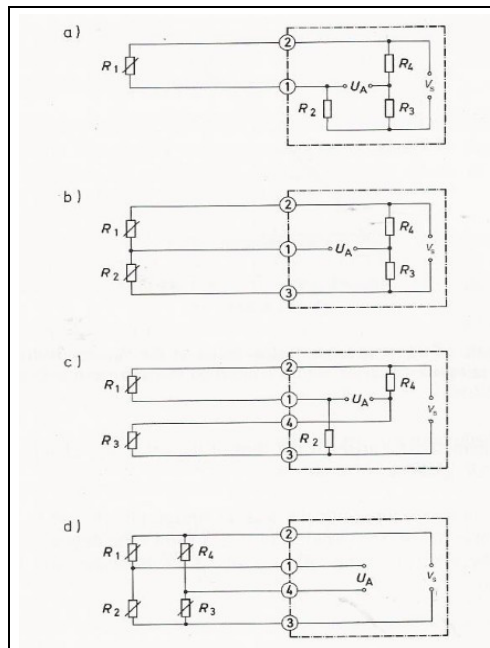


Figura 3.9 Tipos de puentes de Wheatstone (22)

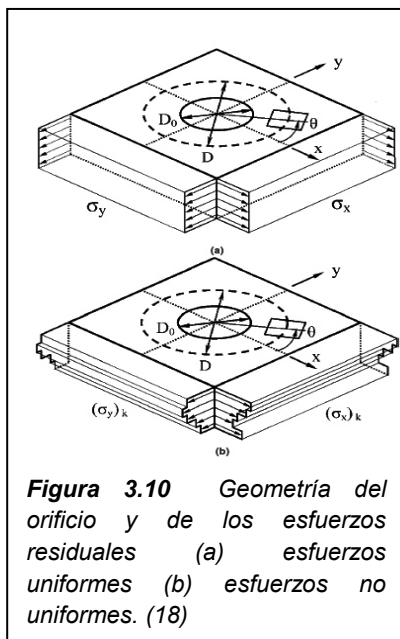
Configuraciones de puente de Wheatstone utilizadas en las técnicas de medición con galgas extensométricas (22).

- a) Cuarto de puente.- como se muestra en la figura 3.9 esta cuenta con una resistencia variable y tres resistencias fijas conocidas.
- b) Medio Puente.- cuenta con dos resistencias fijas conocidas y dos variables.
- c) Doble cuarto o en diagonal

- d) Puente completo: donde se tiene que las 4 resistencias del circuito pueden variar.

3.4 Principios básicos del método de “Hole-drilling”

El método de Hole Drilling involucra la perforación de un pequeño orificio en la superficie del objeto del cual queremos obtener el perfil de esfuerzos



residuales, la perforación se realiza en el centro geométrico de una roseta que contiene los sensores de deformación, al realizar esta perforación existe una relajación del material en los bordes del orificio, este relajamiento provoca deformaciones muy pequeñas en el material, las cuales son detectadas por los sensores de la roseta. La máxima profundidad para el orificio perforado sin perder confiabilidad en la medición es de aproximadamente $0.4D$ (23) ver figura 3.10.

El método se aplica para materiales isotrópicos linealmente elásticos, esto quiere decir que las

propiedades mecánicas del material no varían con la dirección en que se miden. Además puede medir los esfuerzos uniformes o no uniformes relevados cercanos a la superficie. En la figura 3.10 se puede observar la geometría del orificio, así como también el caso donde los esfuerzos no varían con la profundidad figura 3.10a y la figura 3.10b, donde los esfuerzos relevados van cambiando con la profundidad. Una simple medición representa un promedio de los valores de deformación de la superficie en el área de las rejillas, ya que ocurre un relevado de los esfuerzos residuales que se deben al orificio realizado, el material tiende a redistribuir esos esfuerzos debido a que se remueve material de la muestra. Entre más cercana sea la medición a la

superficie se tiene valores de deformación con mayor precisión, lo cual se debe a que conforme se va avanzando en la profundidad del orificio, el sensor va perdiendo sensibilidad por lo cual al llegar a cierta profundidad la sensibilidad del medidor de deformación no será confiable o tendrá un alto porcentaje de error. La perforación del orificio se realiza según se reporta en la norma ASTM-E837 (18) a una velocidad de giro del herramental de 50,000 a 400,000 RPM debido que al realizar el orificio a una velocidad menor existe una alta probabilidad de inducir esfuerzos en el material y de esta manera obtener lecturas de esfuerzo residual con un porcentaje de error (24). Otra recomendación que menciona la norma es realizar la perforación por etapas de profundidad pequeña hasta llegar a la profundidad deseada, de esta manera se le permite al sistema adquirir los valores de deformación entre cada etapa y en el caso de que exista algún pequeño calentamiento, dará tiempo a que se disipe este calor hacia otra zona. El método, según la norma, es capaz de medir los esfuerzos relevados durante la perforación, los cuales se transmiten como pequeñas deformaciones en la superficie cercana al orificio perforado. Estas son recolectadas por el sensor, obteniendo información de los esfuerzos biaxiales en diferentes planos paralelos a la superficie perforada del material. Por lo anterior, este método es utilizado para medir esfuerzos planos únicamente o en dos dimensiones. Una de las ventajas de esta prueba respecto a otras es el bajo daño que causa en la pieza a la cual se le realiza la medición, por lo cual, dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar al material y la zona de la prueba, en algunos casos el daño puede ser despreciado.

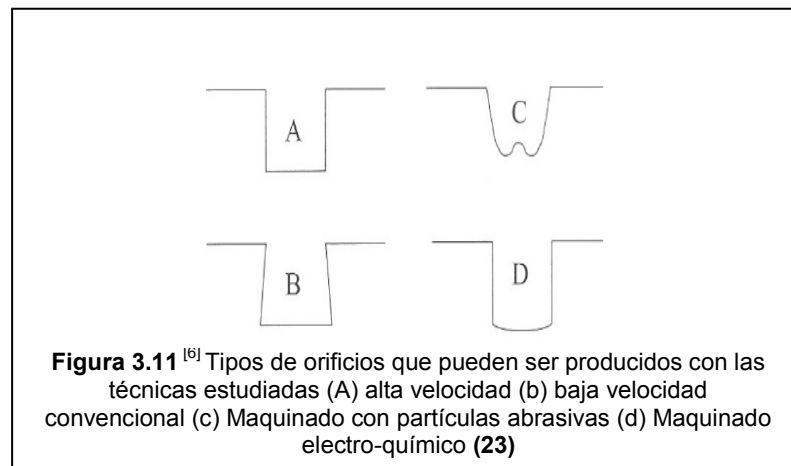
3.5 Principales técnicas de perforación.

Existen diferentes técnicas para producir el orificio en el material, los principales aspectos que se deben tomar en cuenta para seleccionar como se realizara el orificio son:

1.- Esfuerzos adicionales inducidos por el proceso del maquinado.

2.-La capacidad de la técnica para producir orificios con formas bien definidas lo cual nos ayuda a realizar los cálculos de manera más precisa, de hecho el cálculo de esfuerzos residuales por medio de la técnica definida en la norma ASTM E837, requiere de un orificio cilíndrico con el fondo del orificio plano.

MT Flaman y J.A. Herring estudiaron cuatro diferentes técnicas las cuales fueron comparadas cuantitativamente en la cantidad de esfuerzos inducidos y cualitativamente en la facilidad de aplicación y portabilidad del equipo (23). Más adelante se introdujo una quinta técnica por Flaman, perforado en forma orbital. En la figura 3.11 se muestra las características de la geometría de los orificios realizados con las primeras cuatro técnicas de perforación.



3.5.1 Perforado a alta velocidad.

El perforado a alta velocidad involucra una turbina que trabaja con aire comprimido (3.5 a 6 bar) provocando una velocidad de giro en la turbina de 400,000 revoluciones por minuto, la herramienta de perforación (broca) normalmente tiene forma de cono invertido (facilitando la extracción de rebaba

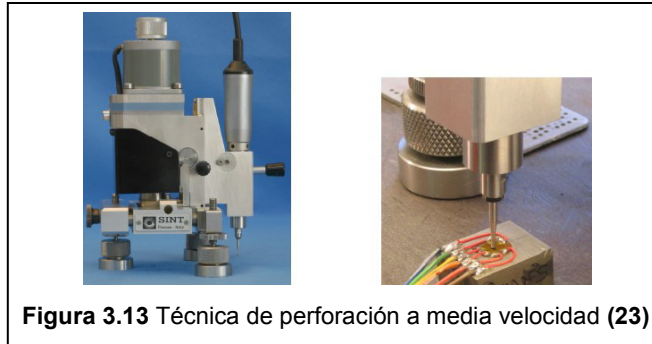
producida durante la perforación) de carburo de tungsteno, produciendo orificios de forma circular con paredes rectas y fondos planos como se muestra en la figura 3.12.



Esta técnica de perforación es aceptable para casi cualquier tipo de materiales, con excepción de materiales extremadamente duros.

3.5.2 Perforado a velocidad media.

El método de hole drilling también puede ser aplicado utilizando un motor eléctrico de alta velocidad (aproximadamente 30,000 RPM). Investigaciones recientes muestran que con velocidades entre 14,000 y 40,000 RPM se pueden conseguir resultados favorables [8]. Utilizar el motor eléctrico de alta velocidad es una alternativa disponible para cuando no es posible utilizar una turbina de aire, el motor eléctrico de control automático se adapta al equipo en un cabezal especial de perforación (figura 3.13).



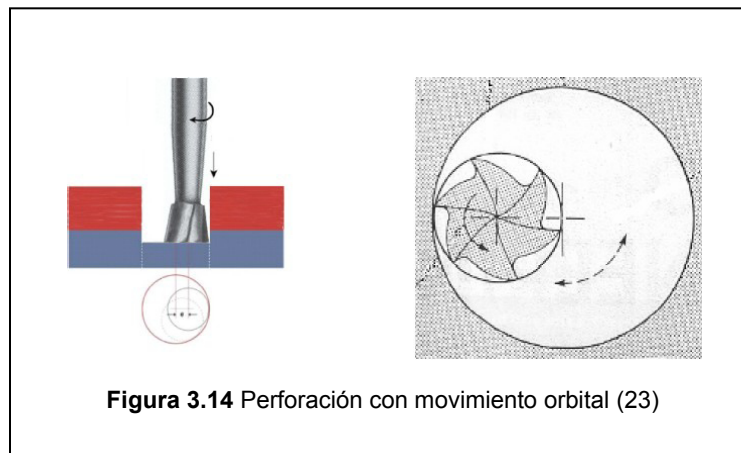
Para realizar el centrado y la medición del orificio realizado se puede intercambiar el cabezal de perforación por el microscopio con retícula de centrado.

3.5.3 Maquinado por chorro abrasivo

Maquinado abrasivo por partículas es también un método propuesto para realizar los orificios para el método Hole Drilling con el objetivo de minimizar los esfuerzos inducidos por el maquinado del orificio. El método fue propuesto y desarrollado por Beaney y Proctor en el cual consiguen realizar el orificio, removiendo material con un chorro abrasivo de polvo o arena con un diámetro pequeño de impacto a alta presión, lo cual provoca un corte en la superficie del material. Este método cuenta con la ventaja de producir el orificio en tiempo muy cortos, pero a su vez tiene la desventaja de no poder controlar con precisión la profundidad y forma del orificio, ni poder realizar el orificio en diferentes etapas de perforación, por lo que no es recomendable para calcular esfuerzos residuales no uniformes, ya que se requiere de orificios realizados en varios incrementos de profundidad. (25)

3.5.4 Perforado orbital a alta velocidad

Otro tipo de técnica utilizada para realizar una perforación de un orificio, la cual puede ser utilizada para el método de hole drilling es el perforado de tipo orbital, técnica la cual fue introducida por Flaman (19). Una de las ventajas de esta técnica es que se facilita la extracción y remoción de material en la zona del orificio, debido a tener diámetros de orificios mayores.



Con esta técnica la broca se desplaza en un movimiento orbital respecto al centro de la roseta de deformación, realizando un orificio con dicho movimiento. El diámetro de la broca es menor al diámetro del orificio como se muestra en la figura 3.14. Este método se puede utilizar para materiales difíciles de perforar, materiales altamente abrasivos como los aceros utilizados en rodamientos y resortes.

3.6 Obtención de los esfuerzos residuales (Norma ASTM E837)

3.6.1 Pieza de Trabajo delgada. (23) (Esfuerzos Uniformes)

Para muestras de espesores delgadas (espesor $\leq 0.4D$ para condiciones de esfuerzos planos, donde D es el diámetro de la galga extensométrica, específico para el tipo de roseta) el orificio que se realiza atraviesa en su totalidad el espesor de la muestra, el esfuerzo residual es considerado uniforme en la dirección de la profundidad, por lo que la perforación se realiza en un solo paso y se toma únicamente una lectura de elongación de cada galga (ε_1 , ε_2 , ε_3). Las siguientes ecuaciones deben ser calculadas con los valores de elongación obtenidos:

$$p = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{2} \quad q = \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)}{2} \quad t = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)}{2} \quad (3.2)$$

Donde p es la componente de deformación hidrostática, q y t son las componentes de deformación cortante. Los componentes de esfuerzos P, Q y T son calculados de los valores de p, q y t con las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = -\frac{Ep}{\bar{a} \cdot (1 + \nu)} \quad Q = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} = -\frac{Eq}{\bar{b}} \quad T = \tau_{xy} = -\frac{Et}{\bar{b}} \quad (3.3)$$

Finalmente para utilizar el esfuerzo principal se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (3.4)$$

La dirección del esfuerzo principal está dado por el ángulo β que se forma entre la dirección del esfuerzo y la posición del sensor 1; β está dado por la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) \quad (3.5)$$

La dirección del ángulo es definida en gran medida por la tabla 3.1, la cual depende de los valores de T y Q

Tabla 3.1.- Convención utilizada para ubicar el ° β (ASTM E837) (18)

	Q>0	Q=0	Q<0
T<0	$45^\circ < \beta < 90^\circ$	45°	$0^\circ \leq \beta < 45^\circ$
T=0	90°	undefined	0°
T>0	$-90^\circ \leq \beta < -45^\circ$	-45°	$-45^\circ < \beta < 0^\circ$

3.6.2 Cálculo de esfuerzo residual no-uniforme

Debido a que en este caso los esfuerzos residuales no son uniformes en la dirección de perforación, la Norma ASTM E837-08 Provee un procedimiento para calcular el perfil de esfuerzos residuales de la muestra, donde el valor de esfuerzos residuales es asociado con cada avance en la perforación.

Para cada paso de profundidad j, es posible calcular:

$$p_j = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)_j}{2} \quad q_j = \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)_j}{2} \quad t_j = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)_j}{2} \quad (3.6)$$

La norma ASTM E837 [sección 10.3.1] reporta que para calcular los esfuerzos se utiliza las bases del método integral, el cual toma en cuenta para las constantes ó matrices de calibración cada etapa en la perforación del orificio como se muestra en la figura 3.15. Para calcular el esfuerzo residual por medio de los valores de deformación debido a la relajación de esfuerzos, es necesario seguir los siguientes pasos (23):

- El orificio debe ser realizado con el mayor número posible de incrementos de perforación, de esta forma se visualizan suavizadas las lecturas de las deformaciones reduciendo el ruido.
- Calcular p, q y t para cada profundidad de perforación de la cual tenemos los valores suavizados de deformación (en la norma ASTM E837 para los esfuerzos no uniformes se obtienen un valor cada 0.05 mm de profundidad, por lo que se obtiene 20 valores en el primer mm) con las ecuaciones (23).
- Con los valores obtenidos de p, q y t, la siguiente combinación de esfuerzos debe ser calculada para cada profundidad de perforación:

$$\bar{a} \times \vec{P} = \frac{E}{(1+\nu)} \times \vec{p} \quad \bar{b} \times \vec{Q} = E \times \vec{q} \quad \bar{b} \times \vec{T} = E \times \vec{t} \quad (3.7)$$

Los sistemas matriciales obtenidos proveen los resultados para los valores de P_k , Q_k y T_k . Estos valores dependen de los esfuerzos residuales que se muestran en las siguientes ecuaciones

$$P_k = \frac{[(\sigma_y)_k + (\sigma_{yx})_k]}{2} \quad Q_k = \frac{[(\sigma_y)_k - (\sigma_{yx})_k]}{2} \quad T_k = (\tau_{xy})_k \quad (3.8)$$

Los esfuerzos principales máximos y mínimos, así como β (el ángulo entre el esfuerzo máximo y el sensor de referencia 1). Son calculados para cada profundidad de perforación con las siguientes ecuaciones.

$$(\sigma_{max})_k, (\sigma_{min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \quad (3.9)$$

$$\beta_k = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{-T_k}{-Q_k} \right) \quad (3.10)$$

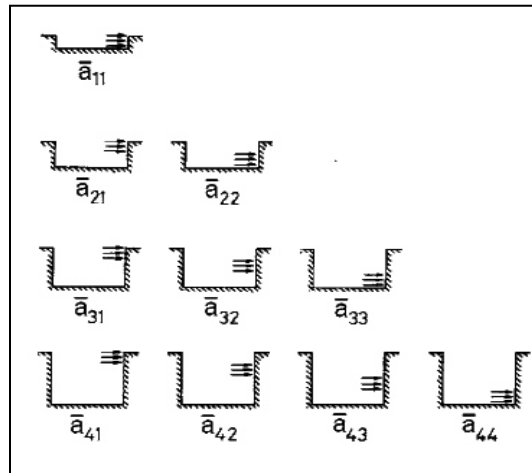


Figura 3.15.- Etapas de perforación:
Interpretación física del coeficiente $\bar{a}_{i,j}$ (18)

CAPITULO 4

EXPERIMENTACIÓN

4.1 Introducción

En este capítulo se muestra las técnicas utilizadas para realizar la experimentación, describe también el plan de trabajo para realizar las pruebas necesarias para obtener resultados para esta investigación. El plan de trabajo está dividido en 5 etapas las cuales fueron realizadas en diferentes tiempos, cuatro etapas fueron realizadas en el laboratorio del centro de servicio del Grupo Villacero y la quinta etapa fue realizada en el laboratorio de la FIME. Además se incluye en este mismo capítulo una sección de algunas consideraciones básicas para realizar las pruebas con el método seleccionado para obtener los valores del estado esfuerzos residuales en el perfil de las muestras seleccionadas para el estudio.

4.2 Método Experimental

Como se menciona en capítulos anteriores (capítulo 1) existe una variedad importante de técnicas o métodos utilizados para medir esfuerzos residuales, por lo cual fue necesario conocer un poco de ellos, aunque debido a las características de las muestras que se utilizaron y también a que se busca hacer las mediciones basadas en una norma internacional que certifique y estandarice este tipo de mediciones, se encontró un método el cual cumple con las características que se necesitan para este estudio, este método es conocido como “Hole-Drilling” y es apto para realizar estas pruebas debido a que permite hacer pruebas en muestras o piezas en sus dimensiones reales, se describe como una prueba semi-destructiva y está basada en la norma ASTM-E837 [1], en la cual como se mencionó en capítulos anteriores (capítulo 3) se encuentran los lineamientos para realizar el ensayo y para evaluar los resultados de una manera estándar.

4.3 Descripción del Equipo utilizado (instrumentación)

4.3.1 Equipo para medir un perfil de esfuerzos residuales

Se utilizó un equipo creado por la empresa SINT Technology (RESTAN MTS 3000) el cual trabaja apegándose a la norma ASTM-E837 que establece los principios y características de la medición a realizar. La prueba consta de una pequeña perforación aproximadamente de 1.8 mm de diámetro en el centro geométrico de un sensor indicador de deformación (roseta de galgas extensométricas) (Figura 4.1); El método da mediciones localizadas que indican los esfuerzos residuales planares en los límites del orificio realizado.

Principales Características del equipo.

- Alta velocidad de giro de broca (400,000 RPM).
- Proceso de Perforado y adquisición de datos totalmente automatizado.
- Alta repetitividad en los resultados.
- Control pasos de perforación automático.
- Alta precisión de medición.
- Diferentes métodos de cálculo de esfuerzos residuales.
- Totalmente apegado a la Norma ASTM-E837.
- Dispositivos del Equipo RESTAN MTS 3000 (Figura 4.2)

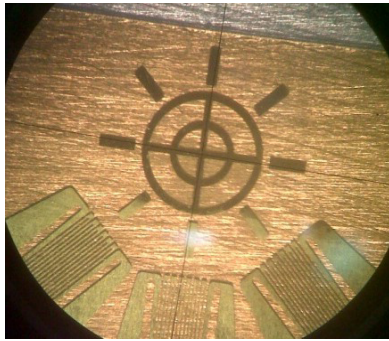


Figura 4.1.- Objetivo Geométrico de una roseta compuesta de 3 galgas extensométricas



Figura 4.2.- Dispositivos que integran el equipo RESTAN MTS 3000 (31)

4.3.1.1 Spyder 8.

El Spider 8 (figura 4.3) es un sistema electrónico de medición, recolector de datos de variables mecánicas como por ejemplo deformación, fuerza, presión, aceleración y temperaturas. Convierte las señales analógicas a digitales y se conecta a la computadora mediante un puerto de impresora o vía un cable que convierte de puerto serial a puerto usb.

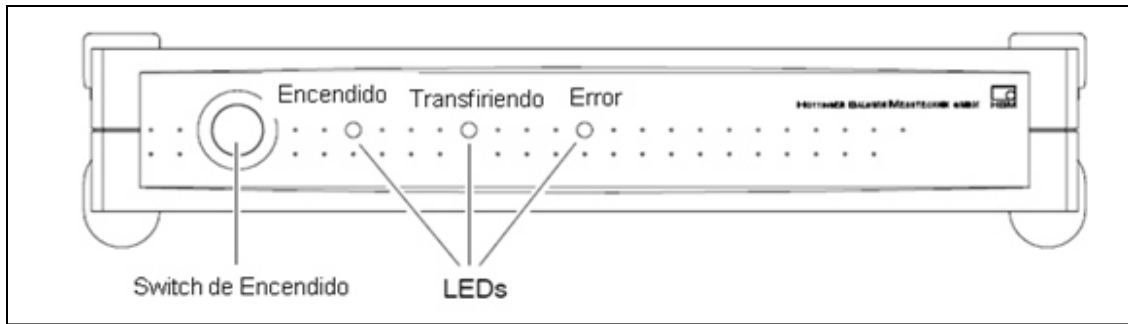


Figura 4.3 Vista Frontal del Spyder 8

4.3.1.2 Dispositivo de control electrónico.

El controlador RSM6 (figura 4.4) es el encargado de manejar la velocidad de avance del taladro, controla también la alimentación de aire a la turbina del taladro mediante una válvula, también cuenta con un indicador de presión (5) y luces indicadoras de encendido (1).

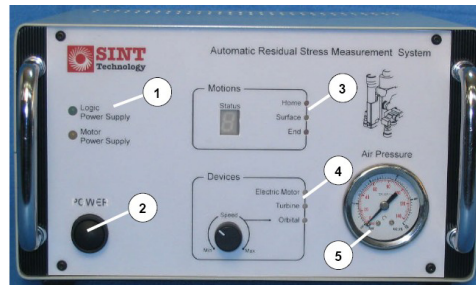


Figura 4.4 Carátula del dispositivo de control electrónico (26)

4.3.1.3 Laptop (software) para control de prueba y analizar datos

La computadora es la encargada primeramente de controlar todos los dispositivos mediante el software de configuración de la Prueba (RMS 6), en el cual se configuran velocidades de avance, se captura información sobre el material que se va a ensayar, se puede variar el tipo de avance del taladro

(Lineal, Polinomial y mixto), se programa la profundidad del orificio, etc. De igual manera la computadora, mediante el software de evaluación, es la encargada de realizar el análisis de los datos de deformación y obtener los valores de esfuerzos de acuerdo a las distintas normas y métodos de cálculo que existen.

4.3.1.4 Dispositivo Mecánico/óptico (Taladro Alta velocidad)

El dispositivo mecánico/óptico (figura 4.5) consiste de una base pequeña de tres ejes equipado con un microscopio y una turbina de alta velocidad. La unidad óptica o microscopio se utiliza para dos finalidades, la primera es para poder centrar el taladro en el objetivo o centro geométrico de la galga extensométrica y en segundo lugar nos sirve para poder medir las dimensiones y la excentricidad de los orificios realizados. El dispositivo cuenta con una turbina que funciona con aire comprimido capaz de girar a 400,000 rpm y una pequeña broca (aprox. 1.8 mm) de carburo de tungsteno con forma de cono invertido con punta plana; esta perforación se lleva a cabo a altas velocidades con la finalidad de no introducir nuevos esfuerzos al material debido al taladrado.

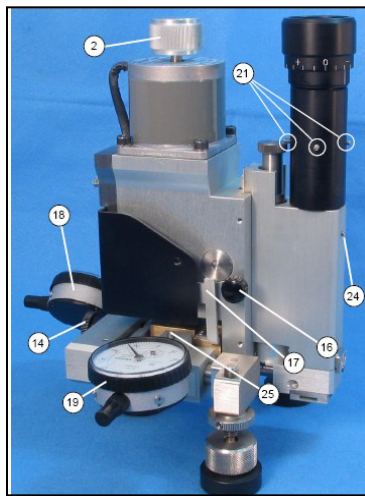


Figura 4.5 Vista lateral del dispositivo mecánico/óptico (26)

4.3.2 Equipo utilizado en pruebas de Tensión

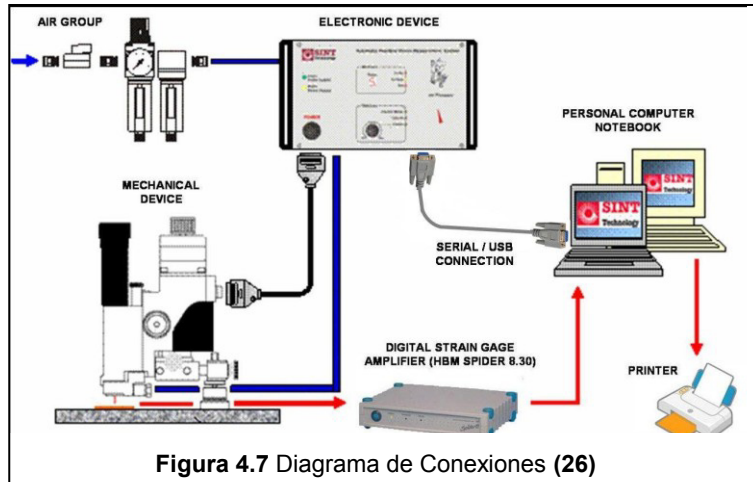
Se utilizó una máquina universal marca Shimadzu (figura 4.6), para realizar las pruebas de tensión de acuerdo a la norma ASTM-E8, con una velocidad de desplazamiento de 10 mm/ min.



Figura 4.6 Máquina Universal Shimadzu

4.4 Conexiones del equipo

Para ver a detalle las conexiones, revisar el manual de operación proporcionado por el proveedor del equipo. A continuación en la figura 4.7 se puede observar a grandes rasgos las conexiones que se tienen que realizar para poder operar el equipo.



4.4.1 Ubicación del dispositivo de mecánico/óptico (taladro). Alineación

Tener una perforación fuera de la zona objetivo (centro geométrico de la roseta) produce un orificio excéntrico lo cual produce errores significativos en la medición de los esfuerzos residuales. Para evitar esto, se utiliza el dispositivo óptico que se ha adecuado en el equipo. Primeramente se coloca el dispositivo cerca de la roseta con las galgas extensométricas, como se muestra en la figura 4.8.

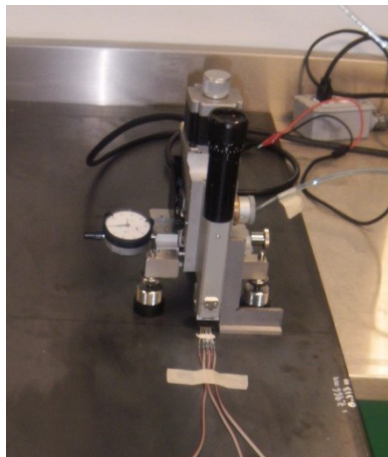


Figura 4.8 Alineación dispositivo mecánico/óptico

Se coloca el dispositivo óptico en la parte superior de las galgas extensométricas, como se muestra en la figura 4.8. Una vez colocado de esta manera se gira 45° la pieza que sujeta la broca y la turbina (figura 4.9) para poder ver por el dispositivo óptico y hacer que coincidan los ejes marcados en la unidad óptica con el objetivo marcado en la roseta con las galgas extensométrica.

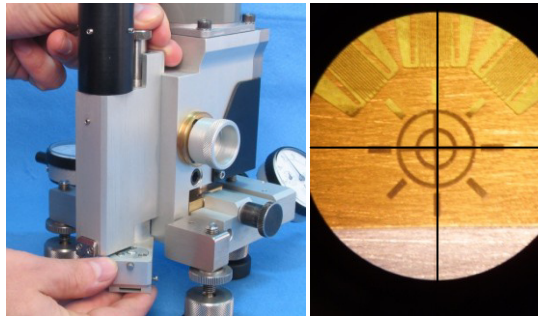


Figura 4.9 centrado del objetivo (26)

Antes de continuar con la realización de la prueba es necesario también verificar la perpendicularidad del equipo respecto a la zona donde se realizará la prueba, para revisar esto se utilizo una escuadra de 90 ° tipo L (figura 4.10), con la cual se puede minimizar o eliminar otra fuente de error en las mediciones

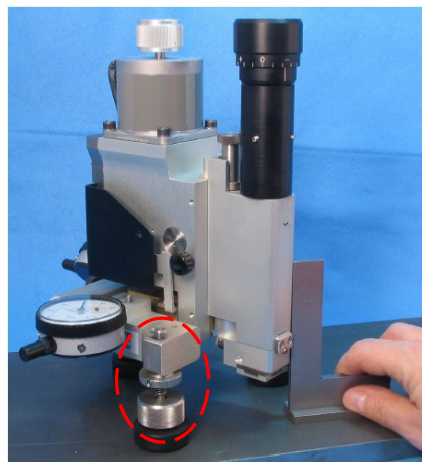


Figura 4.10 Verificar perpendicularidad (26)

Para realizar ajustes en la perpendicularidad del equipo se utilizan los pies magnéticos (ver figura) los cuales se giran para subir y/o bajar el equipo hasta tener el equipo alineado perpendicularmente a la superficie de trabajo.

4.4.2 Detección de la superficie del material

Antes de comenzar a realizar el orificio y obtener los datos de deformación, es necesario que el equipo detecte la superficie del material, y que la reconozca como posición, profundidad cero, esto lo realiza el equipo, ya que es capaz de identificar precisamente cuando la herramienta hace contacto con el material, esto lo hace midiendo una resistencia entre material y el equipo de perforación. Esto garantiza que el orificio tendrá la profundidad de avance calibrada en el equipo. Para realizar esta operación, el equipo utiliza un cable tipo BNC con terminación de puntas cocodrilo, este debe ser conectado al dispositivo mecánico/óptico como se ve en la figura 4.11 y el otro extremo deberá estar conectado al dispositivo controlador electrónico (RSM6) en la entrada marcada en rojo en la figura 4.12.

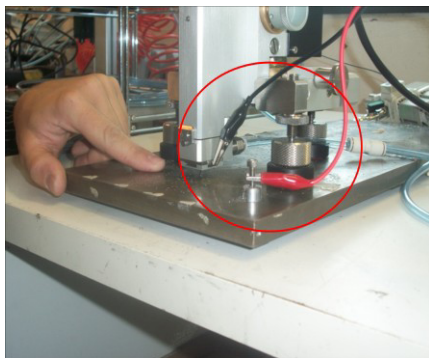


Figura 4.11 conexión de cable para detectar superficie del material

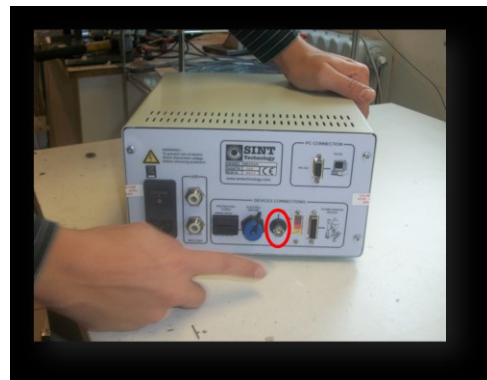


Figura 4.12 conexión de cable BNC

Una vez que se tienen realizadas las conexiones anteriores, se acerca verticalmente la broca lo más cercano posible a la superficie pero sin tocarla, realizado lo anterior, el proceso se continua en el software de control con el cual se controlará el avance del taladro que se detendrá automáticamente cuando la

herramienta haga contacto con la superficie del material, tomando esta posición como posición cero.

Nota: cada vez que se realice cambio de broca y/o turbina se debe realizar este procedimiento (4.4.2) sobre la superficie del material, sin galgas extensométricas, esto debido a que si la broca es nueva, en algunas ocasiones el equipo tarda en reconocer la superficie, por lo que puede realizar una pequeña perforación y tomar esta profundidad como profundidad cero, lo cual introduce errores en las mediciones.

4.4.3.- Obtención de Datos

Una vez realizados los pasos anteriormente mencionados, se puede dar inicio a la prueba por medio del software instalado en la computadora. De esta manera el dispositivo mecánico/óptico comenzará a realizar el orificio en una serie de etapas de perforación, deteniéndose entre cada etapa un tiempo aproximado de 4 segundos para que el equipo (spyder8) obtenga los cambios en las resistencias y lo traduzca a valores de micro-deformaciones, estos valores son almacenados en la computadora y el software va mostrando una gráfica de elongación vs profundidad (figura 4.13).

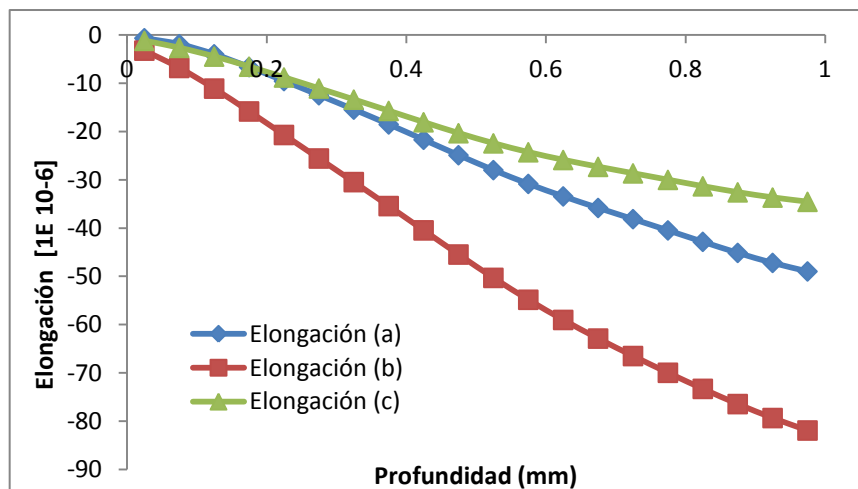


Figura 4.13 Grafica obtenida (elongación vs profundidad)

Al terminar la perforación del orificio a la profundidad que se configuró en el sistema, se cuenta con los datos de las 3 galgas extensométricas para cada valor de profundidad. Además de esto es necesario realizar una medición del diámetro del orificio realizado, esto se hace con la unidad óptica y las perillas de desplazamiento en X y Y, viendo el desplazamiento en los micrómetros adaptados al equipo. Al alimentar estos valores al sistema, éste calcula la excentricidad (sección 4.4.4) para aplicar un valor de corrección para el cálculo los esfuerzos residuales. Con el Software de análisis de datos (Eval 12) se carga la información obtenida de la prueba y el software da la opción de mostrar los esfuerzos calculados por diferentes métodos. Para este estudio se utilizó el método que maneja la Norma ASTM - E837 para obtener esfuerzos residuales no uniformes. Al seleccionar el método automáticamente entregara dos gráficas, como las que se muestran a continuación en la figura 4.14 en la primer gráfica (figura 4.14a) se pueden observar los valores de los esfuerzos máximos y mínimos, así como el ángulo en que se orienta el esfuerzo máximo respecto a la galga extensométrica de referencia (1), graficados contra los valores de profundidad del orificio. En la segunda grafica (figura 4.14b) se tienen los valores de esfuerzos equivalentes con el criterio de Von Misses o Tresca, calculados a partir de los esfuerzos principales máximos.

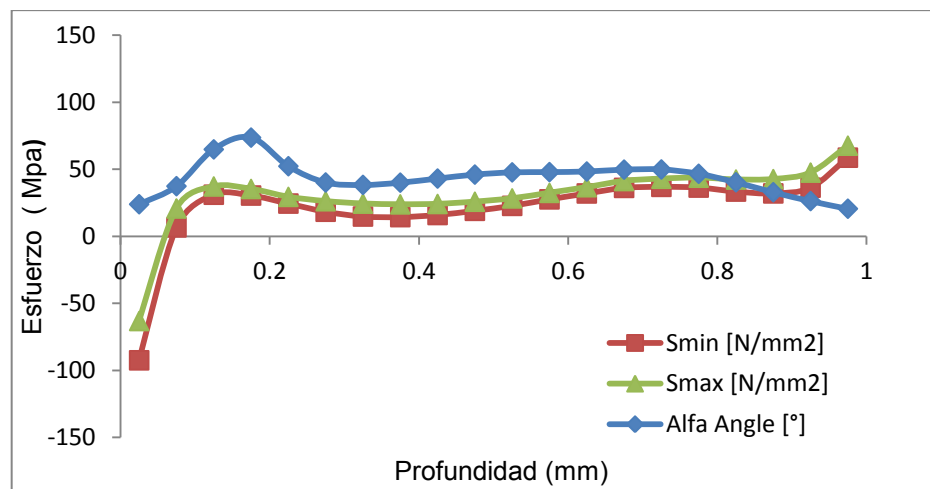


Figura 4.14 (a) esfuerzo mínimo y máximo vs Profundidad.

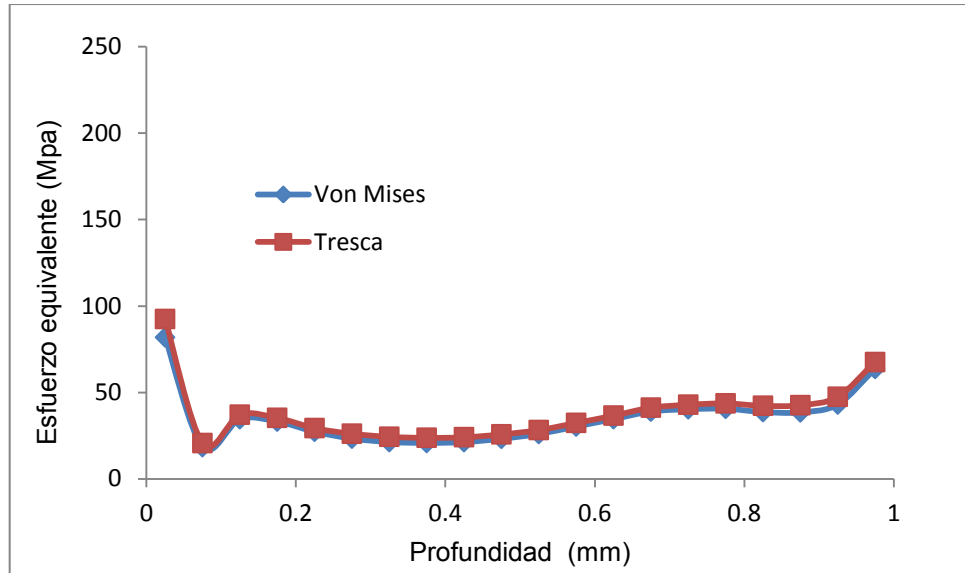


Figura 4.14 (b) Esfuerzos equivalentes Von mises y Tresca vs Profundidad

De esta manera se obtienen los valores de esfuerzos residuales en el primer milímetro de profundidad de acuerdo a la norma ASTM – E837 [1].

4.4.4 Medida de diámetro y excentricidad del orificio realizado

Después de haber generado el orificio en su totalidad, es necesario tomar medidas del orificio realizado y el desfase o excentricidad respecto al centro geométrico de la galgas extensométricas o roseta.

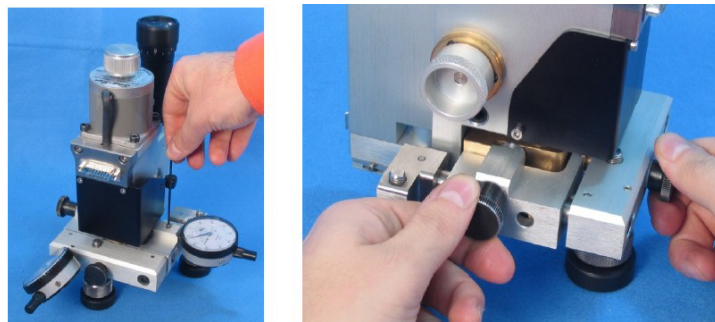


Figura 4.15 Micrómetros y perillas de desplazamiento (26)

Para obtener el diámetro y la excentricidad del orificio primeramente es necesario medir el desplazamiento de la cruz en el dispositivo óptico utilizada para centrar el equipo, desplazándola en las cuatro direcciones (X+,X-,Y+,Y-) y leyendo el desplazamiento en los micrómetros (figura 4.15) los cuales tienen una graduación de 0.001mm. Los valores obtenidos en las cuatro direcciones son utilizados para calcular el diámetro y la excentricidad del orificio como se muestra a continuación:

$$D_x = (X_1 + X_2) \quad (4.1)$$

$$D_y = (Y_1 + Y_2) \quad (4.2)$$

$$D_{0,M} = \frac{D_x + D_y}{2} \quad (4.3)$$

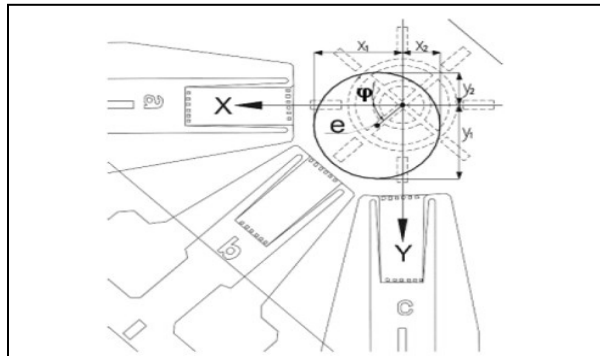


Figura 4.16 Parámetros necesarios para calcular la excentricidad del orificio (23)

Donde la excentricidad y orientación del orificio son:

$$e_x = \frac{X_1 - X_2}{2} \quad (4.4)$$

$$e_y = \frac{Y_1 - Y_2}{2} \quad (4.5)$$

$$e = \sqrt{e_X^2 + e_Y^2} \quad (4.6)$$

Y el ángulo de la excentricidad se calcula con:

$$\varphi = \arctang \left(\frac{e_Y}{e_X} \right) \cdot \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (4.7)$$

4.4.5 Obtención de los valores de esfuerzo

Para obtener los esfuerzos principales y sus direcciones se utiliza el software de análisis el cual nos da diferentes opciones o métodos para calcular los esfuerzos residuales. Se selecciona el método utilizado por la norma ASTM E837 el cual utiliza las ecuaciones mencionadas con anterioridad en el capítulo 3 sección 6 (3.6).

4.4.6 Tiempos de vida de Brocas, turbinas y shocks

Existen diferentes tipos de brocas que maneja el proveedor para utilizar con el taladro, las cuales tienen forma de cono invertido, pero son de distintos materiales. En la figura 4.17 se muestran tres materiales y recubrimientos distintos.



Figura 4.17 Brocas utilizadas para perforación a alta velocidad, la del lado izquierdo es de carburo de tungsteno, la del centro de carburo de tungsteno con recubrimiento TiAlN, y del lado derecho con recubrimiento de diamante.

Existen diferentes diámetros de broca, pero al apegarse esta prueba a la norma se utiliza una broca de 1.8 mm, ya que para la roseta utilizada del tipo B (figura 3.6) se recomienda un diámetro de orificio entre 1.8 a 2 mm según la tabla II.1 que se muestra en el anexo II. Para las pruebas realizadas se utilizó, por recomendación del fabricante, la broca de carburo de tungsteno con un recubrimiento de nitruro de aluminio titanio, debido al tipo de acero donde se realizaron las pruebas, se estimó un tiempo de vida de 10 a 15 perforaciones por broca, pero en la práctica se obtuvieron resultados menos favorables ya que a partir de la cuarta perforación se presentan variaciones en la operación de las brocas que introducen algunos valores de micro-deformaciones (picos) no coherentes en la gráfica.

Se realizaron algunas observaciones en el microscopio óptico confocal para observar la cantidad de desgaste de la broca después de un cierto número de perforaciones. En la figura 4.18 se puede observar una imagen de la parte superior de una broca nueva, y en la figura 4.19 se observa la parte superior de la broca después de 4 perforaciones.

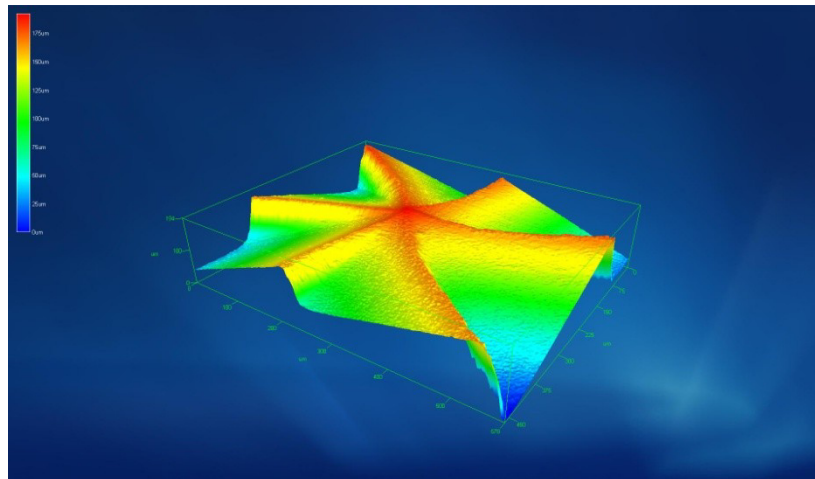


Figura 4.18 Imagen de parte superior una broca nueva

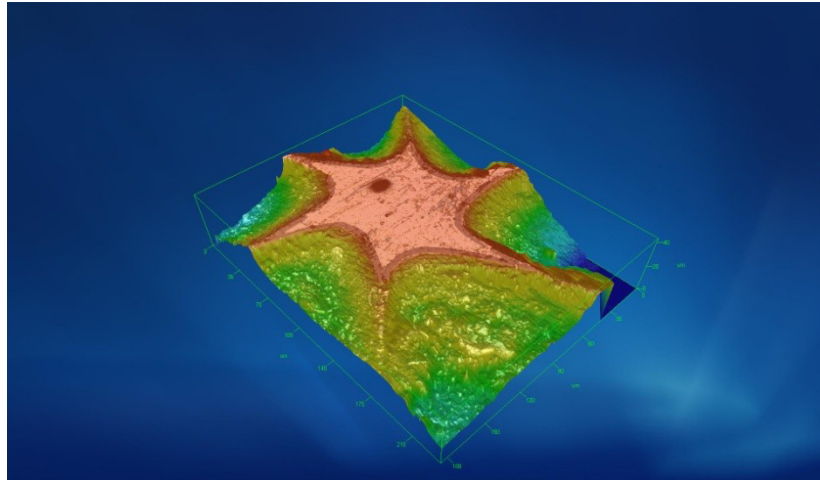


Figura 4.19 Imagen de parte superior broca con 4 perforaciones

Se puede observar que después de aproximadamente 4 perforaciones la broca ya tiene desgaste en los filos y en la punta de la broca, además de que se observa acumulación del material adherido a la broca entre los filos (figura 4.20), posiblemente por el calor que se genera durante la perforación, lo cual puede causar dificultad para lograr la perforación del material, introduciendo variaciones anormales en los valores obtenidos por las galgas extensométricas. Por lo cual se tomó la decisión de cambiar la broca después de realizar un máximo de 4 perforaciones, con lo que se obtuvieron resultados aceptables para la mayoría de las pruebas.

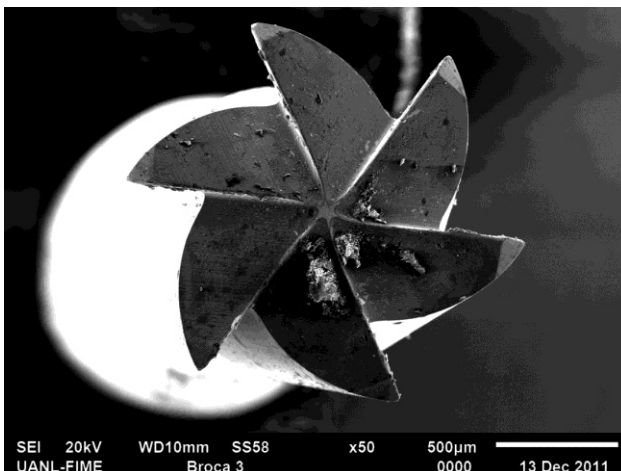


Figura 4.20 Vista superior de una broca con acumulación de rebaba.

En cuanto a la turbina en base a la práctica y a recomendaciones del proveedor, para este material (acero HSLA G50) se obtuvieron buenos resultados cambiando la turbina aproximadamente cada 10 perforaciones, realizando lubricación de la misma cada cambio de broca. Al realizar el cambio de turbina, se realiza a la vez el cambio de shock ya que la turbina viene con shock nuevo.

4.4.7 Lubricación de la Turbina

Con la finalidad de incrementar la vida útil de las turbinas se recomienda lubricarlas con una frecuencia aproximada de cada dos o tres perforaciones, así mismo, con la finalidad de ahorrar tiempo se pueden lubricar en cada cambio de broca el cual se recomienda cada 3 o 4 perforaciones. Para realizar esta operación se retira por completo la turbina del dispositivo mecánico/óptico.



Figura 4.21 Zonas de Lubricación de turbina

Para el proceso de lubricación colocar de una a dos gotas de lubricante en la parte superior de la turbina en el pequeño orificio del rodamiento superior (fig 4.21). Adicionalmente también se puede colocar de una a dos gotas en el orificio de salida de aire (fig 4.21), finalmente se recomienda hacer girar manualmente la turbina, para que el lubricante se disperse uniformemente en los rodamientos (fig 4.1).

4.5 Diseño de Experimento

4.5.1 Material Utilizado

Para estas pruebas se utilizaron dos de los materiales que mayormente procesan en el nivelador de precisión ubicado en el centro de servicio del Grupo Villacero, el cual utiliza como materia prima rollos de diferentes grados de acero los cuales vienen del proceso de laminación en caliente en diferentes espesores y anchos, por lo cual se decidió seleccionaron dos tipos de acero. Acero que es utilizado comúnmente en la industria de la construcción como acero estructural es el HSLA Grado 50 y el Grado 55, los cuales son clasificados como aceros de alta resistencia y baja aleación ó HSLA por sus siglas en ingles, en la siguiente tabla se muestra su composición química según la norma A 1008/A 1008M – 06^a (27).

Tabla 4.1 composición química para acero HSLA

Composición Química														
Designaciones SS , HSLAS y HSLAS-F para hojas y cintas de acero rolado en caliente														
% Análisis Térmico de elementos máximos														
Designación	C	Mn	P	S	Al	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Cb	Ti	N
Grado 50	0.25	.70	0.035	0.035	0.2	0.2	0.15	0.06	0.008	0.006	0.025	...
Grado 55	0.15 0.25	1.65	0.04	0.04	0.2	0.2	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...

4.5.2 Evaluaciones realizadas

Para realizar la experimentación y obtener resultados que ayuden a evaluar los estados de esfuerzos residuales en el producto procesado en el nivelador de precisión marca Braner, se obtuvieron muestras en cuatro etapas, las cuales se mencionan a continuación:

- Variación de los esfuerzos residuales con la posición en la longitud del rollo.
- Efecto del proceso de nivelado sobre los esfuerzos residuales.
- Comparación de esfuerzos residuales en material nivelado o con Temple mecánico.
- Evaluación de material con ambos procesos (Temple mecánico y Nivelado). Evaluación de propiedades mecánicas a tensión.

4.5.2.1 Variación de los esfuerzos residuales con respecto a la posición de la longitud del rollo.

En esta etapa se obtuvieron muestras de tres rollos laminados en caliente en diferentes secciones, así como también en diferentes calibres. Las muestras se obtuvieron después del proceso de nivelado de precisión y se obtuvieron tres muestras de cada uno de los tres rollos seleccionados, las cuales corresponden al inicio del rollo, parte central y parte final del rollo (punta, centro y cola) esto con la finalidad de poder evaluar el perfil de esfuerzos en las tres zonas en la longitud del rollo y de esta manera determinar si los esfuerzos uniformes a lo largo de su longitud son críticos en alguna parte del rollo, además de observar si existen diferencias significativas en el ancho de las muestras obtenidas. Se obtuvieron las muestras en tres calibres distintos lo que permite comparar y determinar si existe algún cambio significativo en los valores de esfuerzo residual, al variar el espesor de la muestra.

En la tabla 4.2 se puede observar la numeración de las muestras obtenidas en esta etapa. La tabla está dividida en tres bloques, los cuales indican los diferentes calibres seleccionados para estas pruebas. Además de que se tienen identificadas las posiciones en el rollo, así como el proceso por el cual pasaron.

Tabla 4.2 Control de Muestras Niveladas

Calibre mm	Posición	Muestra	Colada	# Pruebas Realizadas	Proceso	Grado de Acero
9.525	Punta	6	I44841-1	3	Niv.	G50
9.525	Centro	7	I44841-1	3	Niv.	G50
9.525	Cola	8	I44841-1	3	Niv.	G50
9.525	Cola	13	I44841-1	3	Niv.	G50
12.7	Punta	9	I45026-1	3	Niv.	G50
12.7	Centro	10	I45026-1	3	Niv.	G50
12.7	Cola	11	I45026-1	3	Niv.	G50
7.94	Punta	12	I44778-1	4	HR	G50
7.94	Punta	14	I44778-1	3	Ender.	G50
7.94	Punta	15	I44778-1	3	Niv.	G50
7.94	Centro	16	I44778-1	3	Niv.	G50
7.94	Cola	17	I44778-1	3	Niv.	G50

En la Figura 4.22 se muestra la distribución de los puntos de muestreo realizados en las muestras de la 6 a la 17 (ver tabla 4.2) las cuales fueron obtenidas de distintas zonas del rollo (punta, centro y cola) en tres calibres diferentes, pero manteniendo el mismo grado de acero y dimensiones. Los puntos evaluados son los que se marcan en esta figura (4.22) con los números 1, 2 y 3.

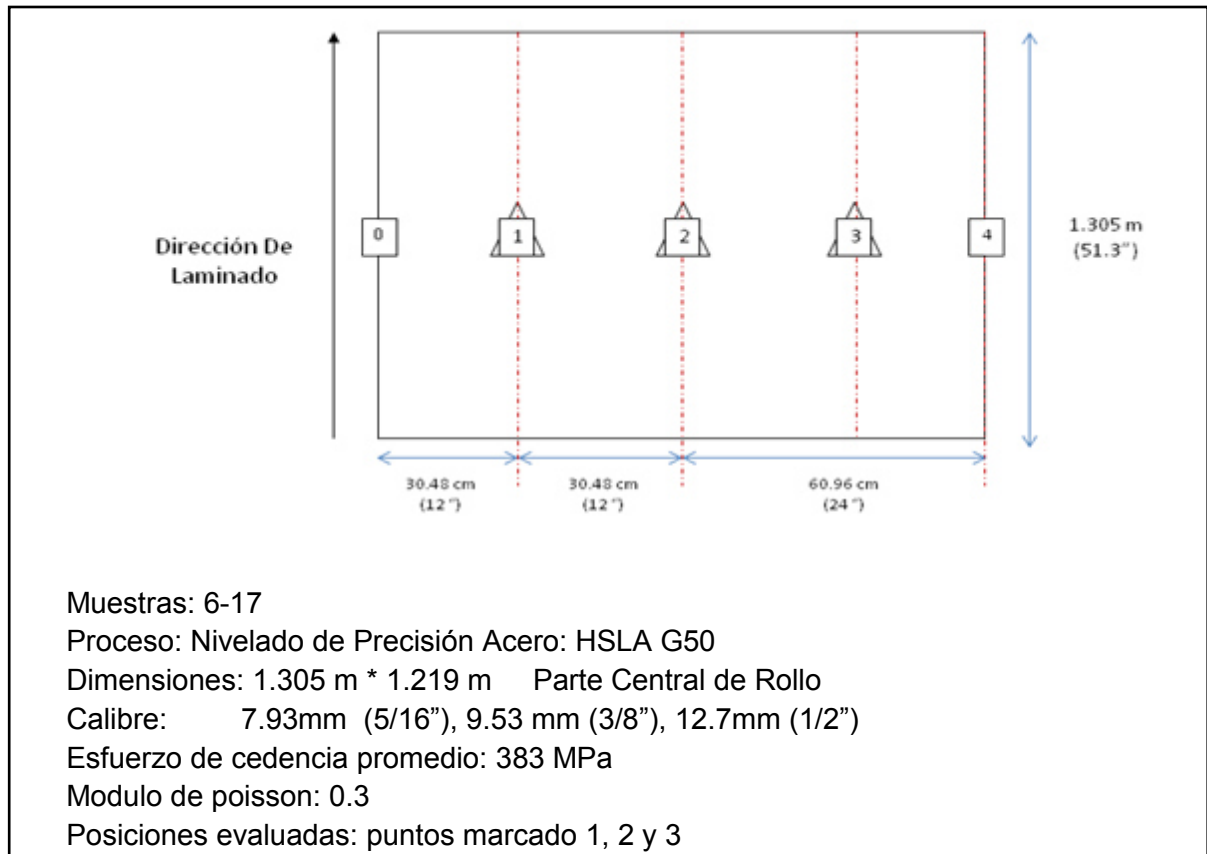


Figura 4.22 Esquema de Muestra y ubicación de Pruebas

4.5.2.2 Efecto del proceso de nivelado de precisión sobre los esfuerzos residuales.

Con el propósito de poder conocer los efectos del proceso de nivelado de precisión se realizó una evaluación de 3 muestras, dos muestras obtenidas de un mismo rollo, una después de pasar por el enderezador que funciona como un pre-nivelado, la segunda después del proceso de nivelado de precisión y una tercer muestra fue obtenida de un rollo con el mismo espesor y mismo tipo de acero, pero se obtuvo directamente de la punta del rollo, sin ningún proceso de enderezado; Las tres muestras fueron evaluadas en el laboratorio para conocer el perfil de esfuerzos residuales. Para esto se seleccionaron zonas específicas,

las cuales están ubicadas de manera que permiten conocer el perfil de esfuerzos residuales a lo ancho y largo de la muestra, y así también compararlas entre sí, de esta manera se obtiene información del efecto que el proceso de nivelado de precisión tiene en relación con los esfuerzos residuales. En la figura 4.23 se muestra la dimensión de la muestra, además se muestran las posiciones donde se realizaron las pruebas y las distancias entre las mismas, con color naranja se muestran las zonas que se evaluaron en ambas muestras, por lo tanto son las que se compararan en la sección de resultados y discusión; la tabla 4.3 tiene la información sobre las muestras (Nivelada y Enderezada respectivamente), el tipo de acero, espesor, y procesos por los que han sido sometidos estos materiales.

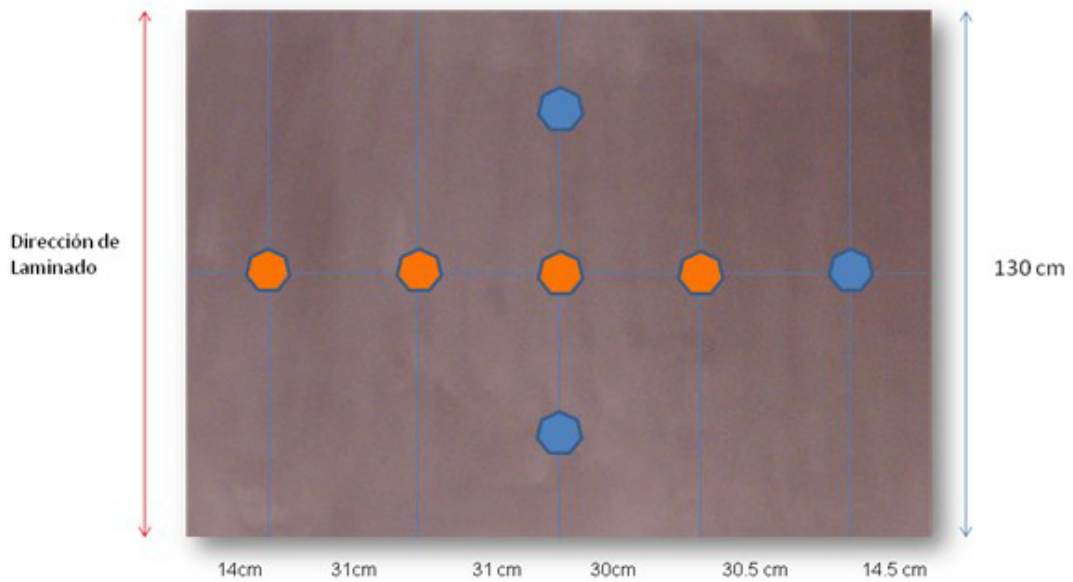


Figura 4.23 Dimensiones de muestra Nivelada, Enderezada y sus posiciones de evaluación

Tabla 4.3 Datos de Muestra nivelada y enderezada

	Muestra 1	Muestra 2
Proceso	Nivelado de Precisión	Enderezado
Material	Acero HSLA Grado 050	
Dimensiones	1.30 * 1.51 mts;	
Calibre	7.96 mm (5/16")	
Esfuerzo de cedencia:	380 Mpa	
Modulo poisson:	0.3	
Modulo de Young (E):	206 GPa	
Pruebas realizadas	7	4
Pruebas comparables	4	

En la Figura 4.24 se observa la muestra obtenida directamente del rollo laminado en caliente, es un acero HSLA grado 50, calibre 7.96mm (5/16"), para la cual se tomo igualmente un modulo de Poisson de 0.3, se consideró un esfuerzo de cedencia de 400 MPa, un modulo de Young de 206 GPa, en esta muestra se realizaron únicamente 4 pruebas en la zona central de la muestra, por la parte exterior de la curvatura y fue cortada con tipo de corte oxiacetilénico de la punta del rollo.



Figura 4.24 Muestra sin proceso después de laminación en caliente

4.5.2.2.1 Evaluación del perfil esfuerzos residuales por ambas caras en una placa de acero procesada en el nivelador de precisión.

Para esta sección se utilizó la muestra #1, los datos de la muestra están en la tabla 4.3 y en figura 4.23 se muestran las zonas evaluadas en la cara superior, una vez realizadas las pruebas en la cara frontal de la placa, se dio vuelta a la muestra para realizar pruebas por la cara inferior y se realizaron 4 pruebas como se muestra en la figura 4.25 para evaluar ambas caras de la muestra.

Muestra No.3 Nivelada; Acero G50; 1.30 * 1.51 mts; Parte central de Rollo; C. 5/16"; C. Inversa

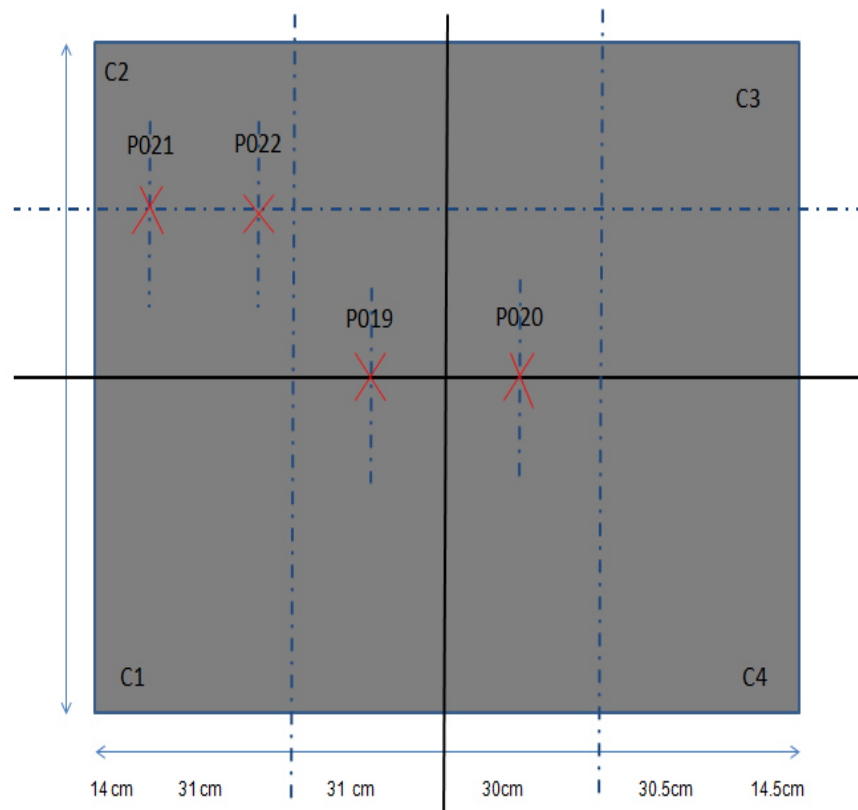


Figura 4.25 Muestra Nivelada, acero grado 50, cara inferior

4.5.2.3 Comparación de esfuerzo residual en material nivelado contra material templado mecánicamente.

Uno de los principales motivos por el cual se decidió realizar esta evaluación es comparar el comportamiento de los dos procesos, así como también, observar como estos procesos modifican el perfil de esfuerzos residuales, cuando se comparan con el perfil obtenido en el material antes del proceso. Los dos procesos que se analizaron son: el proceso de temple mecánico y Nivelado de precisión. Para esto se cuenta con dos rollos laminados en caliente, cabe destacar que ambos rollos tienen las mismas características y propiedades, uno de los rollos fue procesado en el temple mecánico y el otro fue procesado en el nivelador de precisión.

Una vez procesado este material, se seleccionó una muestra de cada rollo, una que se obtuvo del proceso de temple mecánico y otra en el nivelador de precisión de rodillos. En las figuras 4.26 y 4.27 se muestran las dimensiones de las muestras y las posiciones donde se realizaron las pruebas.

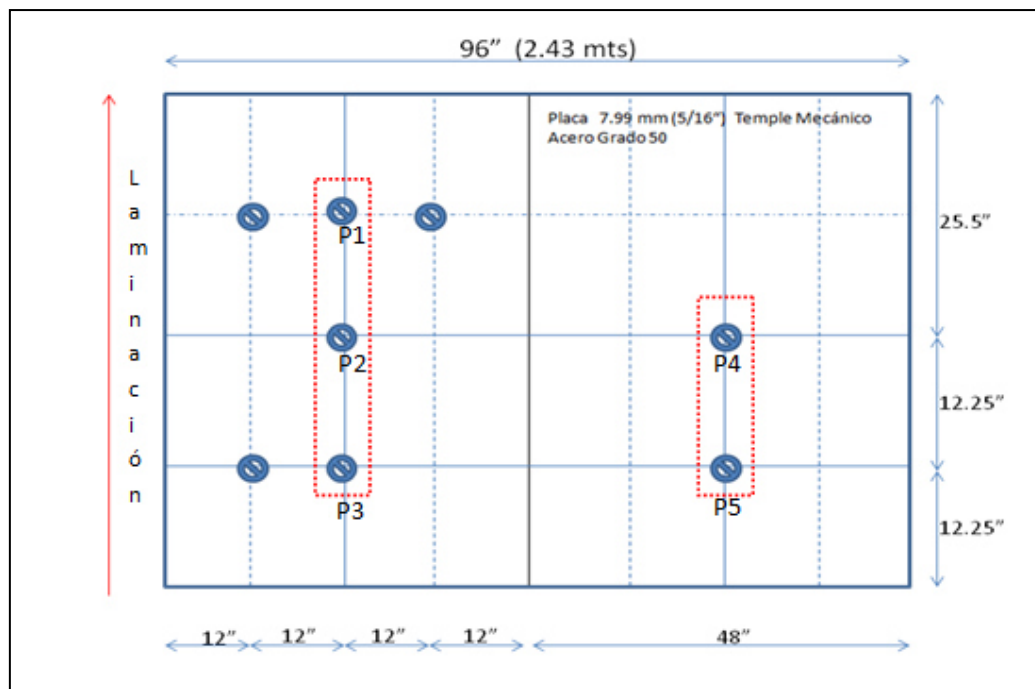


Figura 4.26 localización de puntos de muestreo en Muestra Templada Mecánicamente

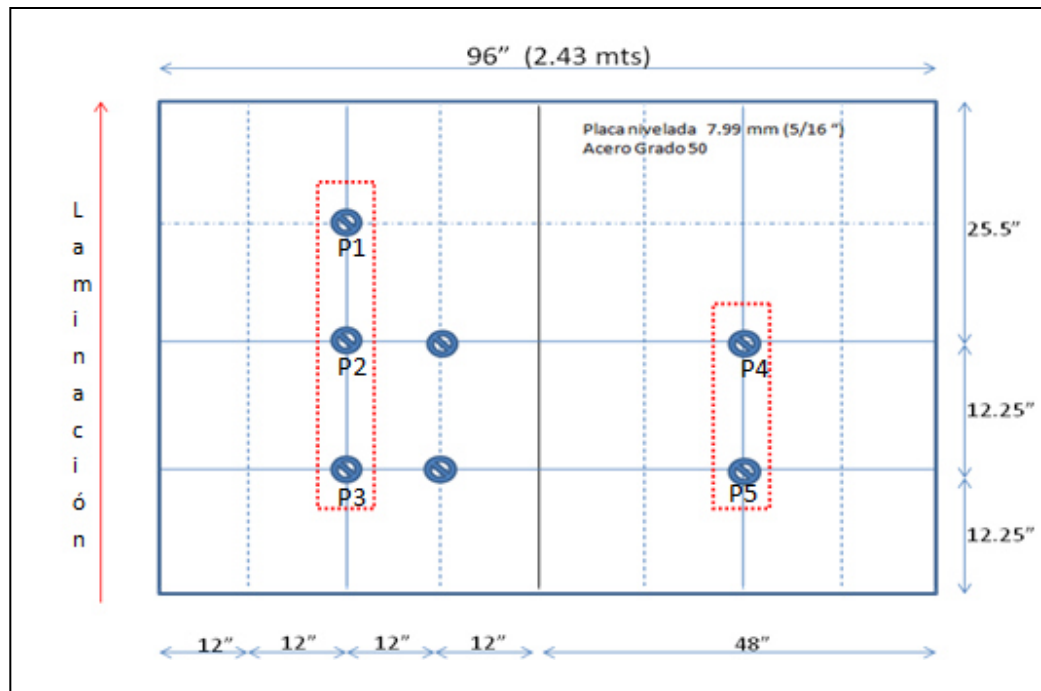
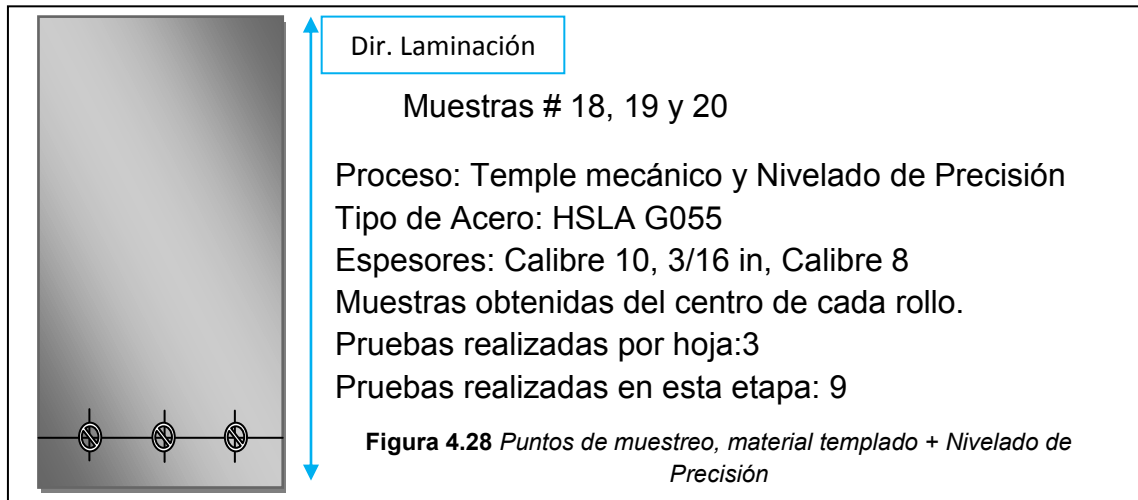


Figura 4.27 Localización de puntos de muestreo en Muestra Nivelada

Donde la figura 4.26 representa la Muestra con proceso de temple mecánico en una placa de acero Grado 50, con las dimensiones descritas en la imagen, se obtuvo aproximadamente de la parte central del rollo es de un espesor de 7.99 mm, y se tomó el valor del módulo de poisson 0.3, y tiene un esfuerzo de cedencia de 470 Mpa. Así como también estas características son las mismas para la placa representada en la figura 4.27, con la diferencia que esta fue procesada por el nivelador de precisión y el material presentará esfuerzo de cedencia menor. Las zonas marcadas con los recuadros punteados en rojo e identificadas como P1, P2, P3, P4 y P5, dentro de las figuras 4.26 y 4.27 son las posiciones comparables para ambas muestras y cuyos resultados serán comparados más adelante.

4.5.2.4.- Evaluación de material con ambos procesos (Temple mecánico y Nivelado)

Como se ha visto en la literatura, el proceso ideal para obtener planeza y controlar los esfuerzos residuales en una hoja o placa de acero es procesar el material obtenido en laminación en caliente realizando un Temple mecánico o Temple mecánico y después de esto pasar a un proceso de nivelado de precisión. Como parte de este estudio se obtuvieron muestras de 3 calibres diferentes que se pasaron por ambos procesos, realizando tres ensayos por muestra como se muestra en la figura 4.28.



4.4.2.5 Propiedades Mecánicas a Tensión

Para realizar un comparativo del nivel de deformación entre un material procesado por un temple mecánico y uno procesado en el nivelador de precisión, se realizaron una serie de ensayos de tensión en el material, obteniendo las probetas aproximadamente en las mismas zonas tanto en muestras niveladas como en las muestras procesadas por el Temple mecánico. Para realizar las pruebas de tensión de acuerdo a la norma ASTM-E8 ^[1], las probetas para los ensayos fueron cortadas en la dirección de laminación y fueron obtenidas como se muestra en la figura 4.29. En la figura 4.30a y 4.30b

se muestran las probetas obtenidas de las muestras niveladas como de las del material procesado en Temple mecánico respectivamente.

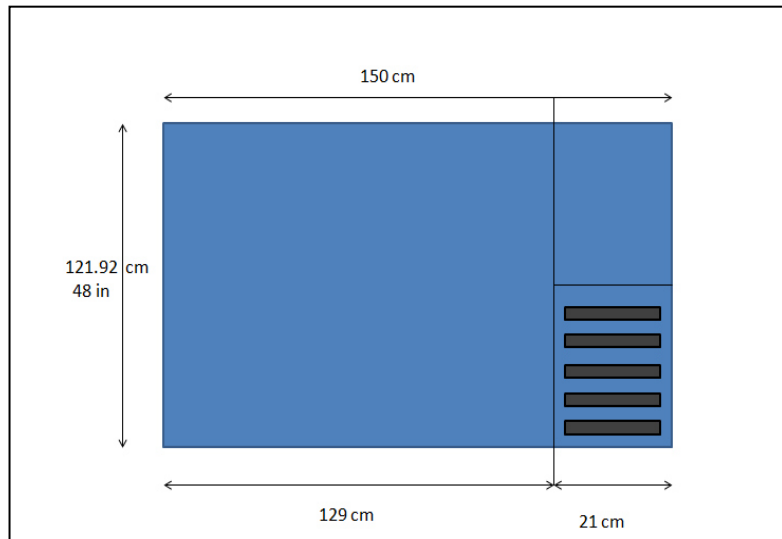


Figura 4.29 Esquema de Muestra y zona de obtención de probetas para ensayos de Tensión



Figura 4.30 (a).- Probetas para ensayos de tensión obtenidas de placas con proceso de Temple Mecánico



Figura 4.30 (b).- Probetas para ensayos de tensión obtenidas de placas con proceso de Nivelado de Precisión

CAPITULO 5

RESULTADOS

5.1 Introducción

En el contenido de éste capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante experimentación, utilizados para evaluar el perfil de esfuerzo residual obtenido en distintas zonas de las muestras, las cuales a su vez se obtuvieron de distintas zonas del rollo de acero laminado en caliente. En la sección 5.2 se muestran los resultados de la evaluación de esfuerzo principal, los cuales fueron obtenidos al realizar las pruebas en material sin proceso alguno, después del embobinado, un enderezado (no nivelado), y con un nivelado de precisión. En la sección 5.3 se muestran los resultados obtenidos al realizar pruebas en material que fue procesado por el nivelador de precisión, las muestras evaluadas fueron obtenidas en la punta, centro y cola en distintos espesores de rollo. En la sección 5.4 se muestran los resultados obtenidos nuevamente de una muestra con proceso de nivelado de precisión y otra procesada en el Temple mecánico. Sección 5.5 se muestra los resultados obtenidos en muestras que fueron obtenidas de material que fue procesado por ambas tecnologías (Temple mecánico y Nivelado de precisión), por ultimo en la sección 5.6 se observan los resultados conseguidos al realizar pruebas de tensión en probetas de material que fue procesado en el temple mecánico y otras de material procesado en el nivelador de precisión.

5.2 Resultados de evaluación de esfuerzo residual, utilizando muestra sin proceso, enderezada y con proceso de nivelado de precisión.

Para comprender el efecto que tiene el proceso de nivelado de precisión en acero grado 50, rolado en caliente se realizaron las pruebas mencionadas en el capítulo anterior, a continuación se muestran los resultados obtenidos en el material evaluado. En la tabla 5.1 se tienen los valores obtenidos de la prueba realizada en el lado operador de la muestra sin proceso (figura 4.24).

Tabla 5.1 Datos obtenidos de la prueba realizada en muestra sin proceso (sin enderezar, sin nivelar)
Espesor 7.96 mm (Lado operador)

Depth [mm]	Strain (a)	Strain (b)	Strain (c)	β [°]	Smin	Smax
0.025	4.186	7.298	4.07	-45.523	-174.505	-57.789
0.075	19.321	35.23	17.028	-47.303	-573.581	-117.294
0.125	30.052	56.684	23.576	-50.211	-317.973	28.784
0.175	34.507	67.16	24.4	-53.927	-53.064	93.803
0.225	35.121	70.175	23.253	70.088	73.507	87.946
0.275	34.369	69.969	22.359	40.018	35.82	116.22
0.325	33.586	69.159	22.123	38.182	7.647	97.786
0.375	33.133	68.702	22.126	38.36	0.898	69.719
0.425	32.905	68.603	21.997	40.366	7.761	52.928
0.475	32.732	68.587	21.728	42.481	12.349	45.273
0.525	32.547	68.471	21.548	41.04	7.939	41.976
0.575	32.378	68.241	21.646	38.201	-4.109	36.776
0.625	32.268	67.971	21.998	36.625	-14.21	31.069
0.675	32.219	67.728	22.385	36.968	-16.515	24.628
0.725	32.184	67.517	22.562	39.904	-6.478	22.706
0.775	32.107	67.304	22.441	47.747	12.929	30.414
0.825	31.974	67.064	22.156	56.086	21.094	32.516
0.875	31.826	66.818	21.97	45.674	15.314	28.212
0.925	31.742	66.632	22.078	35.409	-12.471	11.826
0.975	31.781	66.57	22.449	33.556	-33.344	1.384

De la tabla anterior se toman los valores de los esfuerzos principales máximo y mínimo, así como el ángulo que indica la dirección del esfuerzo máximo y de esta manera se realiza la gráfica de la figura 5.1.

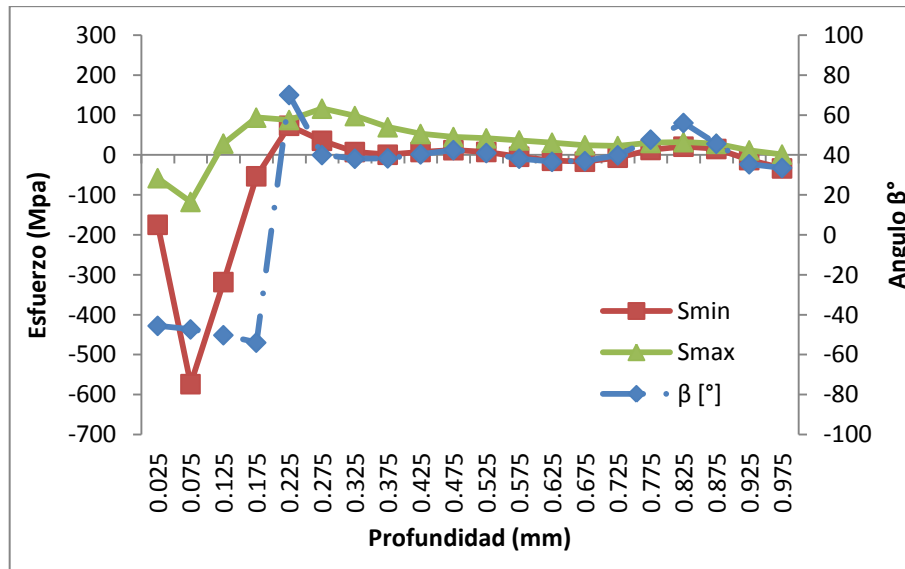


Figura 5.1 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba, realizada en lado operador, Espesor 7.96mm (muestra sin proceso).

De igual manera a partir de los valores obtenidos se realiza esta gráfica para las demás evaluaciones realizadas en el material sin proceso (figuras 5.2, 5.3, 5.4);

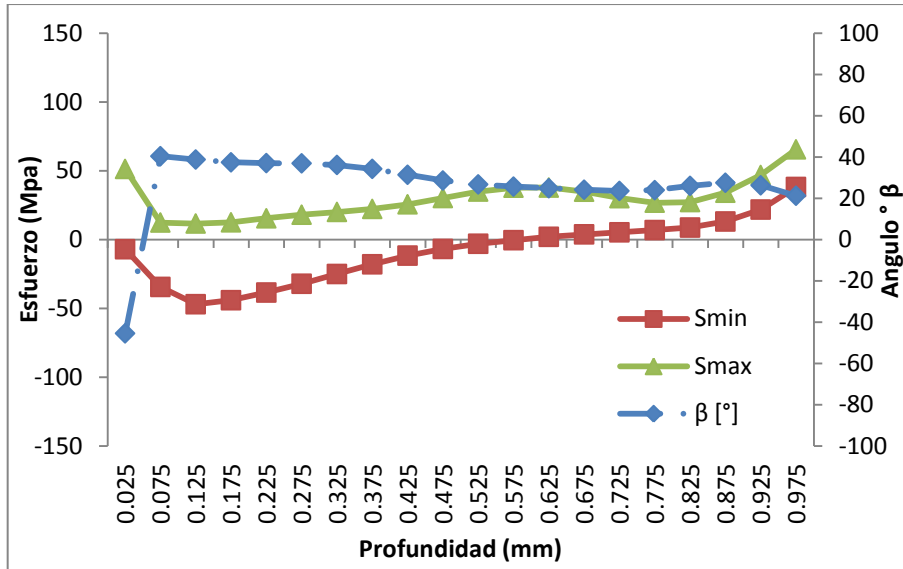


Figura 5.2 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba, realizada a 1/4 del lado operador, Espesor 7.96mm (muestra sin proceso).

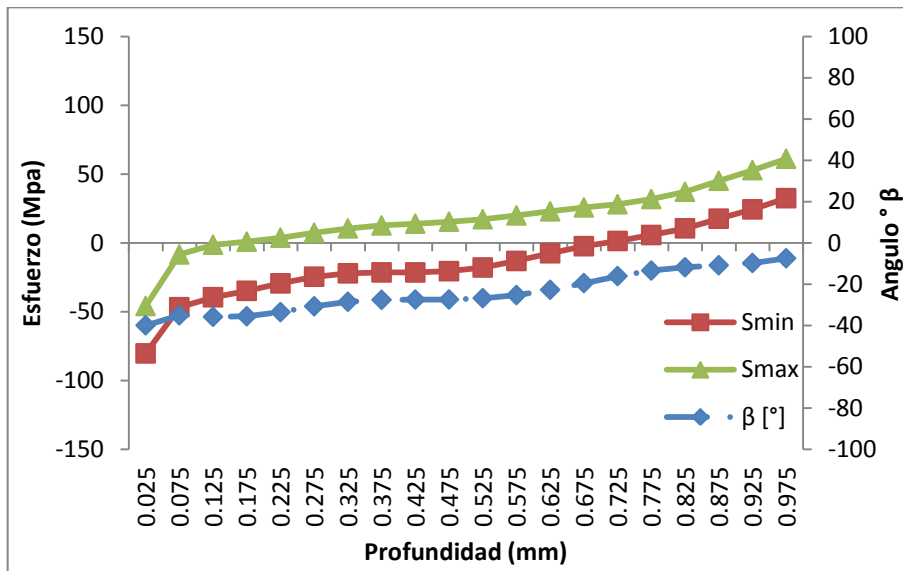


Figura 5.3 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba, Centro. Espesor 7.96mm (muestra sin proceso).

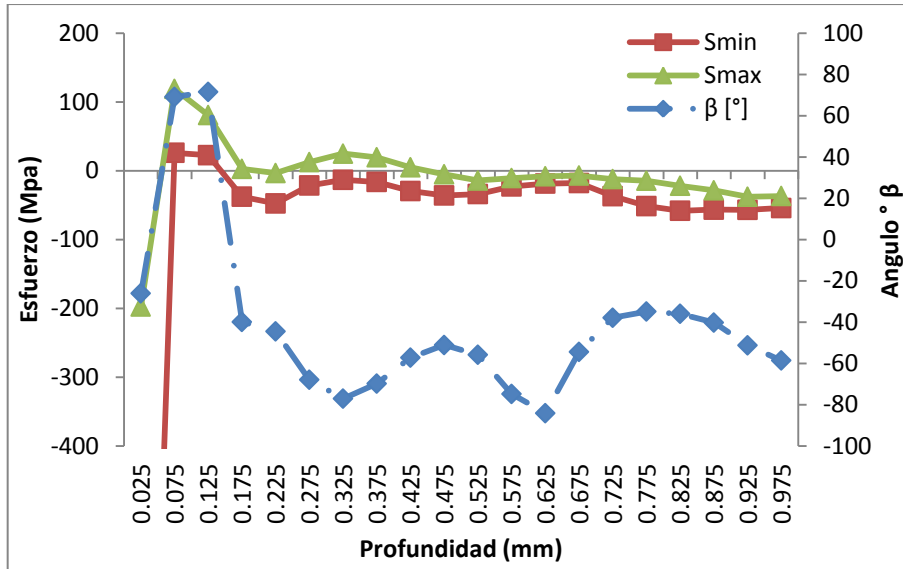


Figura 5.4 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; ¼ lado transmisión, Espesor 7.96mm (muestra sin proceso).

Como se puede observar en las gráficas de las figuras anteriores, no se obtuvo repetitividad alguna entre las pruebas realizadas en esta muestra sin proceso. En las gráficas de las figuras 5.5 - 5.8 se muestran los resultados del material enderezado.

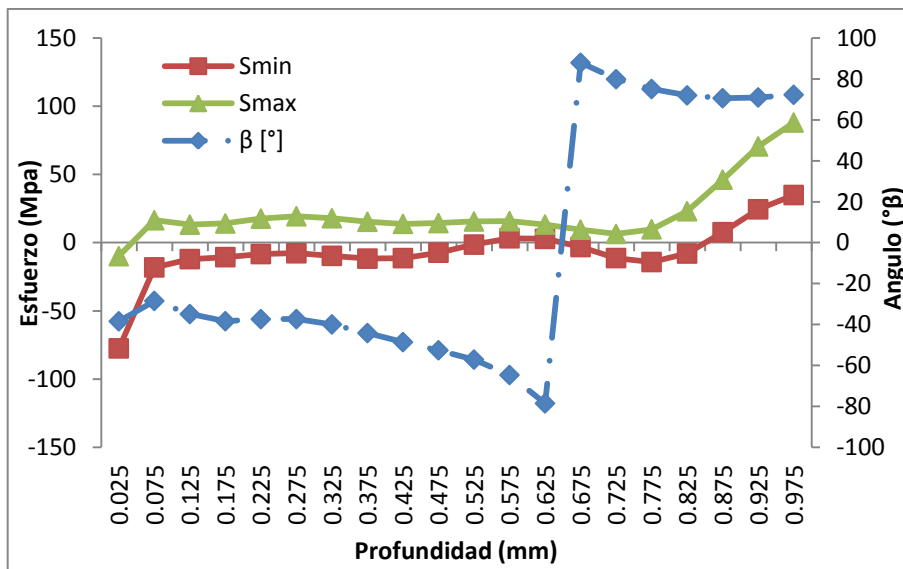


Figura 5.5 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; lado operador, Espesor 7.96mm (muestra enderezada).

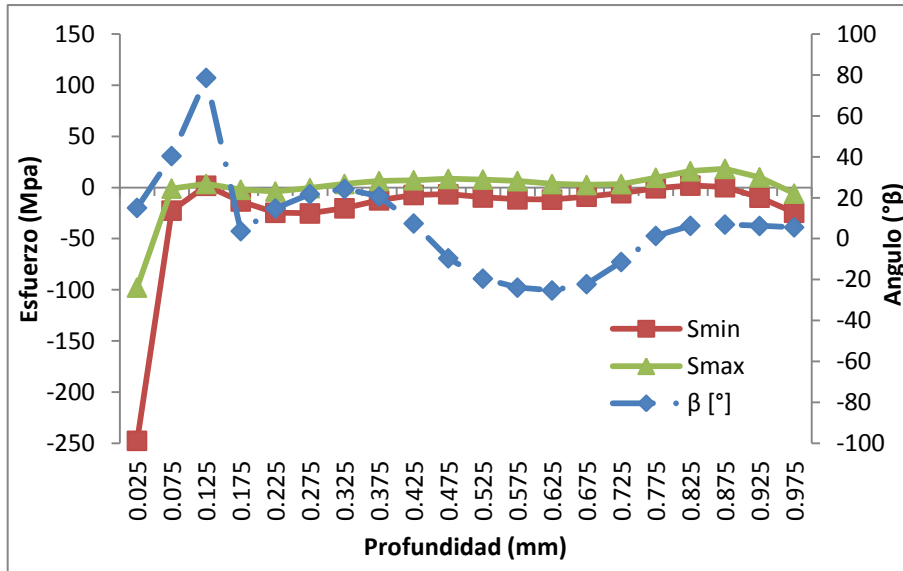


Figura 5.6 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; ¼ lado operador. Espesor 7.96mm (muestra enderezada).

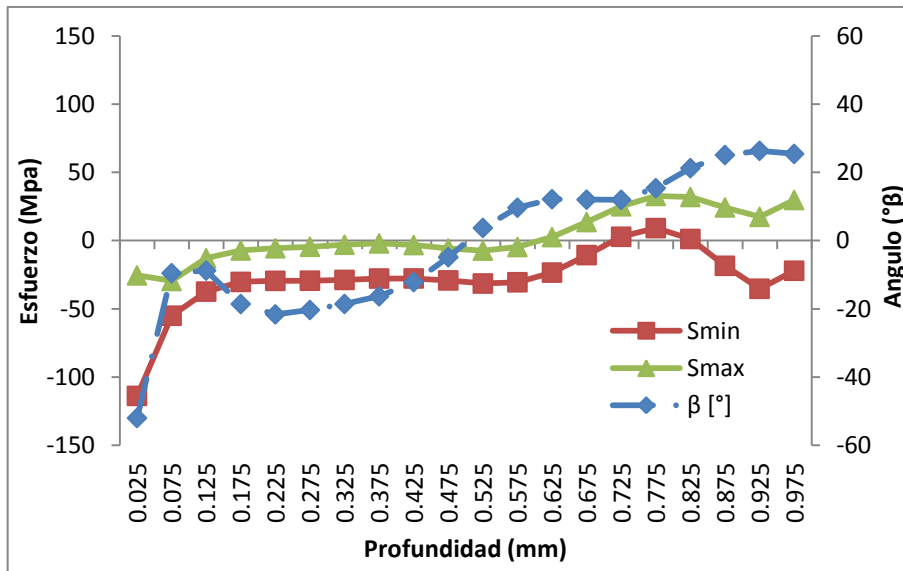


Figura 5.7 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Centro. Espesor 7.96mm (muestra enderezada).

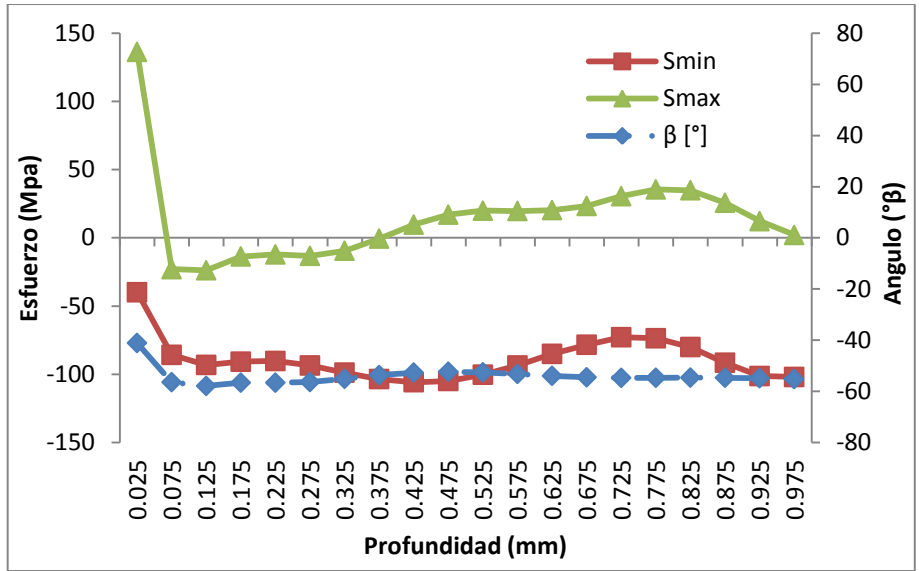


Figura 5.8 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; ¼ lado transmisión. Espesor 7.96mm (muestra enderezada).

Por último se tienen los resultados obtenidos en material con proceso de nivelado de precisión (figuras 5.9 - 5.12), como se muestran en seguida.

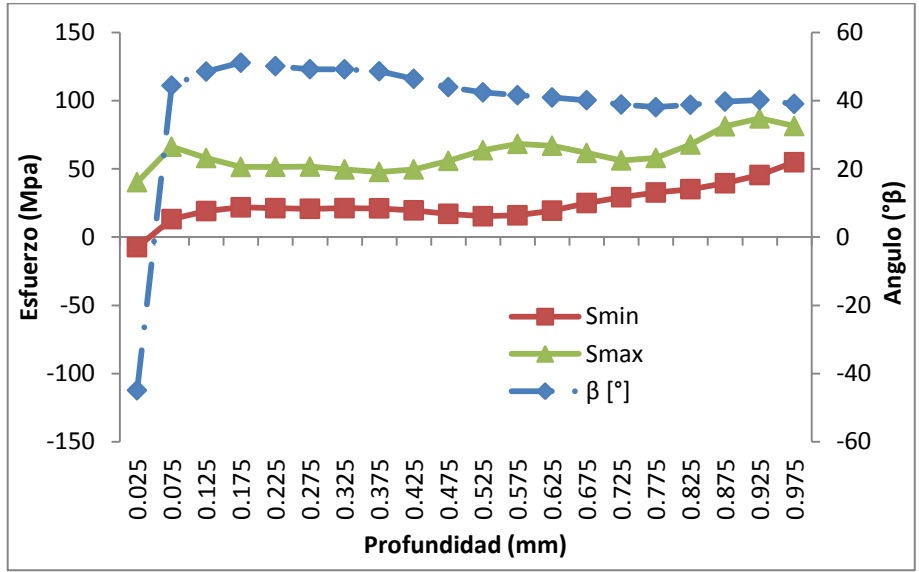


Figura 5.9 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; lado operador. Espesor 7.96mm (muestra Nivelada).

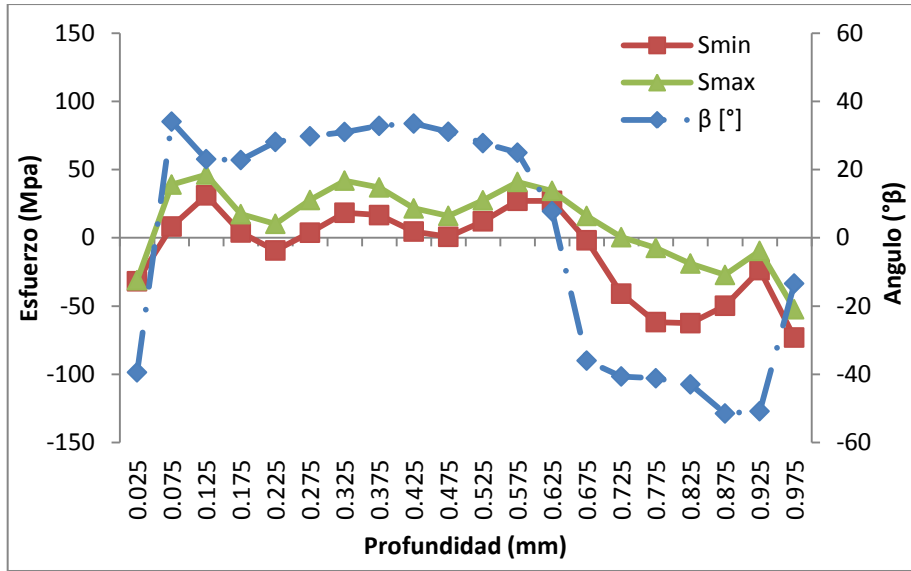


Figura 5.10 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; ¼ lado operador. Espesor 7.96mm (muestra Nivelada).

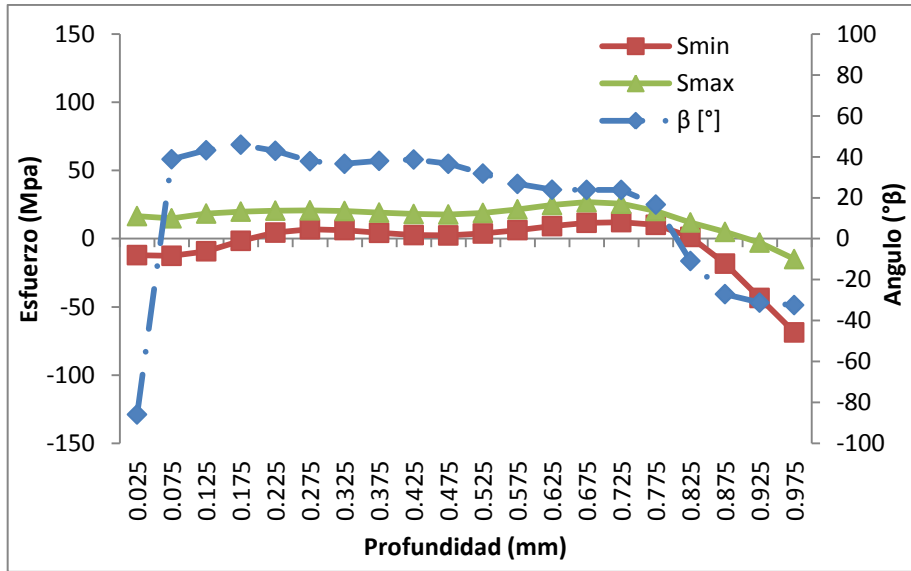


Figura 5.11 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Centro. Espesor 7.96mm (muestra Nivelada).

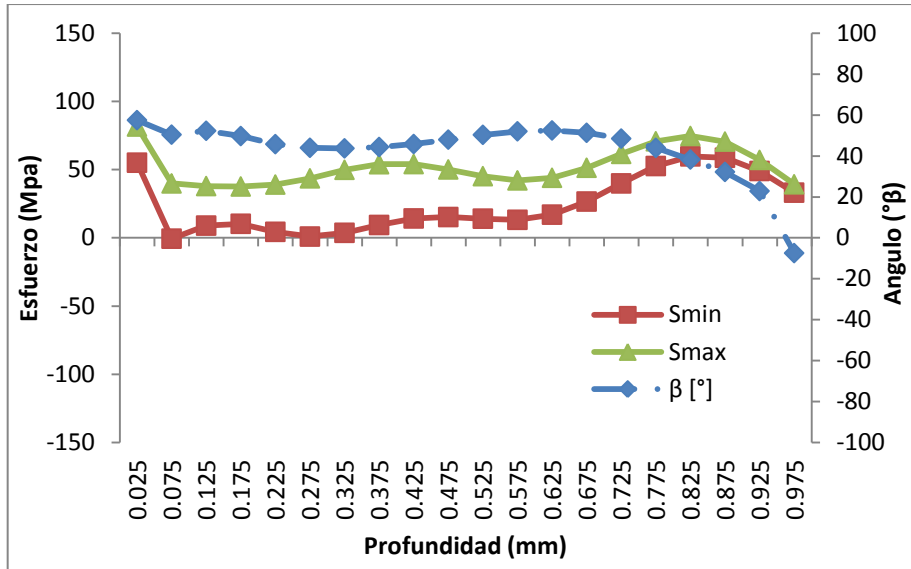


Figura 5.12 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; ¼ lado operador. Espesor 7.96mm (muestra Nivelada).

Para observar las tablas de datos que se utilizaron para realizar las gráficas anteriores, revisar el anexo III donde se encuentran las tablas de datos completas, para cada muestra analizada (Sin proceso, Enderezada y Nivelada). En la figura 5.13 se grafican los valores del ángulo obtenido en las pruebas realizadas en la muestra nivelada.

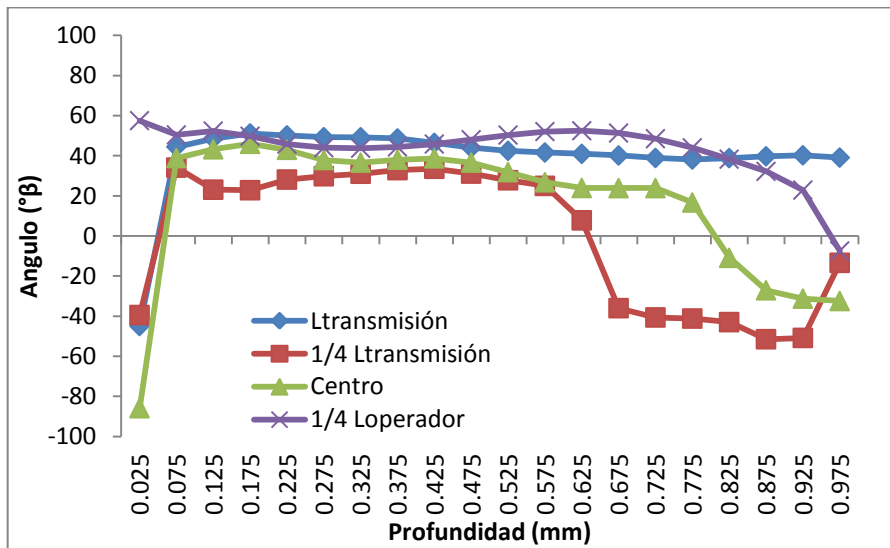


Figura 5.13 Gráfica de ángulo (°β) vs profundidad (mm) en muestra nivelada. Espesor 7.96mm

5.3 Resultados de esfuerzo residual obtenido en la punta, centro y cola del rollo, en distintos espesores de material nivelado.

La finalidad de esta sección es obtener los resultados necesarios para evaluar el comportamiento del esfuerzo residual en la longitud del rollo, y así determinar si se comportan de manera uniforme a lo largo y ancho de las placas niveladas. Las pruebas fueron realizadas como se menciona en el capítulo anterior, en diferentes espesores (9.525mm, 7.94mm, 12.7mm), a continuación se muestran las gráficas realizadas a partir de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas de la punta, centro y cola del rollo con espesor de 9.525 mm, muestras numeradas como número 6, 7 y 8 en la tabla 4.2.

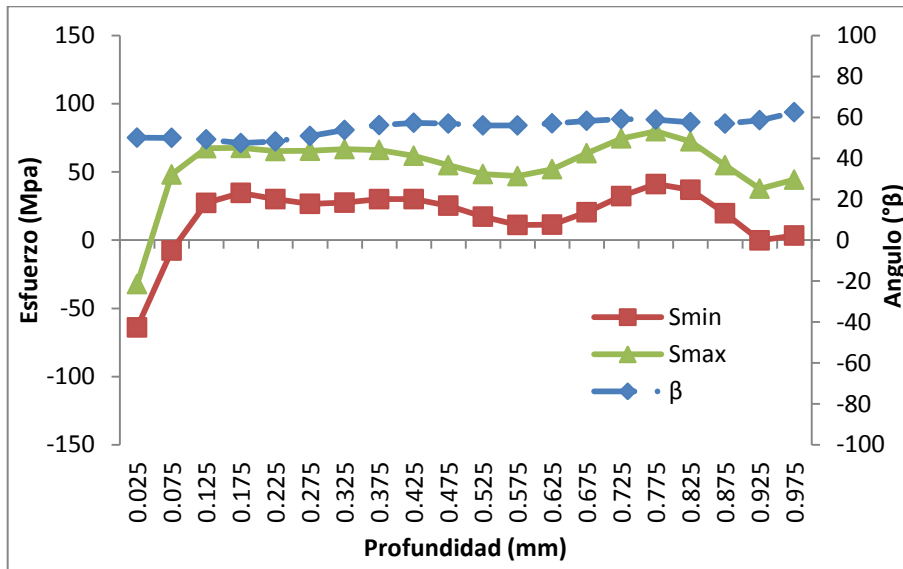


Figura 5.14 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; lado operador. Espesor 9.525 mm (Punta de rollo).

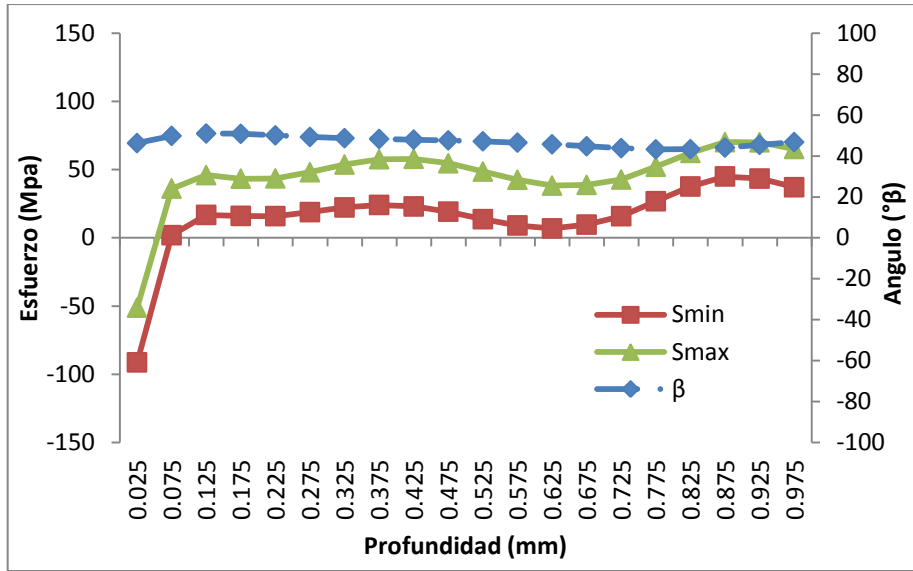


Figura 5.15 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; centro de muestra. Espesor 9.525 mm (Punta de rollo).

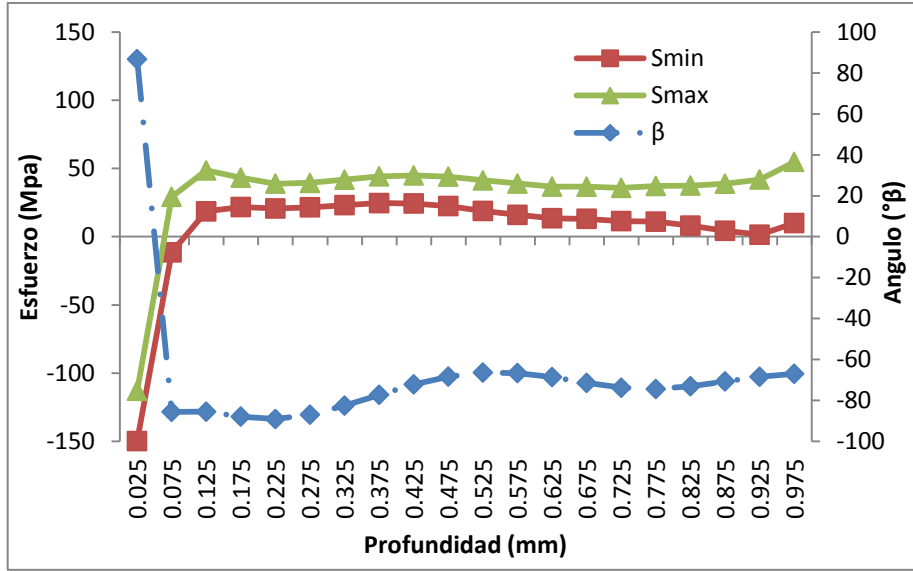


Figura 5.16 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; lado transmisión. Espesor 9.525 mm (Punta de rollo).

En la gráfica de las figura 5.14, 5.15 y 5.16 se muestran los valores de esfuerzo principal máximo y mínimo, así como la orientación del esfuerzo principal máximo. Lo anterior para la prueba obtenida de la zona inicial del rollo (Punta), para evaluar el comportamiento del esfuerzo a lo largo y ancho del rollo se muestran en seguida (figura 5.17 – 5.22) las gráficas realizadas con los resultados obtenidos en la muestra central del rollo (centro) y en la zona final del rollo nivelado (cola).

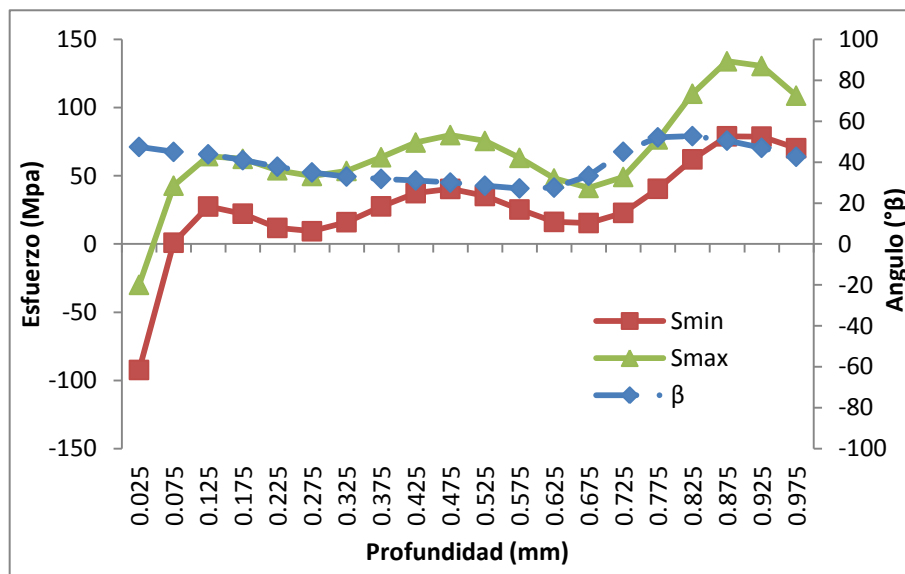


Figura 5.17 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; lado operador. Espesor 9.525 mm (centro de rollo).

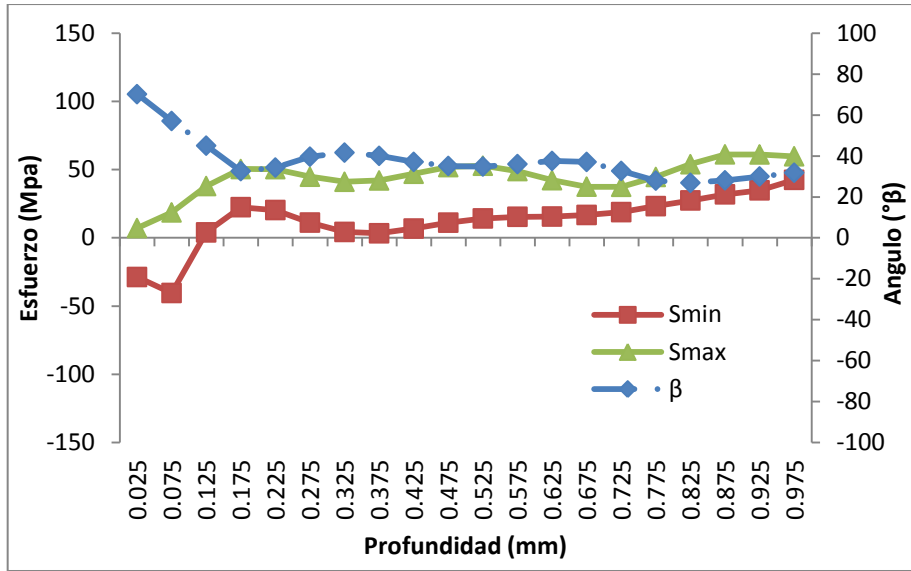


Figura 5.18 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Centro de muestra. Espesor 9.525 mm (centro de rollo).

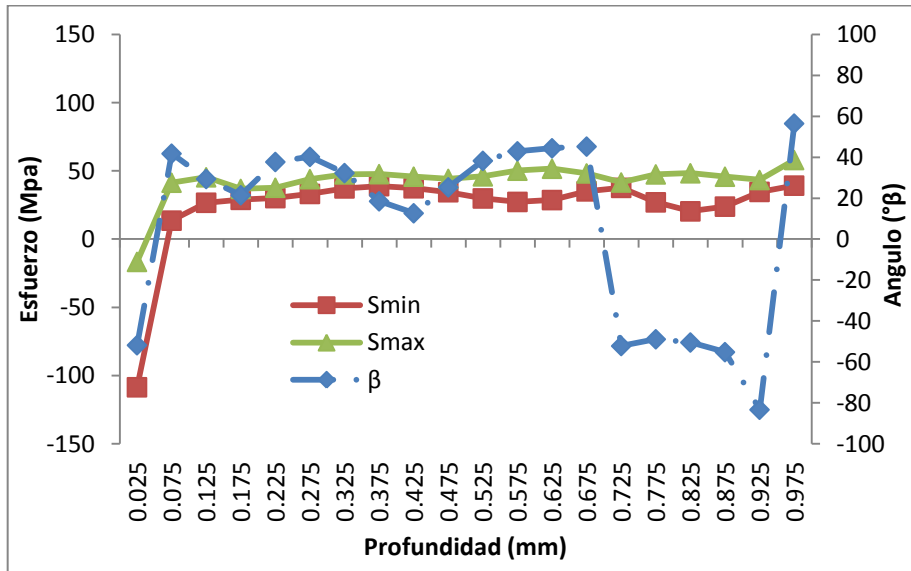


Figura 5.19 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Lado transmisión. Espesor 9.525 mm (centro de rollo).

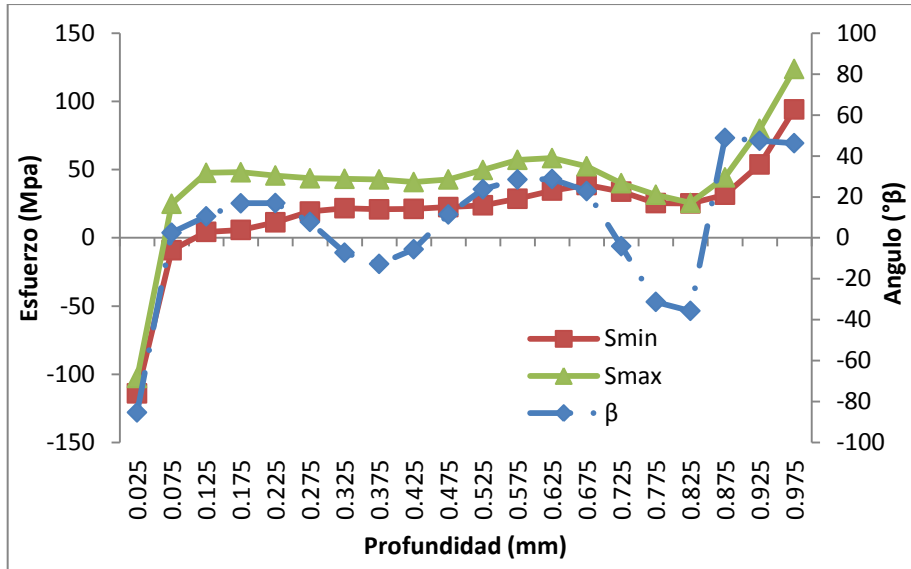


Figura 5.20 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Lado transmisión. Espesor 9.525 mm (cola de rollo).

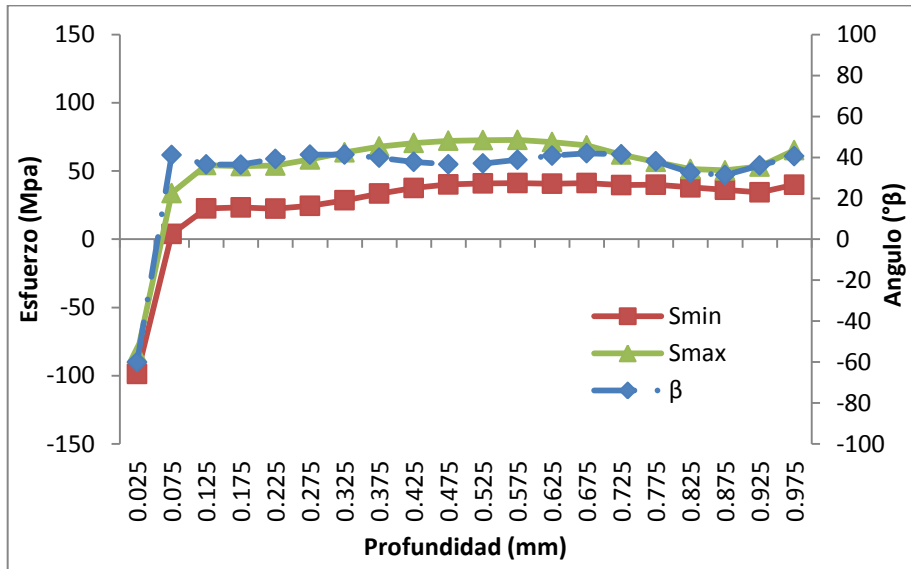


Figura 5.21 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Centro de muestra. Espesor 9.525 mm (cola de rollo).

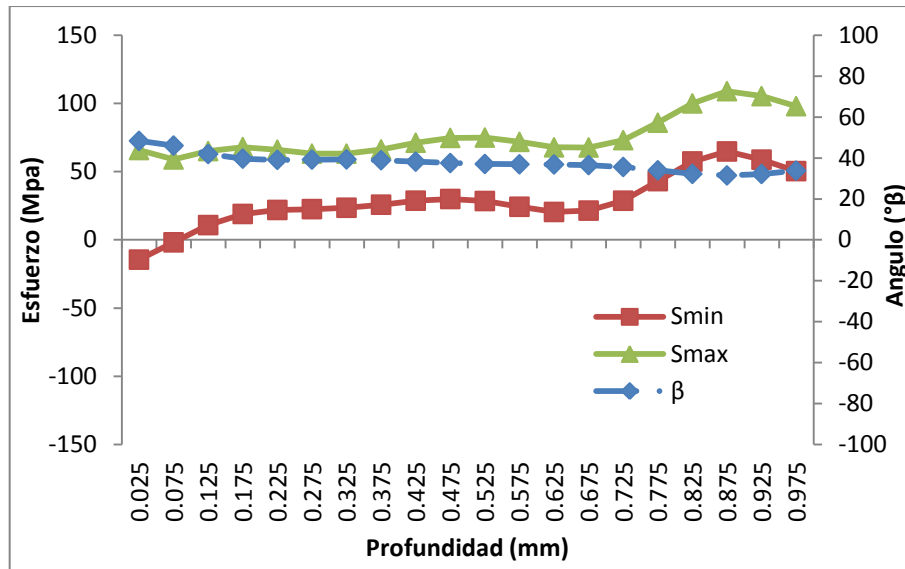


Figura 5.22 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; lado transmisión. Espesor 9.525 mm (cola de rollo).

Si se requiere observar las tablas de datos de las gráficas anteriores o los resultados obtenidos en los rollos con 7.94 mm y 12.7 mm de espesor, ésta información se encuentra en los anexos IV, V y VI.

5.4 Resultados obtenidos para comparar muestra procesada por el Temple mecánico con la procesada en el nivelador de precisión.

Como se menciona en el capítulo anterior, se realizaron pruebas en dos muestras de las mismas características, con la diferencia de que una fue procesada en el nivelador de precisión y otra en el temple mecánico, lo anterior con la finalidad de comparar el efecto de ambos procesos sobre los esfuerzos residuales del material. En las gráficas que se muestran a continuación se muestran los resultados obtenidos de ambas muestras, cuyas evaluaciones fueron realizadas según lo especificado en el capítulo anterior.

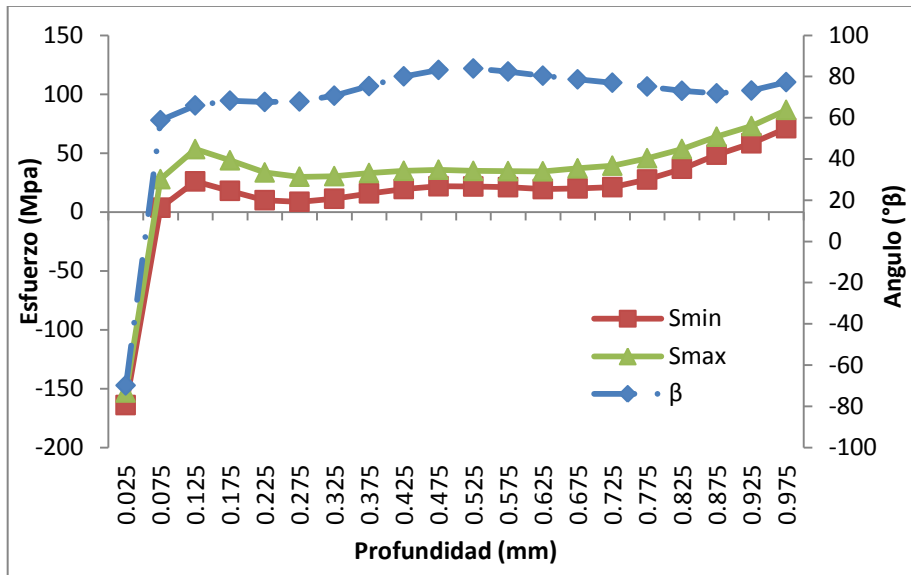


Figura 5.23 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 1. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Nivelada

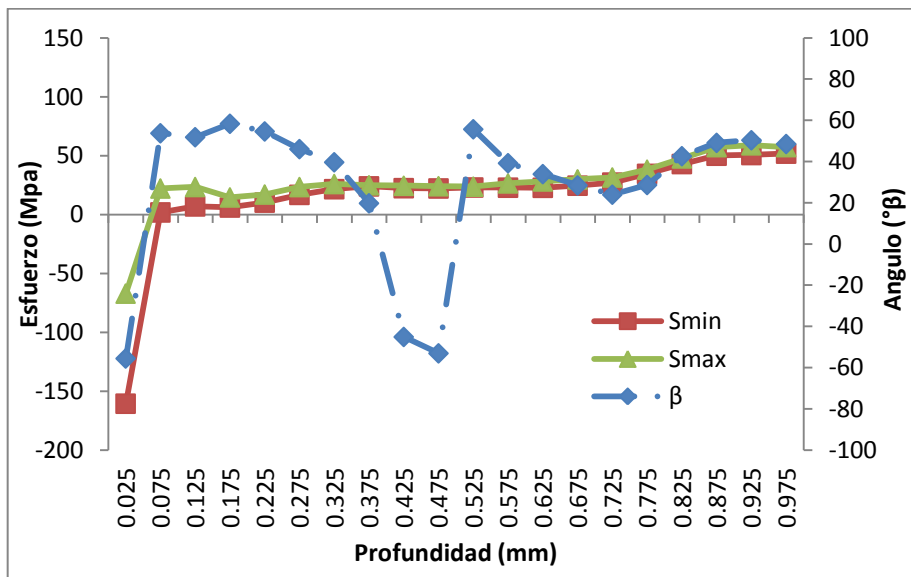


Figura 5.24 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 2. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Nivelada

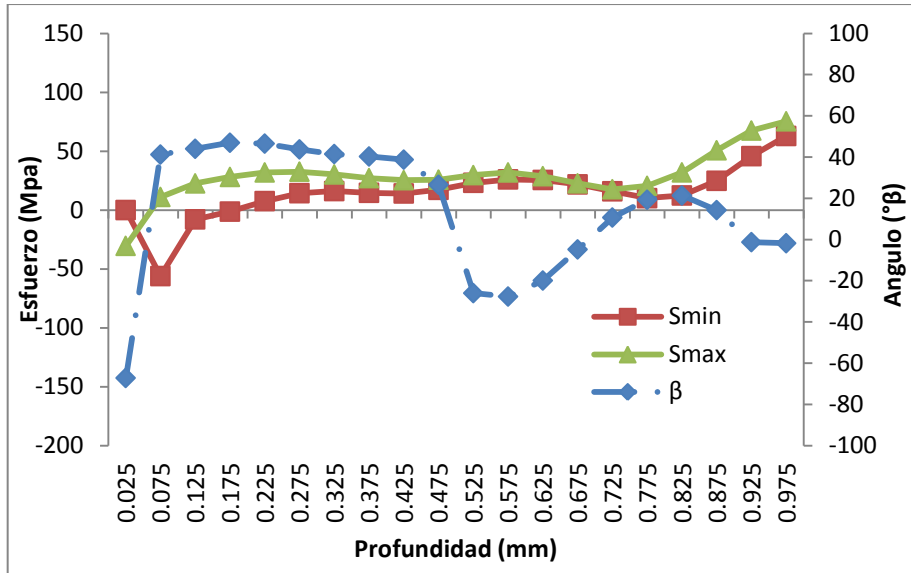


Figura 5.25 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 3. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Nivelada

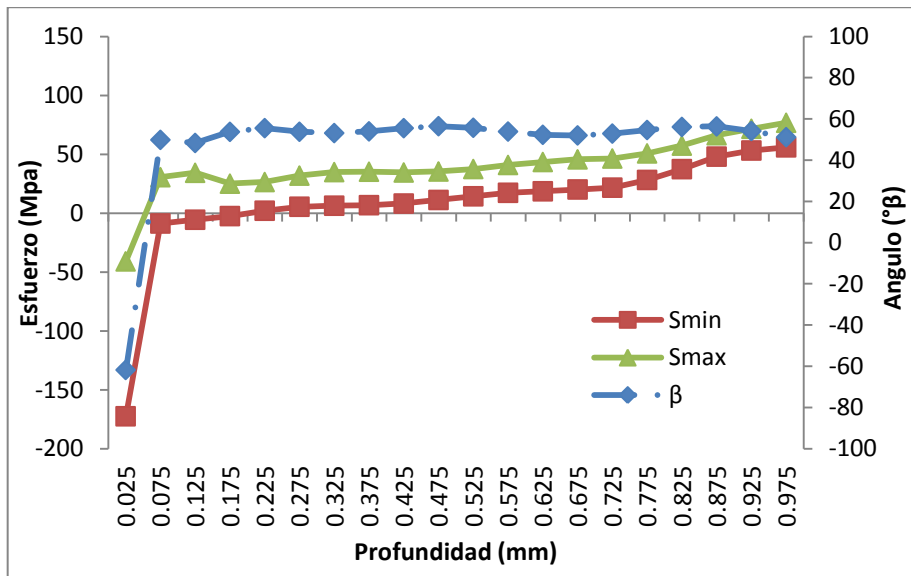


Figura 5.26 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 4. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Nivelada

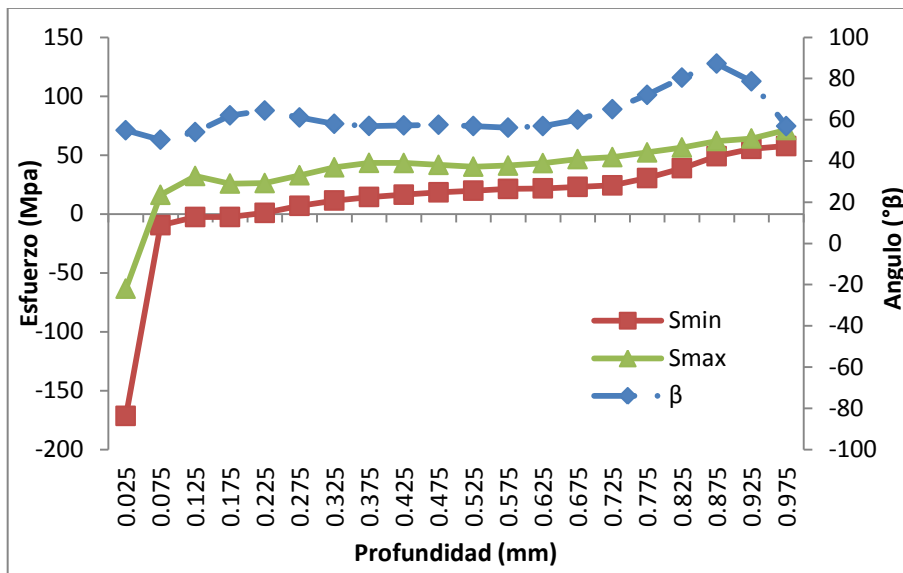


Figura 5.27 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 5. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Nivelada

Las graficas de las figuras 5.23 a 5.27 muestran los resultados del esfuerzo principal máximo y mínimo, de las pruebas realizadas en la muestra nivelada, a continuación se tienen los resultados obtenidos en la muestra procesada en el temple mecánico, en las graficas que de las figuras 5.28 a la 5.32.

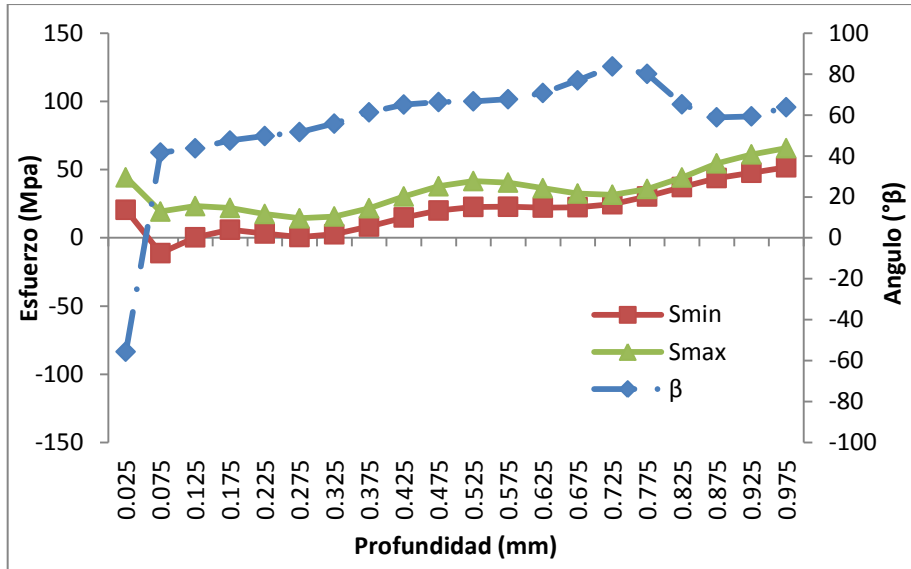


Figura 5.28 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 1. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Temple Mecánico.

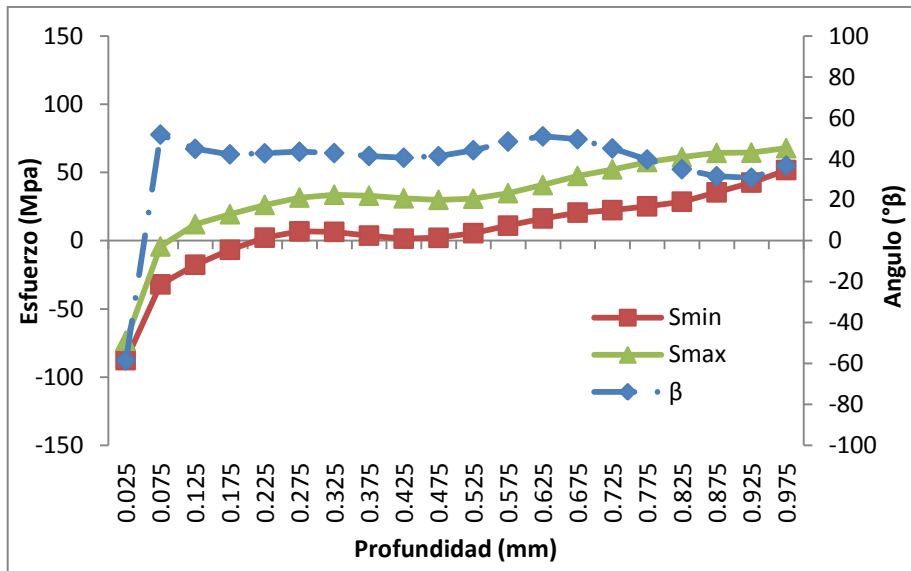


Figura 5.29 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 2. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Temple Mecánico.

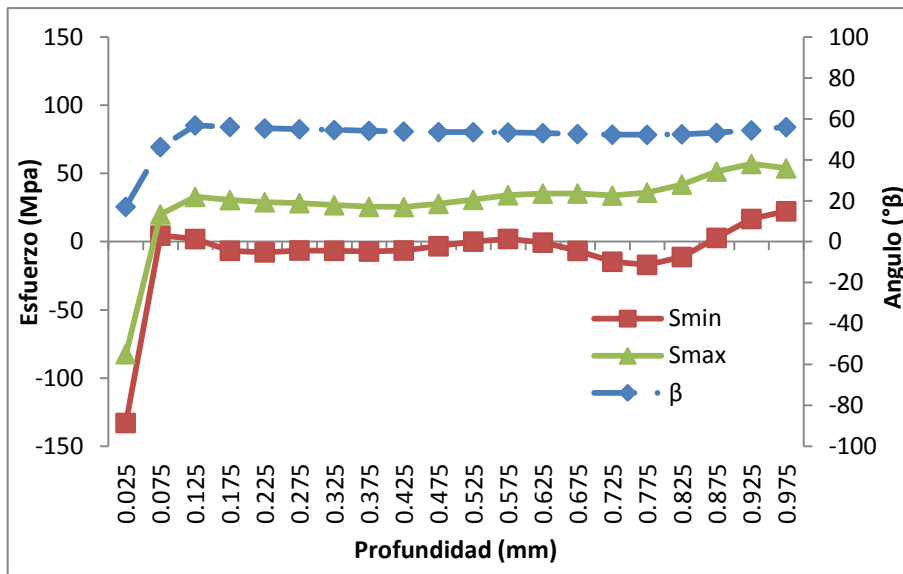


Figura 5.30 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 3. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Temple Mecánico.

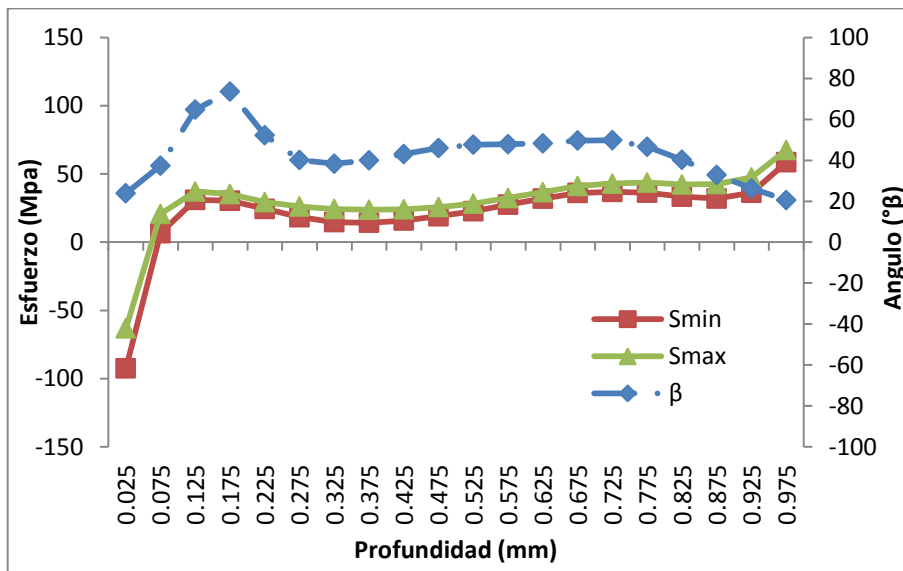


Figura 5.31 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 4. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Temple Mecánico.

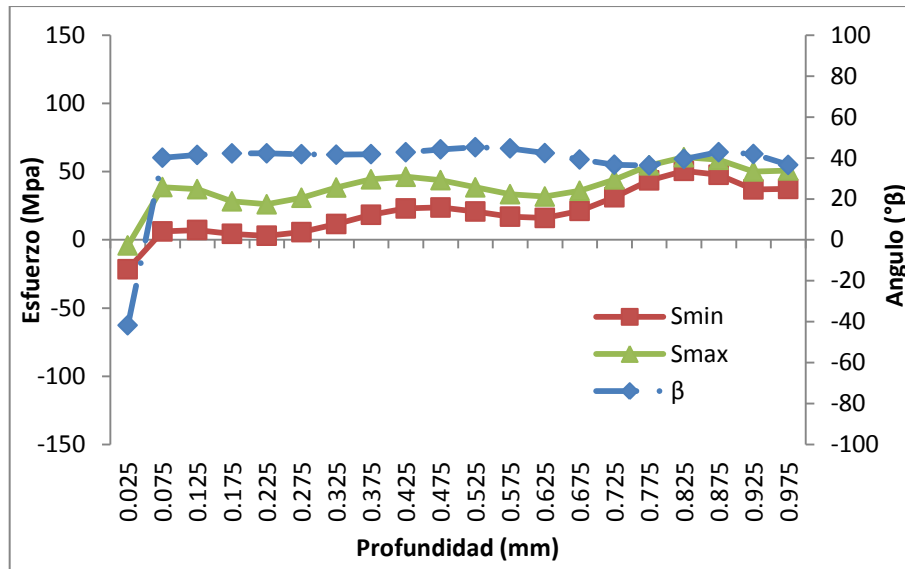


Figura 5.32 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Posición 5. Espesor 7.94 mm (centro de rollo). Temple Mecánico.

Tablas de datos de resultados de ambas muestras se encuentran en el anexo VII.

5.5 Resultados obtenidos de la realización de pruebas en materia que fue procesado por ambas tecnologías (nivelado de precisión y temple mecánico).

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al realizar pruebas de esfuerzo residual en muestras que fueron procesadas por ambas tecnologías, en distintos espesores; A continuación se muestran las gráficas de esfuerzo principal máximo, mínimo y dirección del primero, en la profundidad de la prueba (1mm), para los tres espesores evaluados. (Figura 5.33 a 5.41).

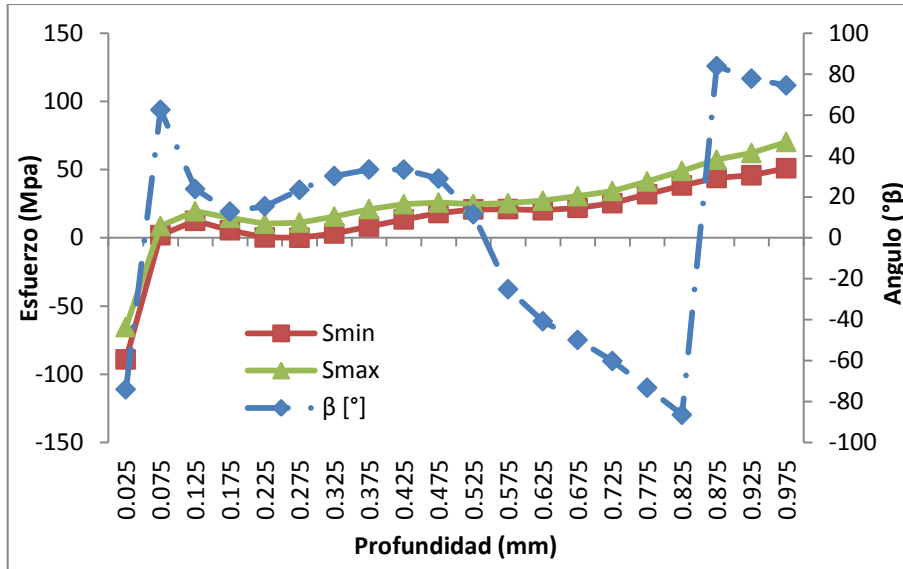


Figura 5.33 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 3/16 (Lado operador). Muestra nivelada y templada mecánicamente

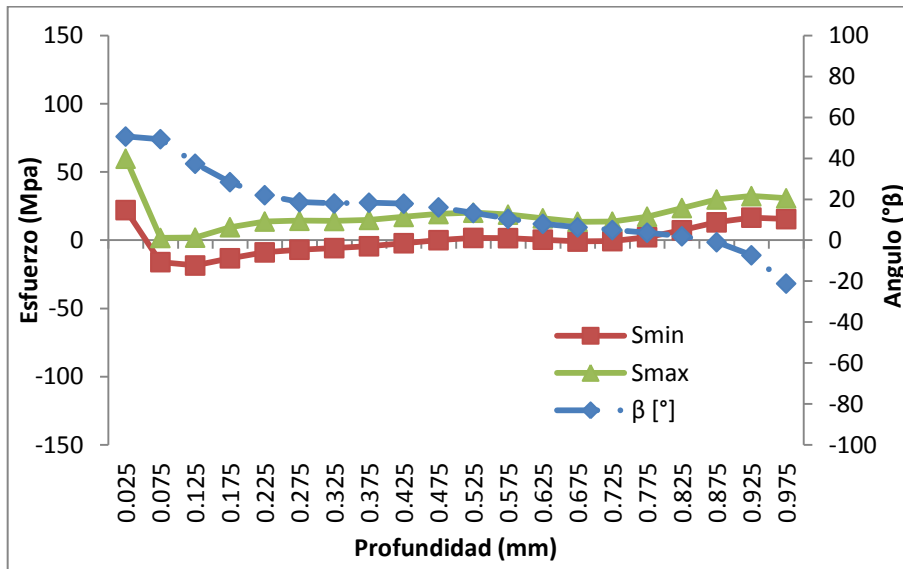


Figura 5.34 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 3/16 (centro en lo ancho). Muestra nivelada y templada mecánicamente

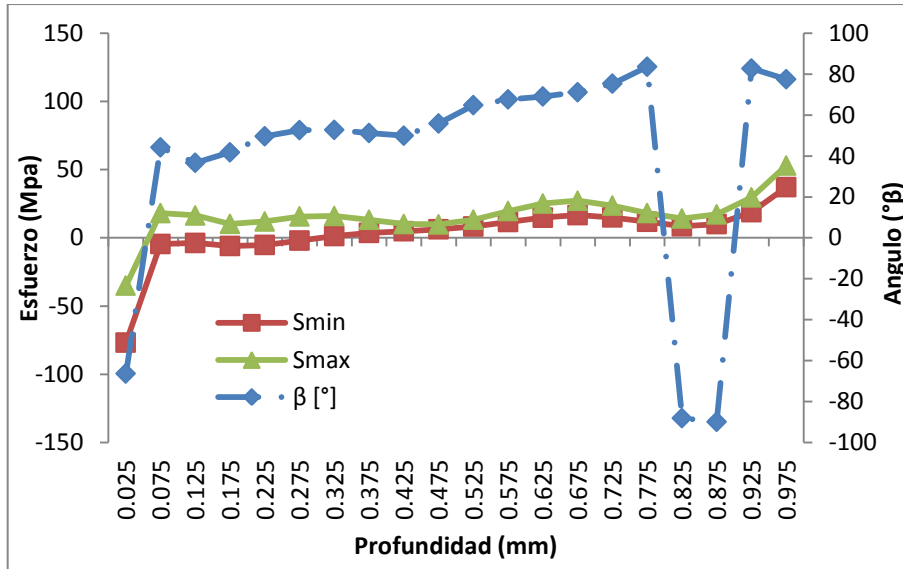


Figura 5.35 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 3/16 (lado transmisión). Muestra nivelada y templada mecánicamente

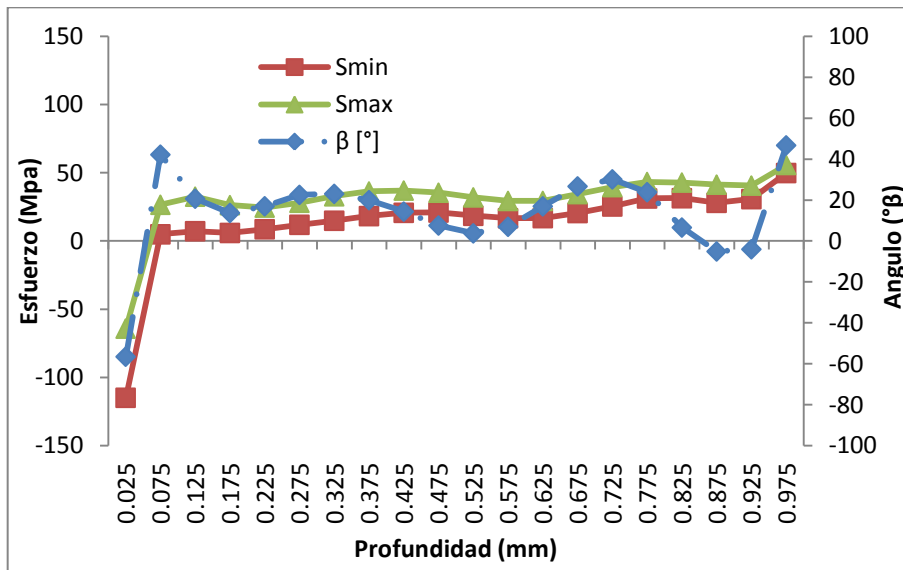


Figura 5.36 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 10 (lado operador). Muestra nivelada y templada mecánicamente

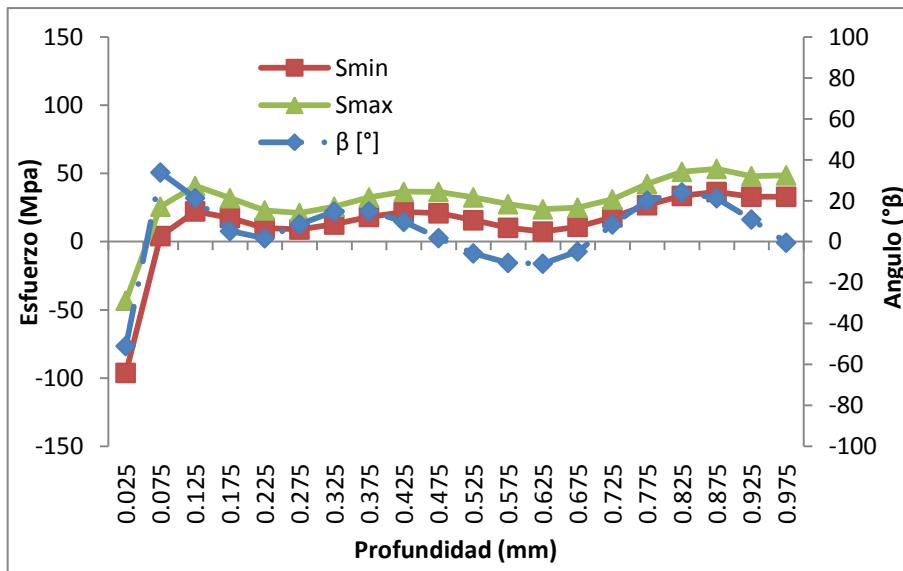


Figura 5.37 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 10 (centro en el ancho). Muestra nivelada y templada mecánicamente.

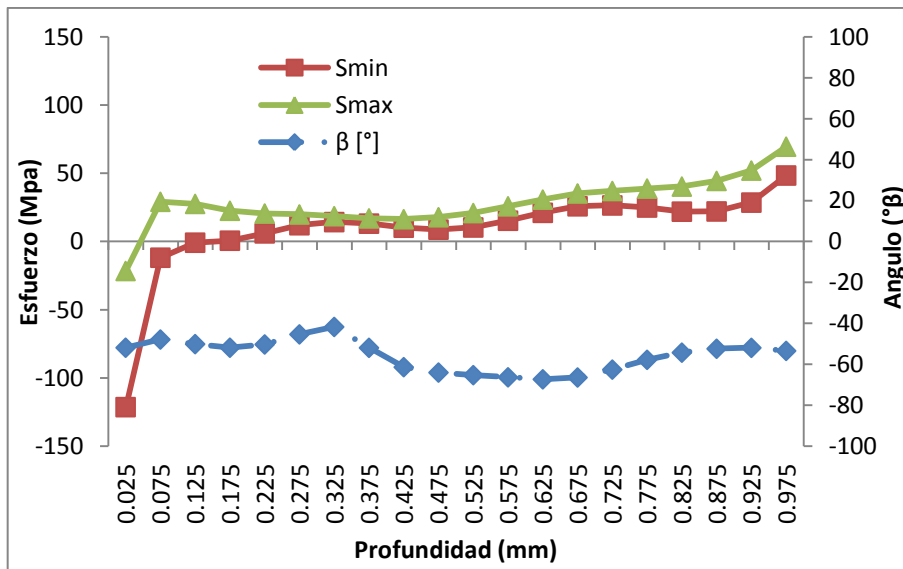


Figura 5.38 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 10 (lado transmisión). Muestra nivelada y templada mecánicamente.

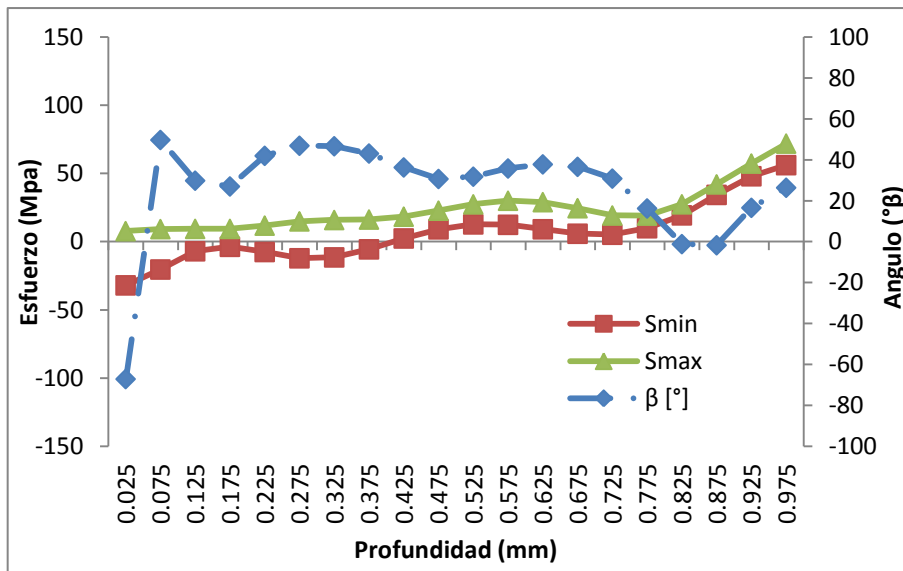


Figura 5.39 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 8 (lado operador). Muestra nivelada y templada mecánicamente.

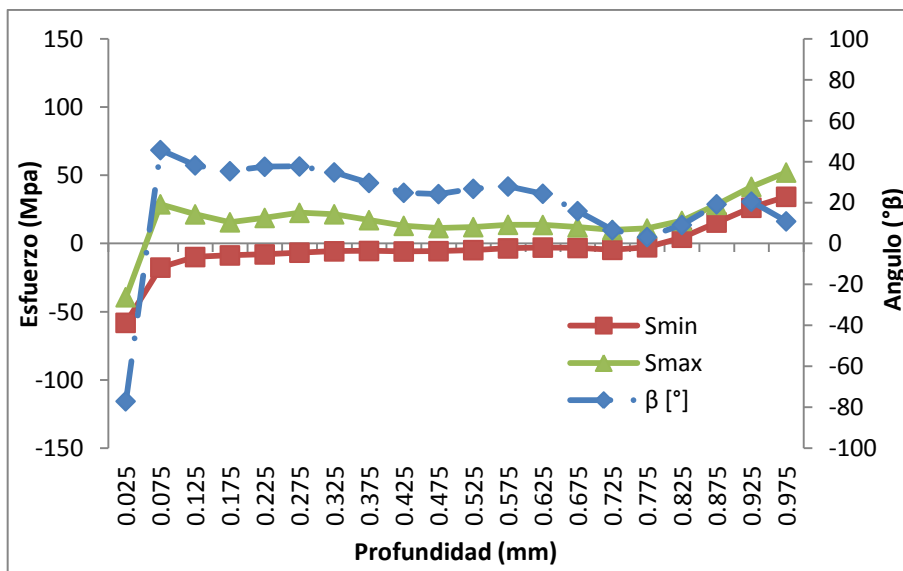


Figura 5.40 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 8 (centro en el ancho). Muestra nivelada y templada mecánicamente.

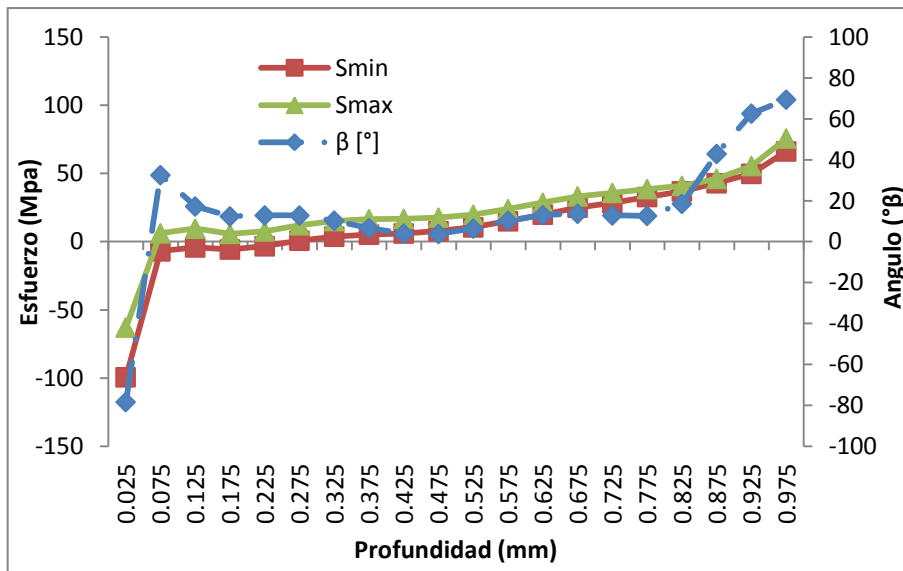


Figura 5.41 Gráfica de esfuerzos principales y ángulo vs profundidad de prueba; Calibre 8 (lado transmisión). Muestra nivelada y templada mecánicamente.

5.6 Ensayos de Tensión

Se realizaron los ensayos de Tensión de la manera que se especificó en el capítulo anterior para evaluar el esfuerzo de cedencia en material con diferentes procesos, y a continuación se muestran algunos resultados representativos del total de pruebas realizadas. En la tabla 5.2 se tienen los datos de 2 probetas de material procesado en el Temple mecánico ensayada a tensión y algunos valores obtenidos de las pruebas.

Tabla 5.2 Datos de las probetas para ensayo de tensión en material procesado en Temple mecánico

Acero HSLA G50		
# probeta	1	2
espesor(mm)	12.7	12.7
Ancho (mm)	12.77	12.77
Lo Calibrada (mm)	60	60
%elongación	15.53	15.36
Lf calibrada (mm)	69.32	69.21
Area inicial (mm ²)	162.179	162.179
So (MPa)	447.77	441.34
Smax (Mpa)	513.09	516.37
Desplazamiento	9.32	9.21
50% So	223.885	220.67

Con los valores de esfuerzo y deformación obtenidos de las pruebas de tensión realizadas en estas dos probetas de material procesado por el Temple mecánico, se realizaron las gráficas (figuras 5.42 y 5.43) de Esfuerzo vs Deformación que se muestran a continuación.

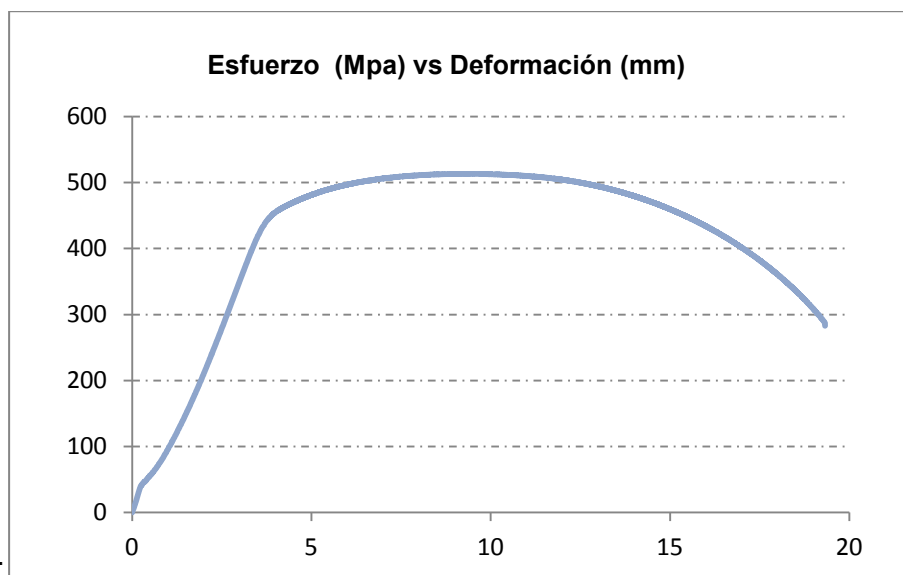


Figura 5.42 Esfuerzo ingenieril vs deformación para la probeta 1 con proceso Temple mecánico

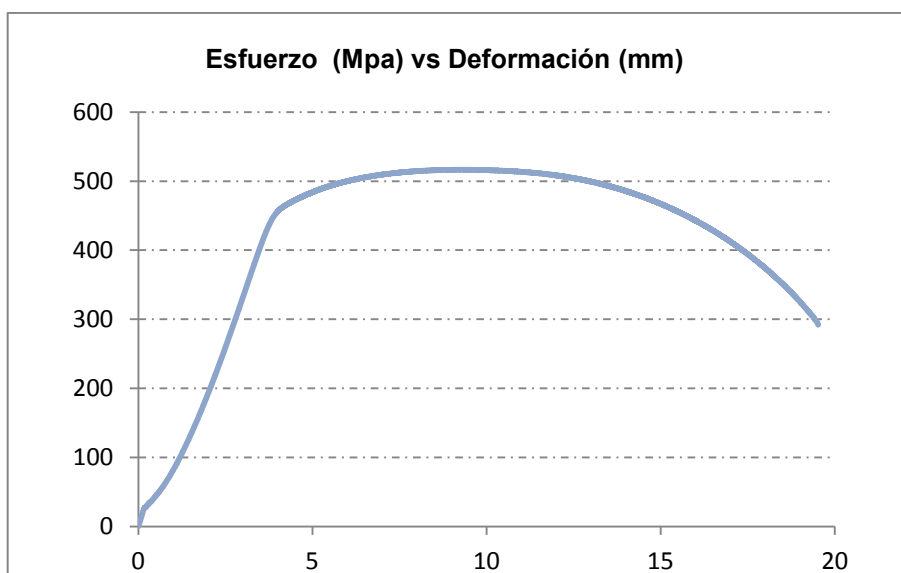


Figura 5.43 Esfuerzo ingenieril vs deformación para la probeta 2 con proceso Temple mecánico

Con respecto a las probetas con proceso de nivelado de precisión, a continuación se muestra en la tabla 5.3 la información representativa de estas probetas, así como algunos valores obtenidos de estos ensayos.

Tabla 5.3 Datos de las probetas para ensayo de tensión en material procesado en el Nivelador

Acero HSLA G50		
# probeta	3	4
espesor(mm)	12.7	12.7
Ancho (mm)	12.86	12.86
Lo Calibrada (mm)	50.8	50.8
%elongación	42	41
Lf calibrada (mm)	72.14	71.63
Ao (mm ²)	163.322	163.322
So (MPa)	351	373
Smax (Mpa)	434	453
Desplaz. (mm)	21.34	20.83
50% So	175.5	186.5

De igual manera que con las probetas anteriores, se utilizaron los valores de esfuerzo y deformación obtenidos, para realizar las gráficas correspondientes (figuras 5.44 y 5.45).

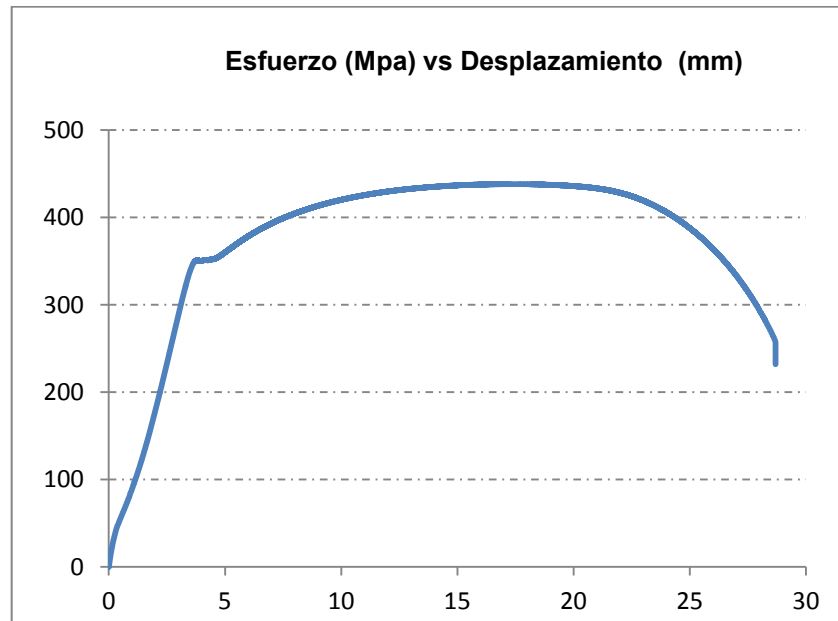


Figura 5.44 Esfuerzo ingenieril vs deformación para la probeta 3 con proceso Nivelado de Precisión

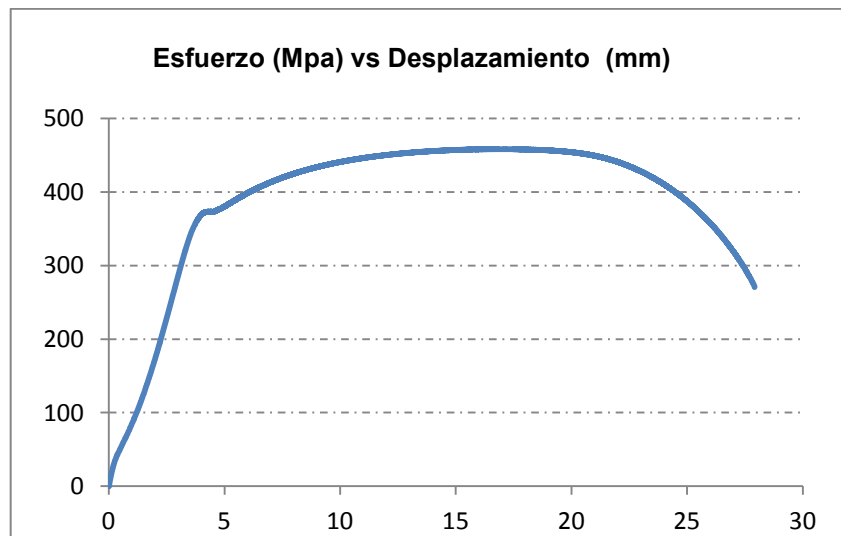


Figura 5.45 Esfuerzo ingenieril vs deformación para la probeta 4 con proceso Nivelado de Precisión

CAPITULO 6

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Introducción

Este capítulo se discute los resultados obtenidos mediante la prueba de hole drilling, expuestos en capítulo anterior. Para analizar cada uno de los segmentos a estudiar en el proyecto, mencionados en el capítulo anterior, es necesario discutir la información obtenida y con esto lograr comprender de una mejor manera el estado de esfuerzo encontrado en el material analizado, para esto es indispensable analizar lo que se obtiene de cada prueba realizada, como se menciona en el capítulo 3, al terminar cada prueba se obtienen los valores de esfuerzo principal máximo y mínimo, además, se obtiene un ángulo el cual indica la dirección del esfuerzo principal máximo. Los valores de estas tres variables se obtienen en una sola prueba, para veinte diferentes profundidades, hasta llegar a la profundidad total de la prueba. El ángulo obtenido por el sistema, el cual indica la dirección del esfuerzo principal máximo, varía con respecto a la profundidad de la prueba, por ejemplo al observar el en la gráfica de la figura 5.13 se puede observar claramente esta variación, lo cual dificulta la evaluación del esfuerzo ya que se encuentra con diferentes orientaciones; Para lograr obtener el valor de esfuerzo en una sola dirección se calcula el esfuerzo en la dirección de laminación, utilizando el ángulo original y la orientación de la roseta.

Para realizar estos cálculos se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$S_{y'} = S_{max} * \text{Sen}^2 \theta + S_{min} * \text{Cos}^2 \theta$$

$$S_{x'} = S_{max} * \text{Cos}^2 \theta + S_{min} * \text{Sen}^2 \theta$$

$$\tau_{xy} = (S_{max} - S_{min}) * \text{Sen} \theta * \text{Cos} \theta$$

Donde:

$S_{y'}$ Esfuerzo residual calculado en la dirección del laminado.

$S_{x'}$ Esfuerzo residual calculado en la dirección transversal al laminado.

τ_{xy} Esfuerzo cortante a los esfuerzos $S_{y'}$ y $S_{x'}$

Al obtener el esfuerzo en estas direcciones se puede observar el comportamiento del esfuerzo conforme la profundidad de la prueba, eliminando así la variable de la dirección del esfuerzo principal máximo. Para analizar de una manera gráfica los valores que se están obteniendo por el equipo y los valores que estamos calculando, se analiza lo anterior mediante el círculo de Mohr para dos dimensiones, como se muestra en la figura 6.1

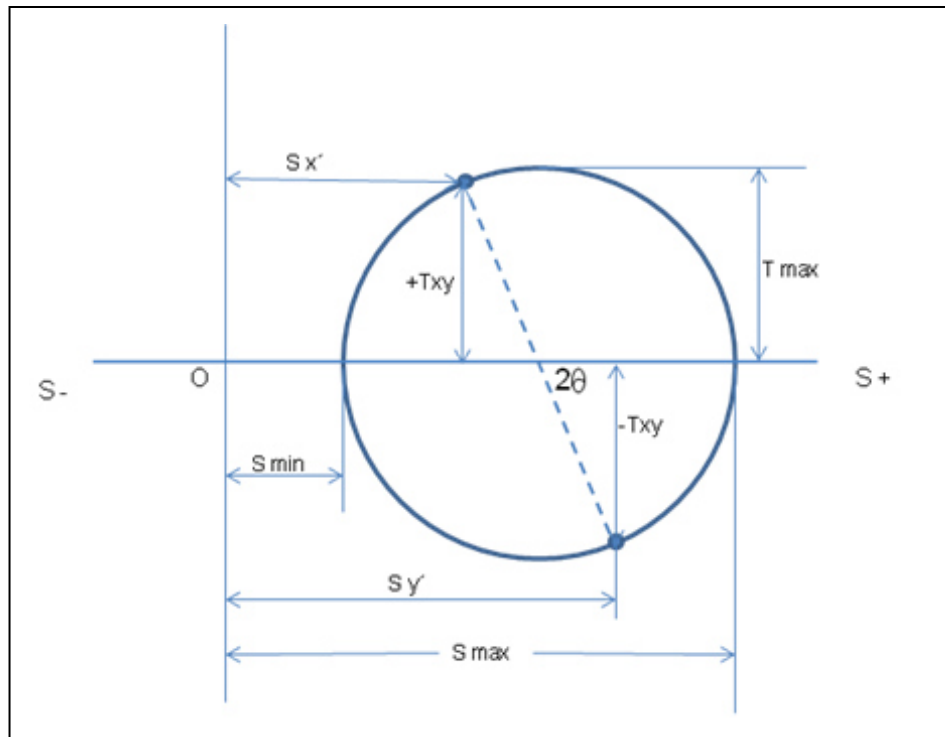


Figura 6.1 Diagrama de Mohr para dos dimensiones

En donde los esfuerzos principales obtenidos mediante el equipo son el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo, por lo que en esta dirección el esfuerzo cortante es igual a cero, al calcular Sy' y Sx' mediante las ecuaciones descritas con anterioridad, lo que se determina son los esfuerzos en la dirección de laminación y la dirección transversal, además de esfuerzo cortante Txy en esta nueva dirección. Para realizar este cálculo del esfuerzo en la dirección de laminación, se utiliza una modificación del ángulo obtenido, analizando la posición con que se colocó la roseta de galgas extensiométricas y el ángulo calculado por el software, esto como se explica a continuación. (figura 6.2)

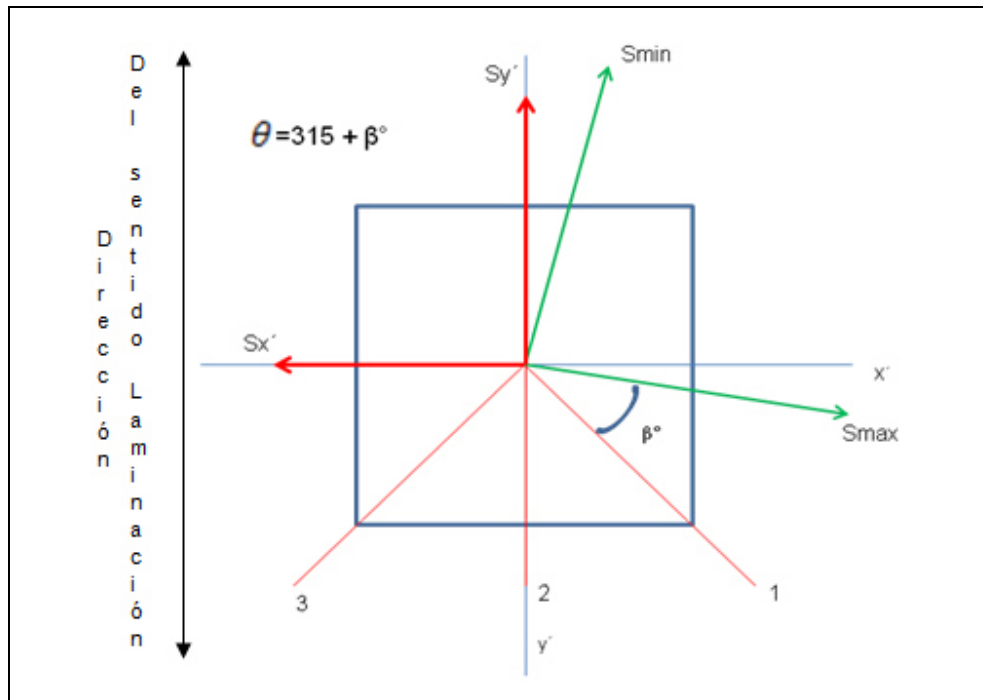


Figura 6.2 Diagrama de orientación de esfuerzos principales

Los esfuerzos principales obtenidos por el software están representados en la figura anterior (6.2) por los vectores de color verde y el ángulo β es el que indica la orientación del esfuerzo principal máximo, este ángulo se encuentra respecto a la ubicación de la galga de referencia, identificada en la figura con el número 1. Para calcular el esfuerzo en la dirección de laminación, dirección transversal y su cortante, se realiza una rotación de los ejes, esto se logra al contemplar la ubicación de la galga, que se encuentra a 315° ($270^\circ + 45^\circ$) positivos a partir del eje x, por lo que al sumarle el ángulo obtenido por el equipo, se obtendrá el ángulo reducido con respecto a los ejes x' y y' . Al utilizar este ángulo modificado en las ecuaciones descritas anteriormente se obtiene el esfuerzo en la dirección de laminación. Cabe destacar que para una prueba realizada se tiene que realizar este análisis para cada uno de los veinte valores obtenidos en las diferentes profundidades de la prueba. Para discutir y analizar el proceso del nivelado de precisión, sobre los esfuerzos residuales, al procesar un acero rolado en caliente se realizaron las pruebas descritas en la sección 4.5.2.2.A continuación se muestra un ejemplo con una prueba realizada en una

muestra obtenida directamente de la punta del rollo, sin proceso alguno de nivelado o enderezado.

Tabla 6.1 Valores de Esfuerzos principales y dirección del esfuerzo principal máximo.
(Muestra sin proceso)

Profundidad [mm]	(°β)	Smin (Mpa)	Smax (Mpa)
0.025	-39.951	-80.349	-45.847
0.075	-35.108	-46.791	-8.383
0.125	-35.829	-39.509	-1.31
0.175	-35.57	-34.838	0.887
0.225	-33.554	-29.434	3.796
0.275	-30.713	-24.593	7.468
0.325	-28.54	-22.13	10.546
0.375	-27.598	-21.48	12.698
0.425	-27.454	-21.519	13.985
0.475	-27.4	-20.57	15.435
0.525	-26.79	-17.902	17.218
0.575	-25.303	-13.155	19.975
0.625	-22.744	-7.538	22.947
0.675	-19.47	-2.423	25.786
0.725	-16.083	1.386	28.086
0.775	-13.41	5.702	31.921
0.825	-11.798	10.564	37.181
0.875	-10.854	17.575	45.173
0.925	-9.743	24.349	52.89

En la tabla 6.1 se tienen los valores obtenidos directamente de la prueba, calculados por el software, esfuerzo principal máximo y mínimo, la dirección del esfuerzo máximo indicada por el ángulo β . Esto para cada una de las 20 profundidades de la prueba realizada. Al aplicar las ecuaciones ya descritas en la sección 6.1, para cada una de las profundidades obtenemos los esfuerzos en dirección de laminación, dirección transversal y su esfuerzo cortante, estos valores se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Valores calculados de esfuerzo en dirección de laminado, transversal, cortante y ángulo modificado. (Prueba realizada en punta de rolo sin proceso)

Profundidad [mm]	315° + β°	Sy' (MPa)	Sx' (MPa)	Txy (MPa)
0.025	275.05	-46.11	-80.08	-3.02
0.075	279.89	-9.52	-45.66	-6.50
0.125	279.17	-2.28	-38.54	-6.01
0.175	279.43	-0.07	-33.88	-5.77
0.225	281.45	2.49	-28.13	-6.46
0.275	284.29	5.52	-22.64	-7.67
0.325	286.46	7.92	-19.51	-8.88
0.375	287.40	9.64	-18.42	-9.75
0.425	287.55	10.76	-18.29	-10.21
0.475	287.60	12.14	-17.28	-10.38
0.525	288.21	13.79	-14.47	-10.43
0.575	289.70	16.21	-9.39	-10.51
0.625	292.26	18.57	-3.16	-10.69
0.675	295.53	20.55	2.82	-10.97
0.725	298.92	21.84	7.63	-11.30
0.775	301.59	24.73	12.90	-11.70
0.825	303.20	29.20	18.55	-12.20
0.875	304.15	36.48	26.27	-12.82
0.925	305.26	43.38	33.86	-13.45
0.975	307.54	50.52	43.14	-13.84

Una vez obtenidos estos valores, se realizó la gráfica de esfuerzo contra la profundidad de la prueba (figura 6.3) y de esta manera se observa la tendencia del esfuerzo residual de cada prueba en la dirección de laminado y dirección transversal al laminado para el milímetro de profundidad en la prueba, con lo que se puede evaluar la tendencia en diferentes zonas del material.

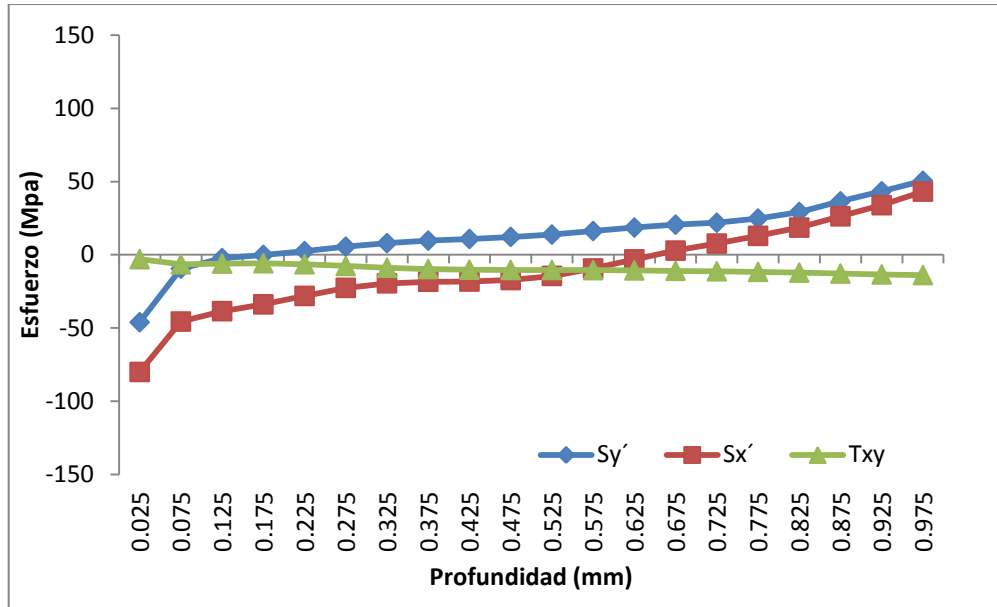


Figura 6.3 Gráfica de esfuerzos (Dirección de Laminado Sy' , transversal al nivelado Sx' , cortante τ_{xy}) vs profundidad de la prueba realizada en punta de Rollo sin proceso de planeza. (Lado operador)

6.2 Efecto del proceso de nivelado en la distribución de los esfuerzos.

Al analizar de la manera descrita en la sección anterior la muestra sin proceso, enderezada y nivelada realizando los cálculos descritos en la introducción de este capítulo, para las tres posiciones restantes descritas en la sección 4.5.2.2, Se obtienen las gráficas de las figuras 6.4 a 6.6, de las cuales llama la atención, que hay una variación significativa en el comportamiento de los perfiles de esfuerzo y en los valores alcanzados. Además se observa que en algunas zonas el esfuerzo en la dirección de laminado es mayor que el esfuerzo transversal, y al cambiar a otra zona ocurre lo contrario, ó en la misma prueba existen cambios en la dirección del esfuerzo en dirección del laminado y su dirección transversal, lo cual nos habla de un material con perfiles de esfuerzo poco homogéneos, esto puede atribuirse a un enfriamiento no homogéneo

después de la laminación en caliente, además de al embobinado y el enfriamiento del rollo.

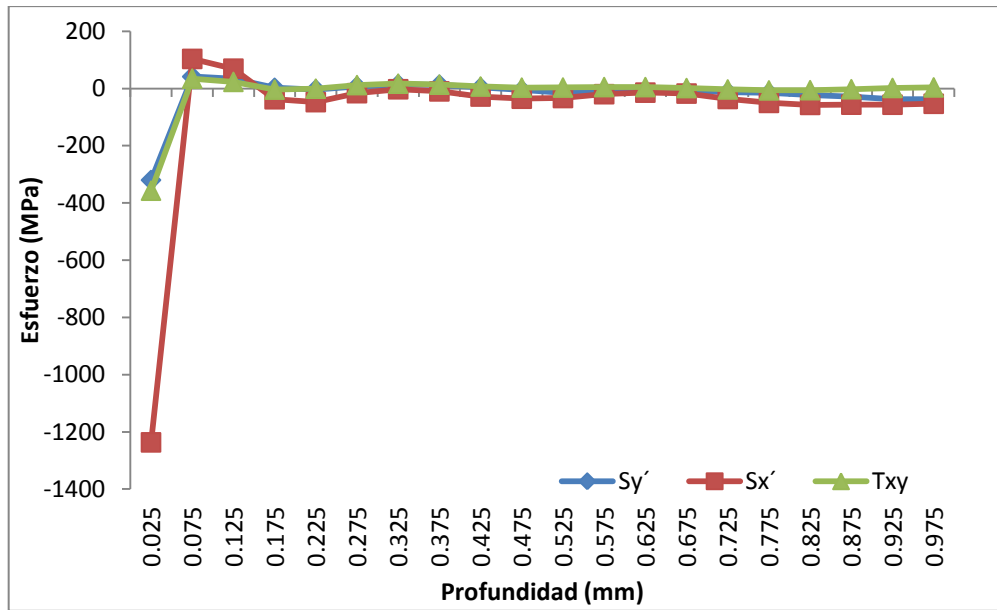


Figura 6.4 Gráfica de esfuerzos (Dirección de Laminado Sy' , transversal al nivelado Sx' , cortante τ_{xy}) vs profundidad de la prueba realizada en punta de Rollo sin proceso de planeza. (Un cuarto del lado operador).

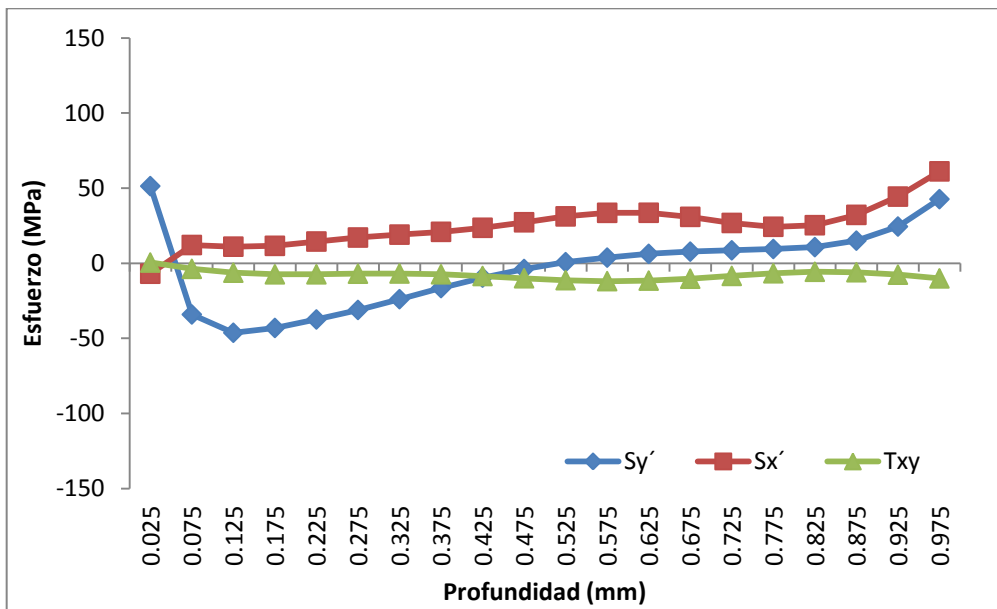


Figura 6.5 Gráfica de esfuerzos (Dirección de Laminado Sy' , transversal al nivelado Sx' , cortante τ_{xy}) vs profundidad de la prueba realizada en punta de Rollo sin proceso de planeza. (Centro).

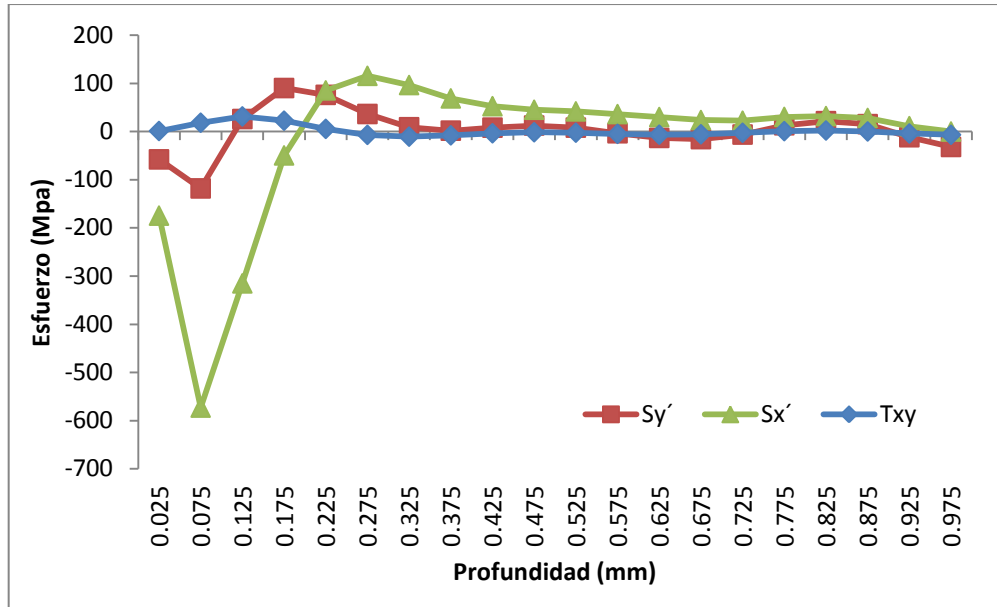


Figura 6.6 Gráfica de esfuerzos (Dirección de Laminado Sy' , transversal al nivelado Sx' , cortante τ_{xy}) vs profundidad de la prueba realizada en punta de Rollo sin proceso de planeza. (Cuarto lado transmisión).

Si se evalúan los resultados encontrados en las mismas posiciones en el material procesado en el nivelador de precisión se obtienen las gráficas siguientes (figuras 6.7 a 6.10).

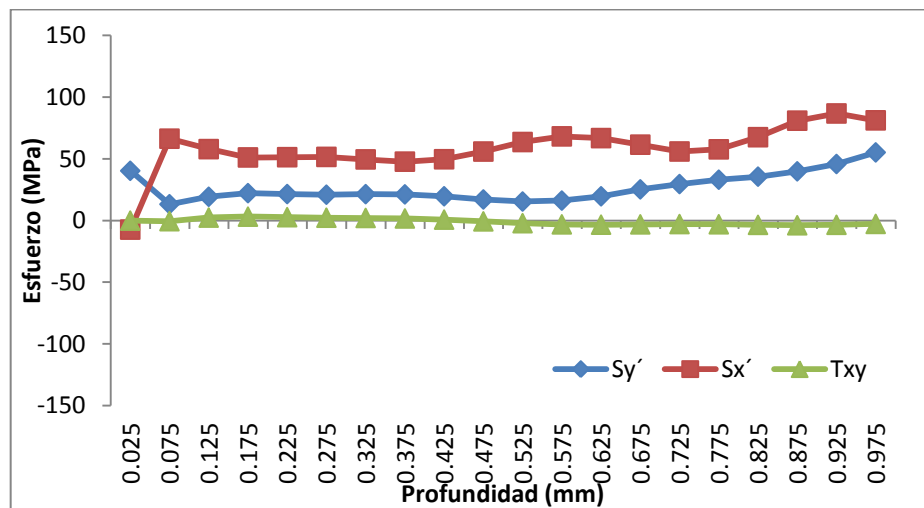


Figura 6.7 Gráfica de esfuerzos (Dirección de Laminado Sy' , transversal al nivelado Sx' , cortante τ_{xy}) vs profundidad de la prueba realizada en muestra Nivelada. (Lado operador)

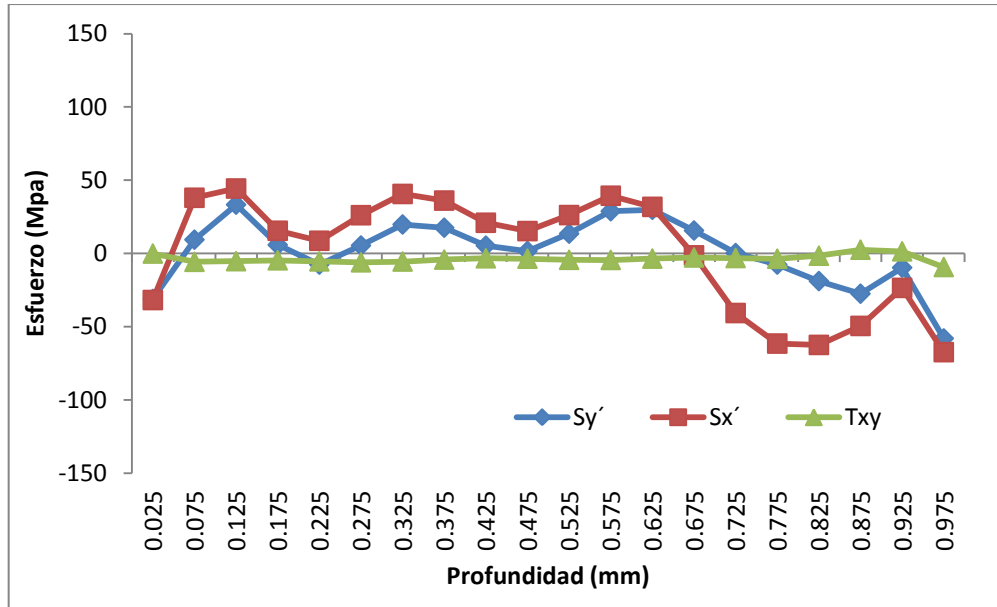


Figura 6.8 Gráfica de esfuerzos (Dirección de Laminado Sy' , transversal al nivelado Sx' , cortante τ_{xy}) vs profundidad de la prueba realizada en muestra nivelada. (Un cuarto de orilla lado operador)

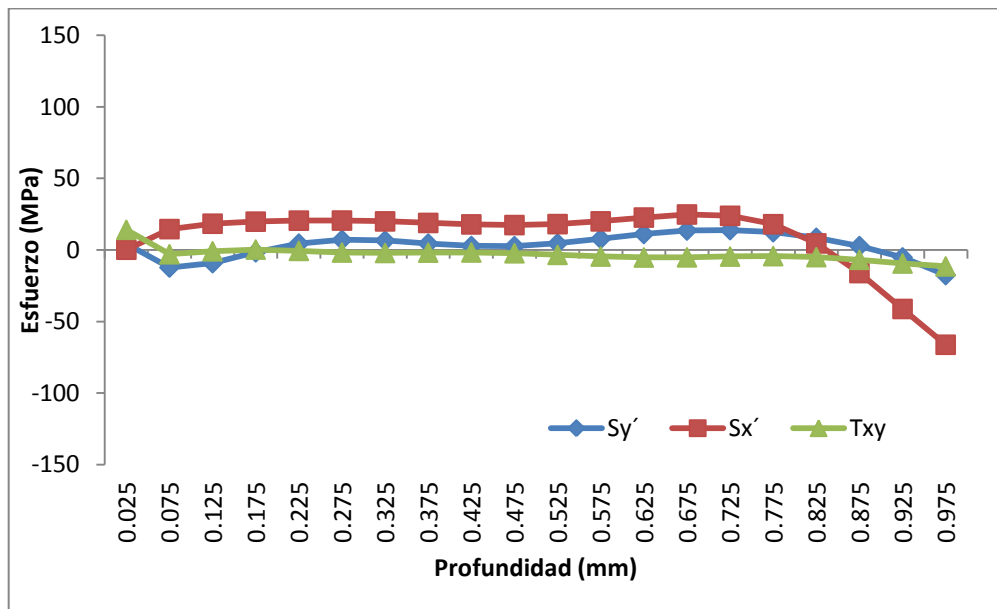


Figura 6.9 Gráfica de esfuerzos (Dirección de Laminado Sy' , transversal al nivelado Sx' , cortante τ_{xy}) vs profundidad de la prueba realizada en muestra nivelada. (Centro)

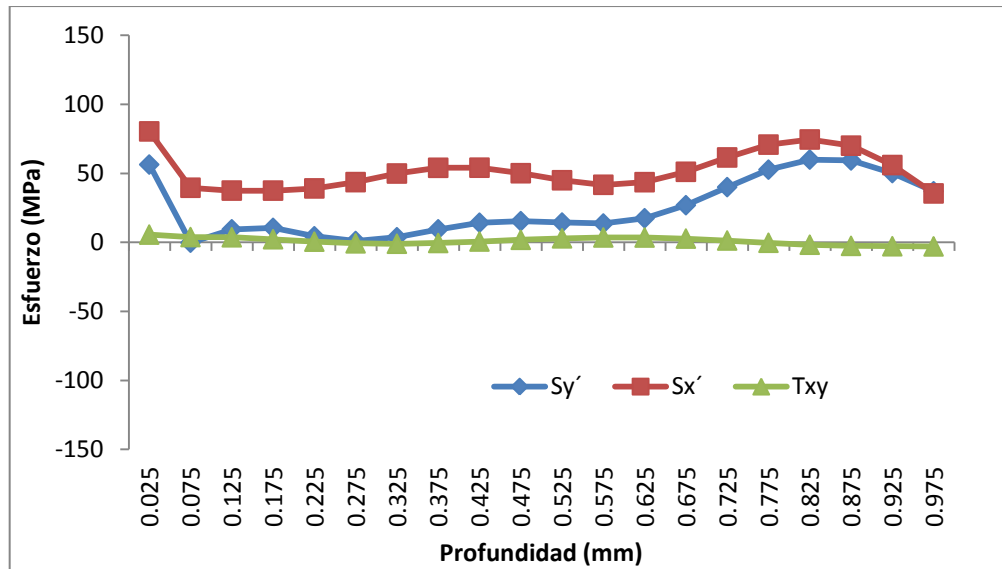


Figura 6.10 Gráfica de esfuerzos (Dirección de Laminado Sy' , transversal al nivelado Sx' , cortante τ_{xy}) vs profundidad de la prueba realizada en muestra nivelada. (Un cuarto de orilla lado transmisión)

En las gráficas de las figuras anteriores se observa que existe menor variación en cuanto a los valores alcanzados, la tendencia en el perfil de esfuerzo, y contrario a lo encontrado en el material sin proceso, en las cuatro zonas evaluadas en la muestra nivelada se encontró que el valor de esfuerzo en dirección transversal al laminado es mayor en casi toda la profundidad de la prueba, con excepción de algunos puntos, lo cual indica un cambio en la orientación de los esfuerzos principales debido al proceso de nivelado, dicho cambio probablemente es causado por el esfuerzo aplicado para igualar las longitudes del material en dirección del nivelado, lo cual evidentemente afecta a las fibras unidas al material alargado, físicamente se puede reflejar en una pequeña reducción en el ancho del material. Además para observar el efecto que tiene este proceso en el ancho del material se grafican los valores del esfuerzo residual en la dirección transversal al sentido de laminación en cada una de las zonas evaluadas en el ancho de la muestra sin proceso, enderezada y nivelada (figura 6.11, 6.12 y 6.13); se grafican los esfuerzos encontrados en esta dirección, debido a que después del proceso de nivelado de precisión, se encontró que en esta dirección predominaron los más altos de esfuerzo residual. Lo anterior significa principalmente que en las diferentes zonas

evaluadas del material, el nivelador a logrado que la dirección de los esfuerzos máximos y mínimos principales se comporten de manera similar en el ancho del material, como se observa más adelante, sin embargo habría que evaluar cómo se comporta este material en procesos posteriores como procesos de corte, realizando cortes en diferentes direcciones y observando el comportamiento del mismo.

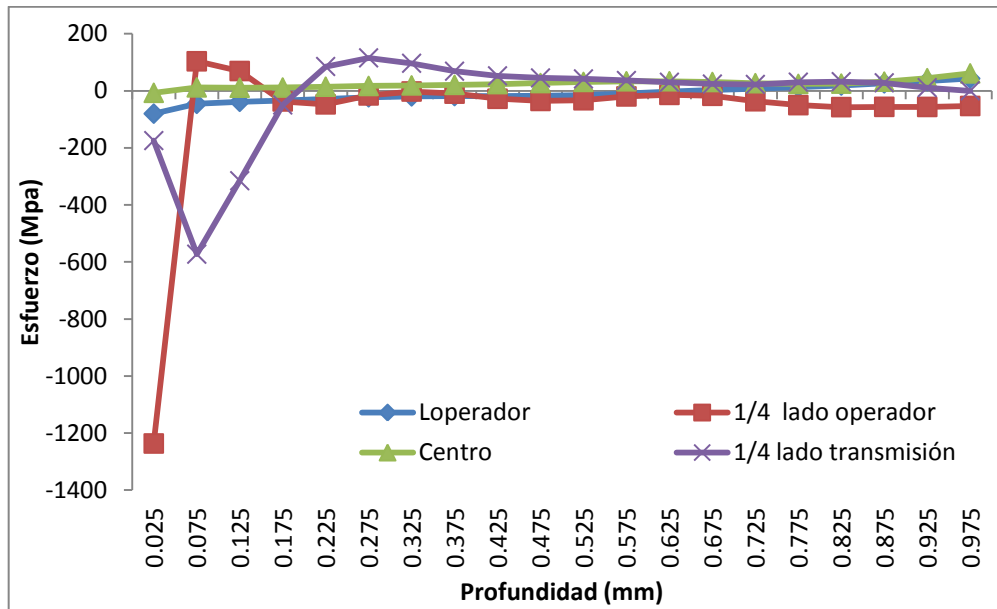


Figura 6.11 Gráfica de esfuerzo residual en dirección transversal al laminado vs profundidad (Cuatro posiciones evaluadas en el material sin proceso de enderezado).

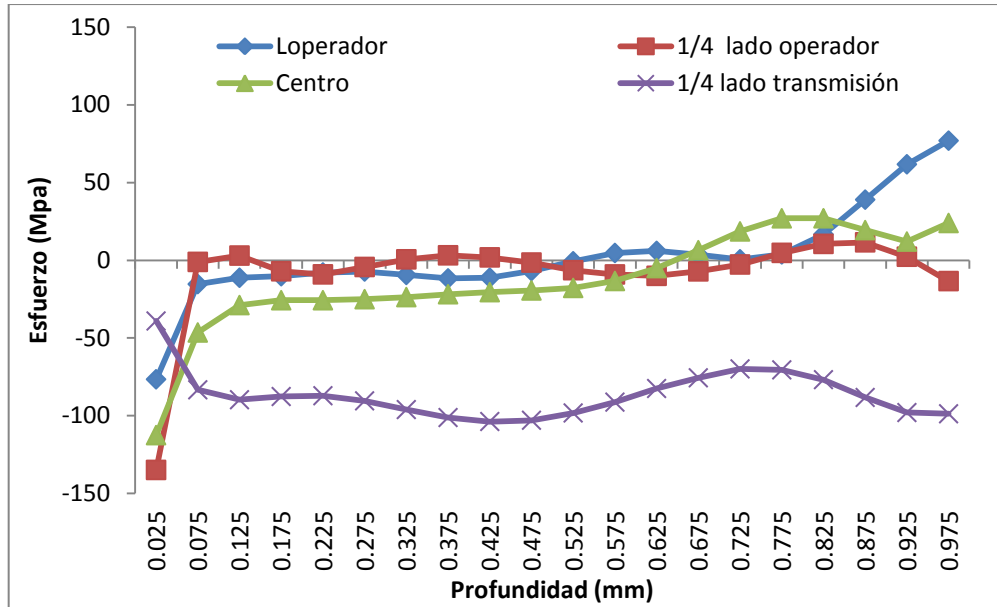


Figura 6.12 Gráfica de esfuerzo residual en dirección transversal al laminado vs profundidad (cuatro posiciones evaluadas en muestra enderezada).

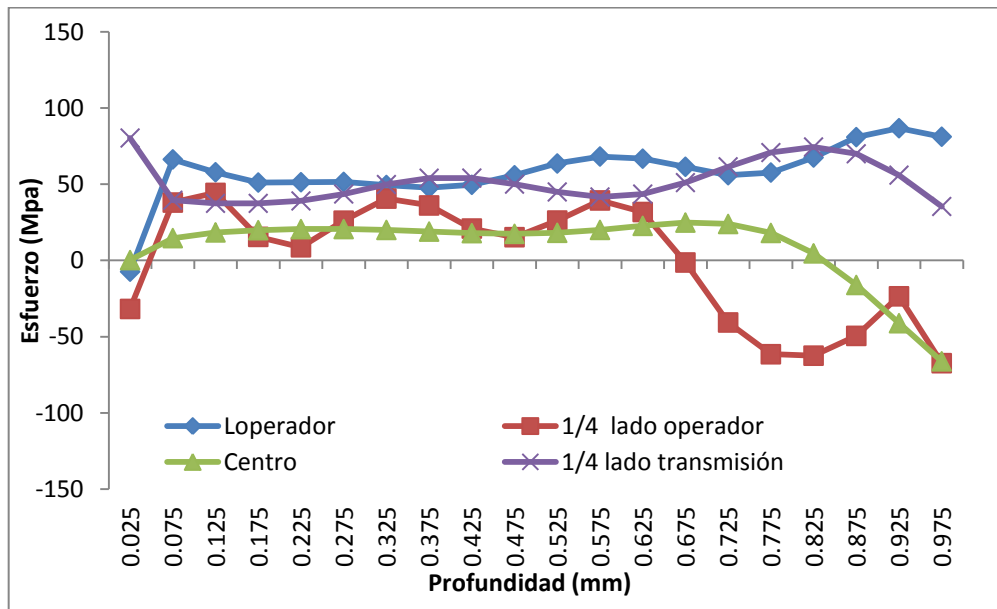


Figura 6.13 Gráfica de esfuerzos residual en dirección transversal al laminado vs profundidad (cuatro puntos evaluados en muestra nivelada).

Los valores del esfuerzo encontrados en la dirección transversal al laminado, para las pruebas realizadas en las muestras mencionadas, se puede observar el efecto del nivelado de precisión, en la grafica de la figura 6.6 que corresponde a la muestra obtenida directamente de la punta del rollo, se encontraron valores altos en dos de las 4 zonas evaluadas, principalmente en el material cercano a la superficie del material lo cual es válido debido a las diferentes velocidades de enfriamiento en el material, en la figura 6.7 con los valores de esfuerzo residual encontrado en la muestra enderezada se nota una disminución del perfil de esfuerzo, sin embargo se observan diferencias en las tendencias de las diferentes zonas evaluadas, donde de las cuatro pruebas realizadas en dicha muestra, tres muestran valores de esfuerzo negativos entre los -80 y -140 Mpa en el material cercano a la superficie y al profundizar en el milímetro de la prueba, estas tienden a mantenerse entre los -25 a 30 Mpa, sin embargo una cuarta prueba realizada en el material procesado por el lado transmisión del nivelador muestra una tendencia muy distinta manteniendo valores negativos entre los -40 y -100 MPA en toda la profundidad de la prueba y para finalizar esta comparación se observa en la figura 6.8 los valores de esfuerzo obtenidos en la muestra procesada en el nivelador de precisión, los resultados obtenidos demuestran una disminución del perfil de esfuerzo residual principalmente en el material cercano a la superficie y además muestra una tendencia similar en las distintas zonas evaluadas en el ancho de las muestras. La diferencia entre el material enderezado y nivelado deberá ser más notoria si el material procesado tiene defectos visibles de orilla o centro ondulado, debido a que estos defectos no los corrige un simple enderezado. Debido a esto, tampoco es apto para controlar y uniformizar los esfuerzos en el material, ya que el material después del enderezado mantendrá zonas con diferente longitud lo cual provoca esfuerzos entre las zonas a lo ancho y largo del material.

6.3 Evaluación del perfil de esfuerzo residual en lo ancho y largo de la placa de acero nivelada, obtenida del rollo laminado en caliente.

Para analizar el perfil de esfuerzo encontrado en el ancho del rollo, se realizaron los ensayos descritos en el capítulo 4, donde se indicó que se realizaron 3 pruebas a lo ancho del rollo (lado operador, centro y lado transmisión), esto con el objetivo de determinar si existe diferencia significativa en los perfiles de esfuerzo a lo ancho del rollo. Al graficar los esfuerzos principales máximos y mínimos se puede observar la tendencia de los esfuerzos que muestra una placa nivelada, donde se encontró que el esfuerzo residual suele ser de compresión en la superficie, pasando a valores de tensión y llegando a un máximo esfuerzo tensil al acercarnos al milímetro de profundidad.

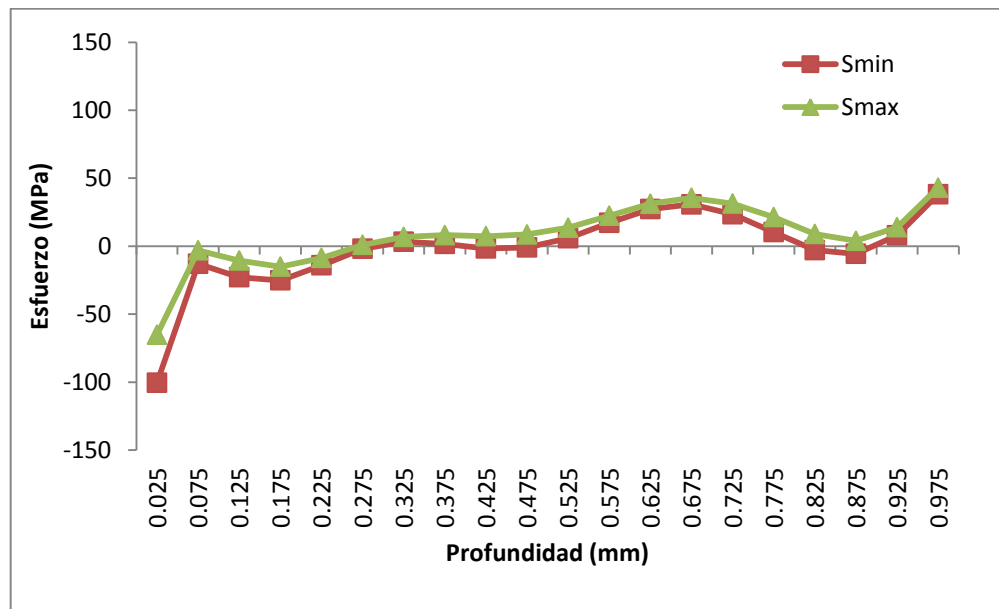


Figura 6.14 Valores de esfuerzos principales máximos y mínimos (prueba realizada en lado operador, muestra obtenida en la punta del rollo espesor 7.96mm (5/16") vs profundidad (mm) de la prueba

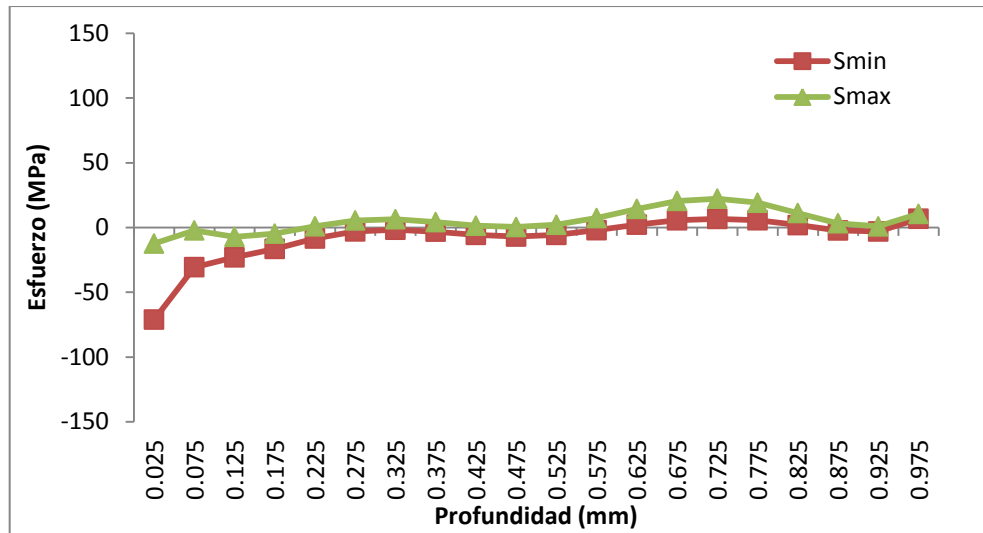


Figura 6.15 Valores de esfuerzos principales máximos y mínimos (prueba realizada en el centro punta de rolo espesor 7.96mm (5/16")) vs profundidad (mm) de la prueba.

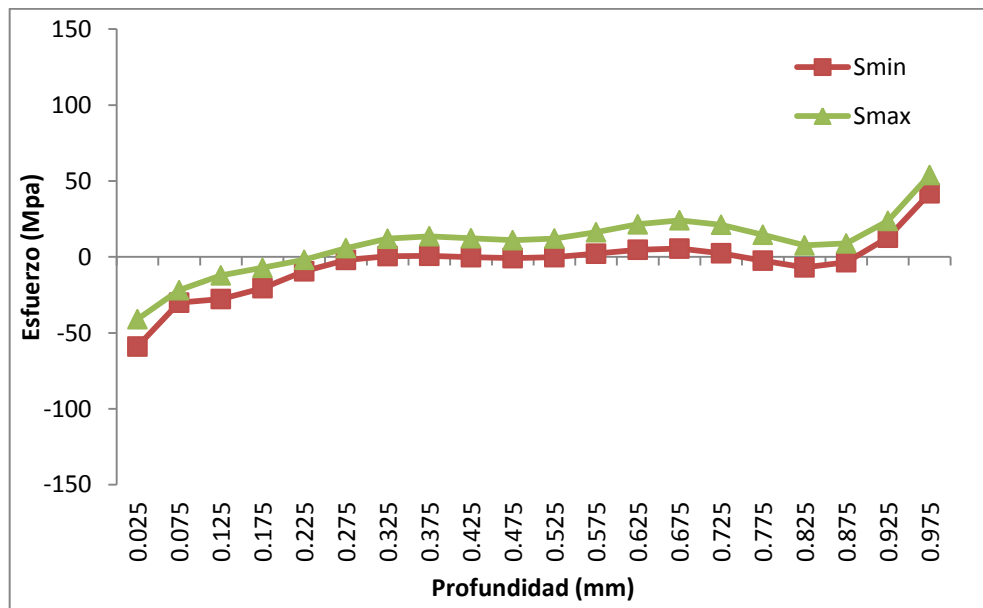


Figura 6.16 Valores de esfuerzos principales máximos y mínimos (prueba realizada en lado transmisión, punta del rolo espesor 7.96mm (5/16")) vs profundidad (mm) de la prueba.

En las gráficas anteriores (figura 6.14 a 6.16) se muestran los perfiles de esfuerzo residual máximos y mínimos para cada prueba realizada en la muestra obtenida de la punta del rollo nivelado, con un espesor de 7.96 mm (5/16”). Con la finalidad de observar el perfil de esfuerzo en lo ancho de las muestras, en las figuras 6.17 a 6.19 se muestran, únicamente los perfiles de esfuerzo residual principal máximo obtenido para cada zona evaluada, esto con la finalidad de simplificar su comparación, por lo que en cada gráfica se tiene el perfil de esfuerzo máximo para lado operador, centro y lado transmisión de la muestra; Lo anterior para las tres zonas evaluadas en el rollo. No obstante, cabe destacar que se observaron los perfiles de esfuerzo residual principal mínimo, esfuerzos en dirección de laminado y transversal al laminado, esfuerzo equivalente bajo el criterio de Von mises, y en todos ellos se muestran tendencias similares, se observa que las magnitudes de esfuerzo en el material cercano a la superficie (.025-.075 mm) son mayores en los primeros puntos, con la profundidad disminuye el esfuerzo y se mantiene entre los 20 y los 60 MPa, con tendencia aumentar al llegar a la profundidad total de la prueba (1mm), el valor de esfuerzo se mantiene por debajo del 50% del esfuerzo de cedencia.

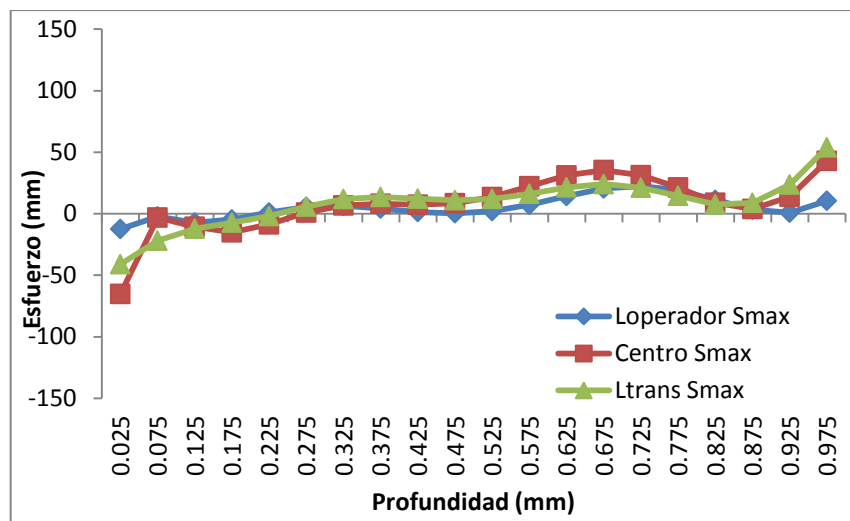


Figura 6.17 Perfil de esfuerzo residual máximo vs profundidad de la prueba; tres zonas evaluadas, para la placa nivelada obtenida de la punta del rollo; Espesor 7.96 mm.

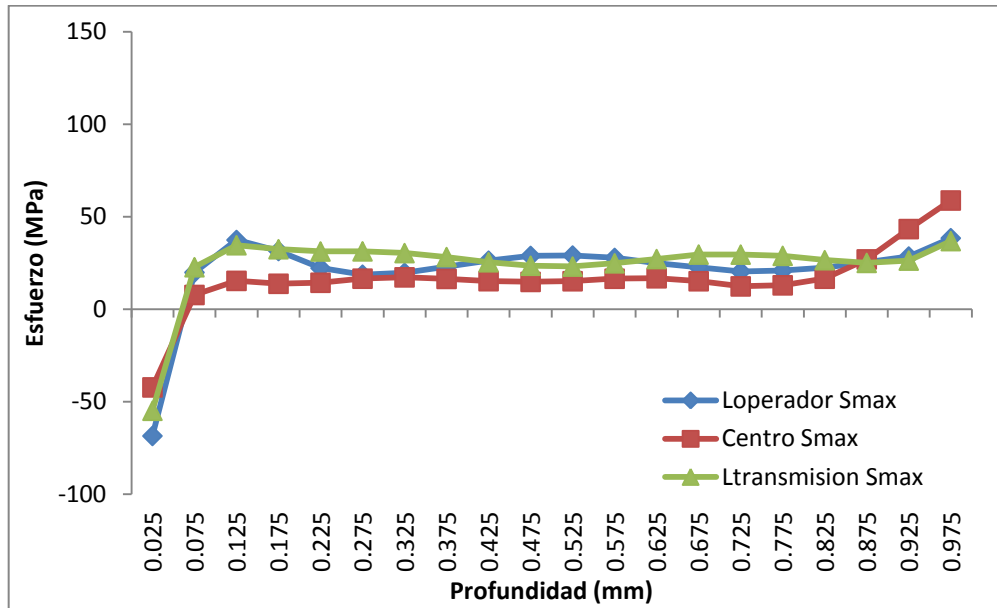


Figura 6.18 Perfil de esfuerzo residual máximo vs profundidad de la prueba; tres zonas evaluadas, para la placa nivelada obtenida del centro del rollo; Espesor 7.96 mm.

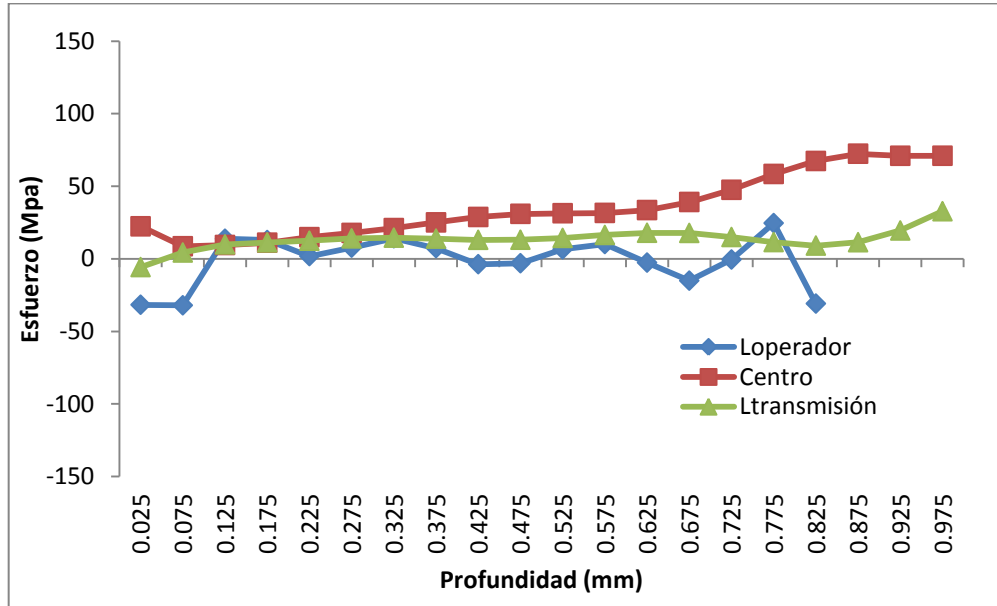


Figura 6.19 Perfil de esfuerzo residual máximo vs profundidad de la prueba; tres zonas evaluadas, para la placa nivelada obtenida de la cola del rollo; Espesor 7.96 mm.

En las gráficas de las figuras anteriores 6.17 a 6.19 se observa que al menos en el ancho de cada muestra (punta, centro y cola) si se toma en cuenta la profundidad total de la prueba realizada, se obtuvieron perfiles de esfuerzo residual con tendencias similares, con excepción de la prueba realizada en el lado operador en la cola del rollo, la variación observada se debió a un error de operación del sistema automático de perforación, por lo cual esta prueba es despreciable. Debido a que uno de los principales objetivos del nivelador de precisión es obtener un material plano que cumpla con los estándares de calidad, lo cual se consigue igualando las longitudes del material en la dirección de laminado, y homogenizando lo mejor posible los esfuerzos residuales en el material, de tal manera que si se observan tendencias similares en el ancho y largo de las muestras se podrá decir que pasaron por un proceso de nivelado de precisión eficiente. De igual manera para corroborar estos resultados se realizaron gráficas de esta misma forma, para los distintos espesores evaluados y se encuentra que la tendencia no es dependiente del espesor, ya que al observar las gráficas de las figuras 6.20 a 6.22 las cuales muestran los resultados de los perfiles de esfuerzo para las pruebas realizadas en espesor 9.53 mm (3/8”).

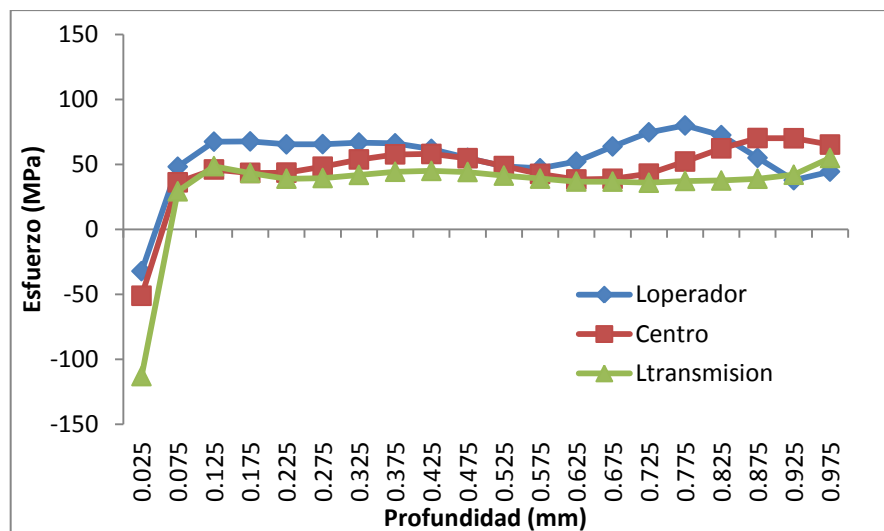


Figura 6.20 Perfil de esfuerzo residual máximo vs profundidad de la prueba; tres zonas evaluadas, para la placa nivelada obtenida de la punta del rollo; Espesor 9.53 mm.

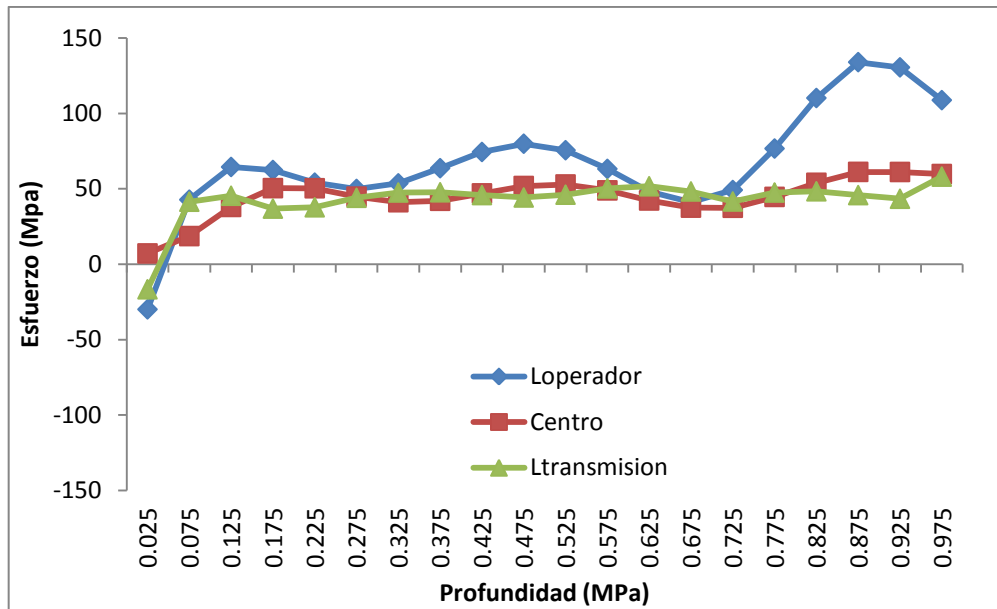


Figura 6.21 Perfil de esfuerzo residual máximo vs profundidad de la prueba; tres zonas evaluadas, para la placa nivelada obtenida del centro de rollo; Espesor 9.53 mm.

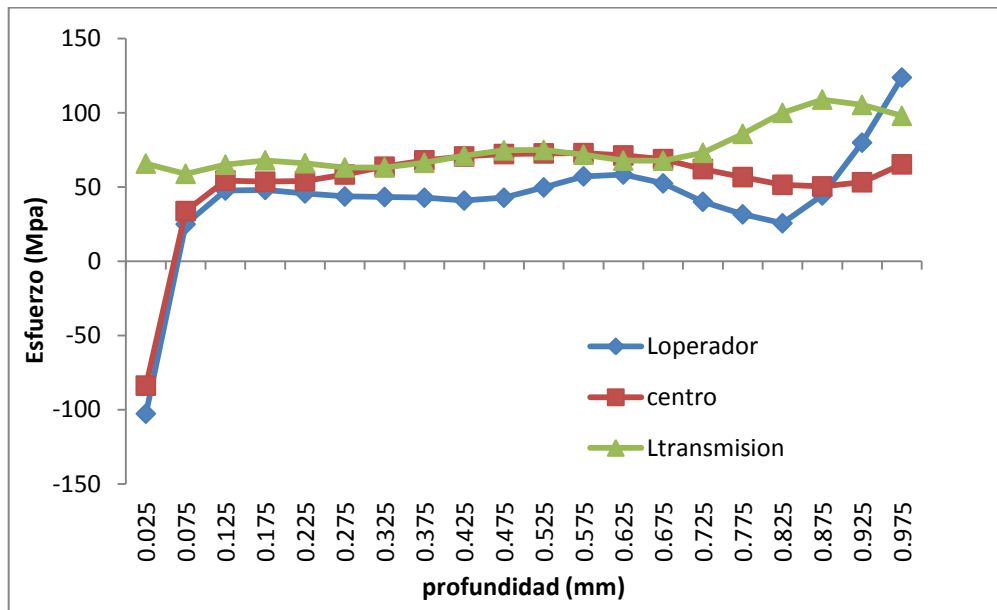


Figura 6.22 Perfil de esfuerzo residual máximo vs profundidad de la prueba; tres zonas evaluadas, para la placa nivelada obtenida de la cola del rollo; Espesor 9.53 mm.

De las gráficas anteriores (figura 6.15 a 6.17) se observa que de igual manera que en las muestras de espesor de 7.96 mm, las tendencias que se muestran a lo ancho de las muestras, tanto para la punta, como para el centro y la cola, no tienen una diferencia significativa. Con la finalidad de analizar el efecto del proceso de nivelado de precisión en el material se obtuvo el comportamiento del perfil de esfuerzo a lo largo del rollo, utilizando los resultados obtenidos del perfil de esfuerzo máximo de cada zona (Loperador, centro y ltransmisión), se comparan con la zona equivalente utilizando las muestras obtenidas en la punta, centro y cola del rollo. Por ejemplo en la gráfica de la figura 6.23 se comparan la zona del lado operador para las tres muestras evaluadas.

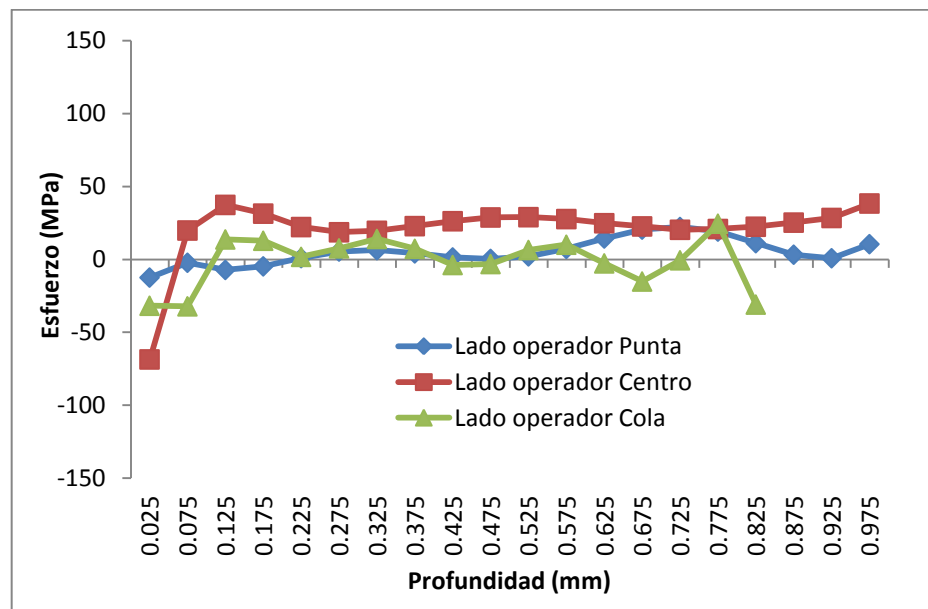


Figura 6.23 Perfil de esfuerzos máximos en 1 mm de profundidad evaluado en el lado operador en las muestras niveladas obtenidas de la punta, centro y cola del rollo 7.96 mm.

De igual manera se comparan los perfiles de esfuerzo de las pruebas realizadas en el material procesado por el centro y el lado transmisión o motriz del nivelador de precisión y se obtienen las gráficas de las figuras 6.24 y 6.25.

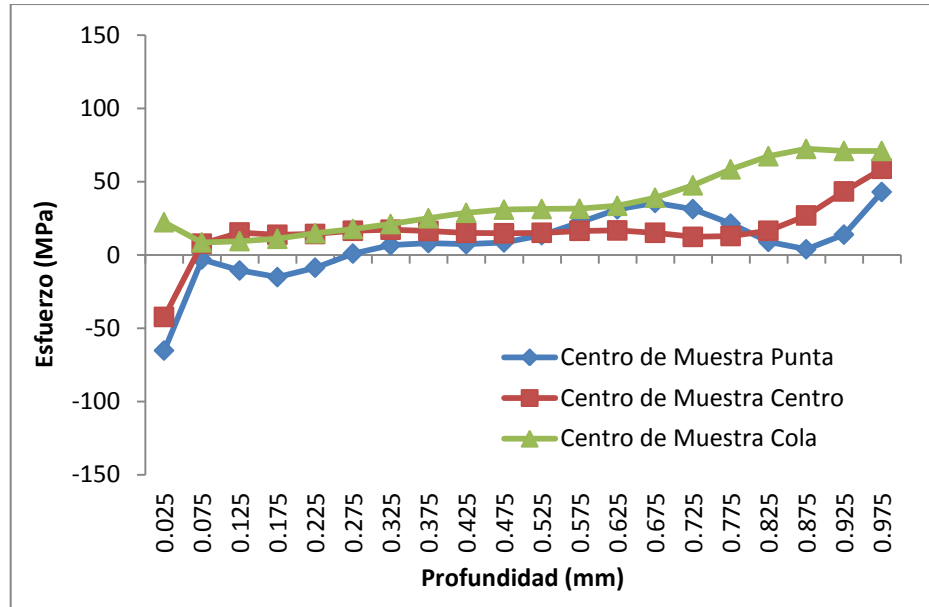


Figura 6.24 Perfil de esfuerzos máximos en 1 mm de profundidad evaluado en el centro de las muestras niveladas obtenidas de la punta, centro y cola del rollo 7.96 mm.

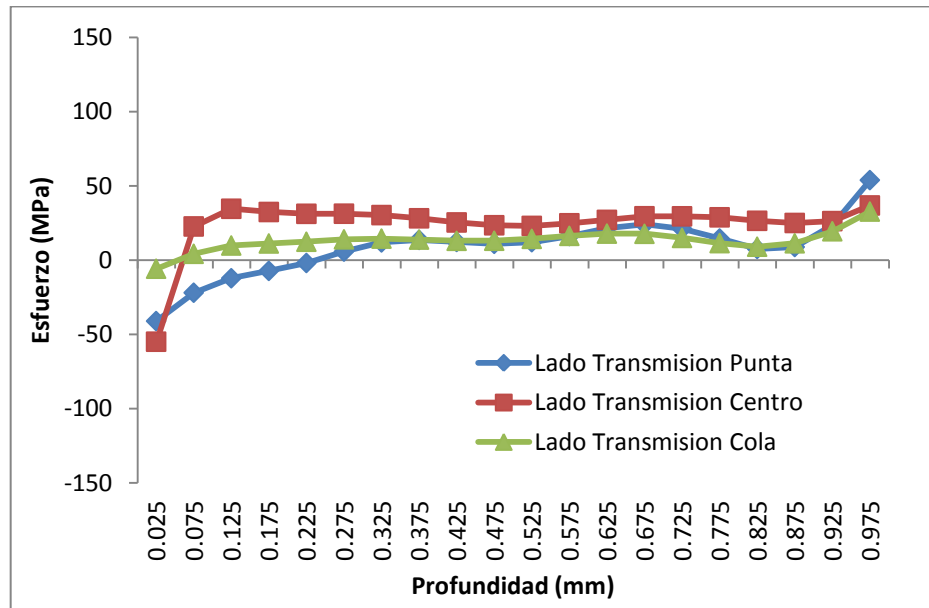


Figura 6.25 Perfil de esfuerzos máximos en 1 mm de profundidad evaluado en el lado transmisión de las muestras niveladas obtenidas de la punta, centro y cola del rollo 7.96 mm.

Al observar los valores obtenidos en una zona y compararla con los resultados en la zona equivalente en otras muestras, se llega a la conclusión de que al menos para el material evaluado y las pruebas realizadas, el proceso de nivelado obtiene valores uniformes de esfuerzo residual también a lo largo del rollo, lo cual es esperado debido al principio de funcionamiento del nivelador de precisión.

6.4 Efecto del proceso de temple mecánico sobre los esfuerzos residuales al procesar un rollo de acero.

En el capítulo cinco (sección 5.4) se grafican los perfiles de esfuerzo residual utilizando el criterio de Von mises, además del ángulo obtenido por el software utilizado por el equipo de prueba, dicho ángulo como ya se ha mencionado indica la dirección del esfuerzo principal. Lo anterior se realizó utilizando los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la muestra procesada en el temple mecánico y la procesada en el nivelador de precisión en las cinco posiciones como se indican en el capítulo cuatro. Al comparar los resultados se observó que al menos para estas posiciones evaluadas en ambas muestras no existe una diferencia significativa en los valores de esfuerzo obtenidos entre ambos procesos; Sin embargo al observar las gráficas de la dirección del esfuerzo principal (ángulo) se encuentran variaciones importantes respecto a la profundidad y entre una prueba y otra (sección 5.4). Por lo cual para observar desde otro enfoque el resultado obtenido se utiliza el ángulo para obtener los esfuerzos en la dirección de laminado y transversal a la misma, de esta manera se elimina una variable, el ángulo de dirección del esfuerzo.

Realizando los cálculos como se indicó en el inicio de este capítulo, se obtuvo el esfuerzo en dirección del proceso de laminado y en dirección transversal, donde se observa que para ambos procesos el esfuerzo en dirección transversal es mayor, lo cual concuerda con los resultados de la sección 6.2, por este motivo en las gráficas de la figura 6.26 y 6.27 se compara el esfuerzo en la dirección transversal, para ambas muestras por separado (nivelado y Temple mecánico).

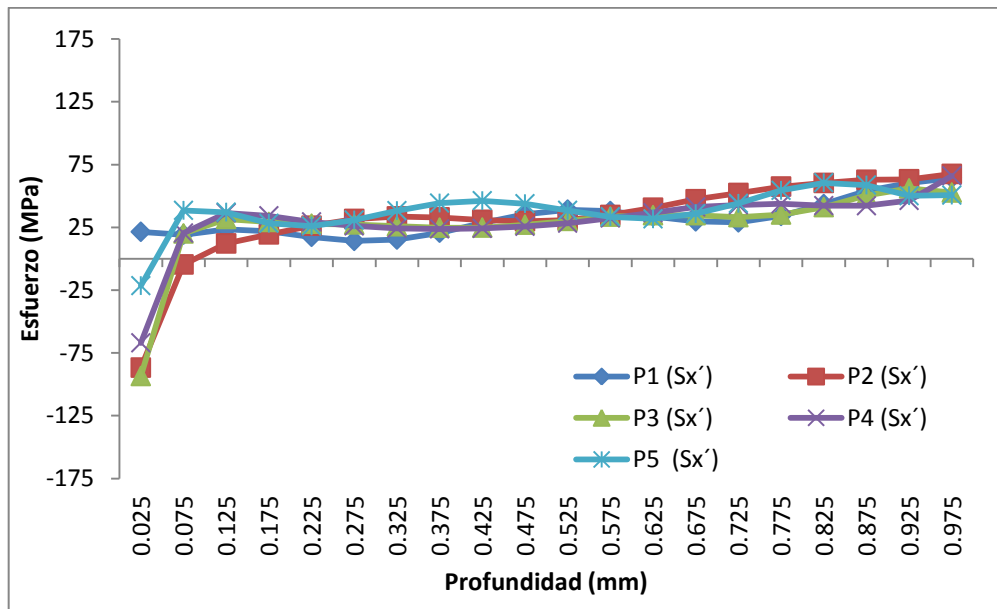


Figura 6.26 Valores de esfuerzo en la dirección de laminación en 5 posiciones (Temple Mecánico)

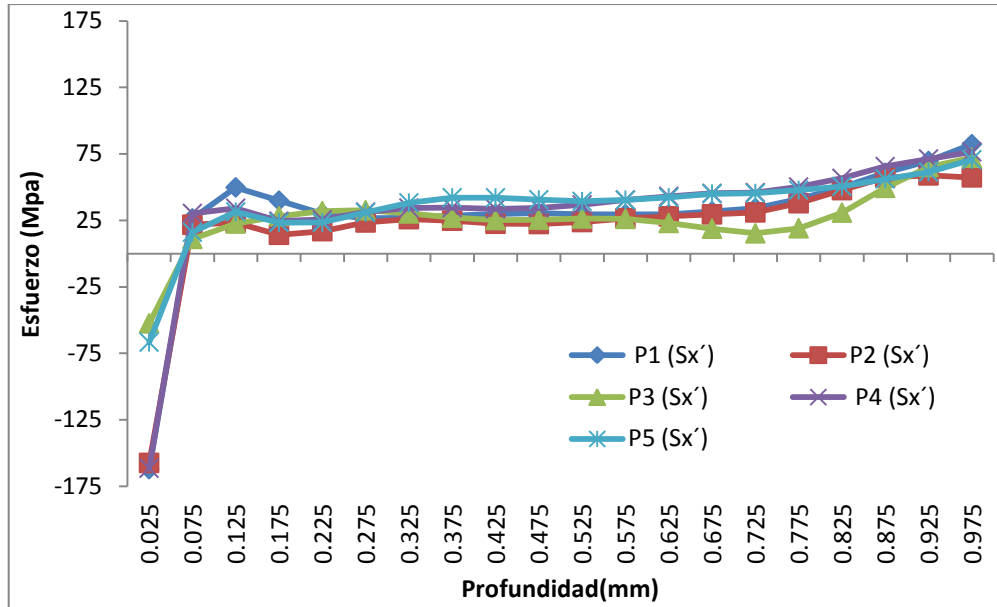


Figura 6.27 Valores de esfuerzo en la dirección transversal al laminado en 5 posiciones (Nivelado de Precisión)

Al observar los perfiles de esfuerzo encontrados en el material procesado por el temple mecánico y compararlos con los obtenidos en el material que fue procesado en el nivelador de precisión, se observa que ambos procesos logran mantener niveles similares de esfuerzo residual, lo cual indica que aunque estos procesos tienen principios de funcionamiento diferentes obtienen resultados similares en cuanto a la magnitud del esfuerzo y en cuanto a las tendencias del esfuerzo en el primer milímetro de profundidad del material. La diferencia como ya se mencionó entre ambos procesos es la forma en que se aplica un esfuerzo al material para lograr homogenizar el material. Estas diferencias en la aplicación de la carga al material provocan que algunas propiedades mecánicas del material procesado por el temple mecánico difieran del material procesado en el nivelador. Para comprender los cambios en las propiedades mecánicas de ambos materiales se realizaron las pruebas de tensión que se muestran en el capítulo 5. Los resultados de este ensayo se comparan en una gráfica de esfuerzo-deformación donde se tienen los valores de un ensayo en una probeta de material nivelado con los valores de un ensayo con una probeta de material con temple mecánico (figura 6.28).

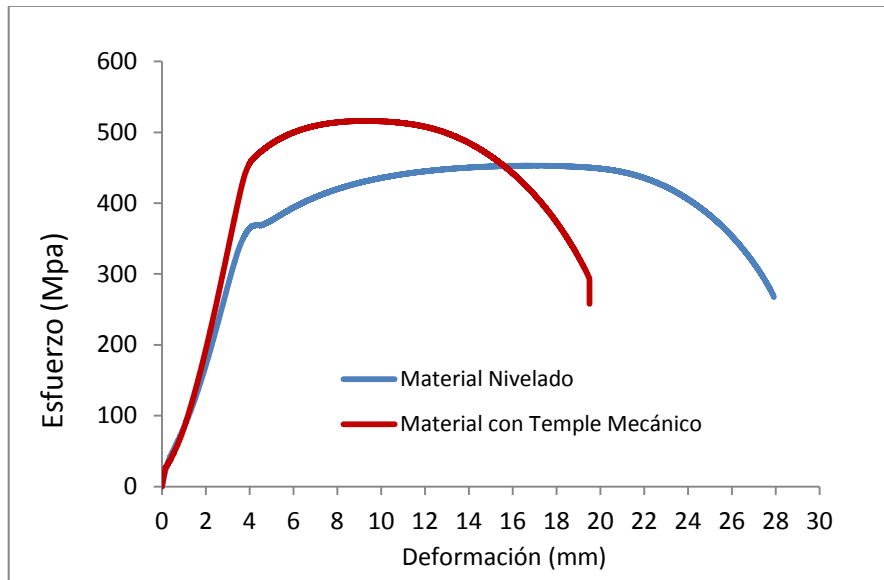


Figura 6.28 Curva esfuerzo – deformación para acero HSLA G50 con dos procesos distintos, nivelado y Temple mecánico

En la figura 6.23 se observa que el material que se obtuvo del proceso de Temple mecánico tiene un esfuerzo de cedencia más alto, lo cual indica que durante el proceso el material fue sujeto a mayor deformación que el material nivelado. La diferencia en el módulo de Young es poca y se debe principalmente a que las mediciones no fueron realizadas con el extensómetro; se observa también, que para un mismo esfuerzo, por ejemplo 400 MPa, el material procesado en el nivelador tendrá un valor de elongación mayor que el material procesado en el Temple Mecánico; lo anterior se puede observar en el histograma de la figura 6.23 el cual fue realizado con los valores de porcentaje de elongación obtenidos en los ensayos de tensión, y se puede observar claramente que, para las probetas de material nivelado se lograron obtener mayores porcentajes de elongación total. Esto significa que, para deformar permanentemente el material nivelado, se necesitará menor energía para procesarlo.

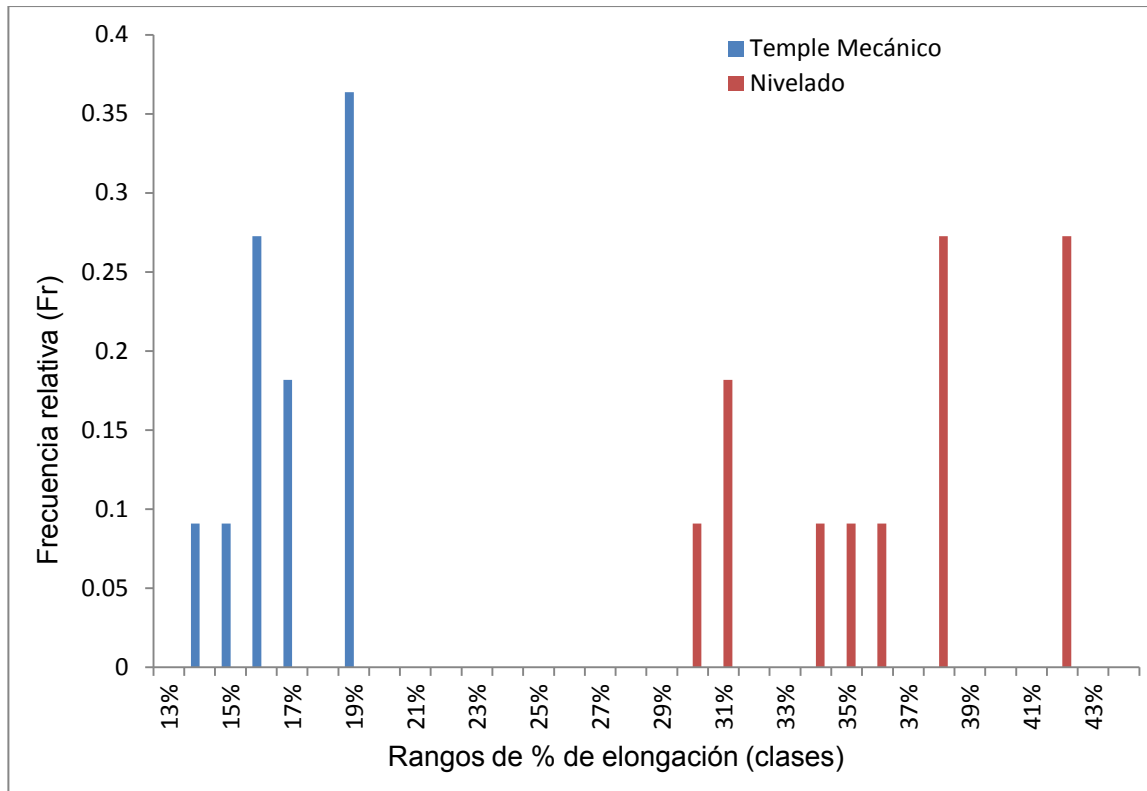


Figura 6.29 Histograma de porcentajes de elongación en ensayos de tensión (Temple mecánico y Nivelado)

6.4.1 Análisis de material con ambos procesos

Dentro de esta comparación entre ambos procesos, se evaluó material que paso por ambos procesos y observar el comportamiento de este material, aun que no es 100% comparable debido a que es otro tipo de acero (Grado 55). Se realizaron de igual manera pruebas en tres calibres diferentes, como se menciono en el capítulo 4, se calculó el esfuerzo en la dirección de laminación y se obtuvieron gráficas como se muestran en las figuras 6.30, 6.31 y 6.32.

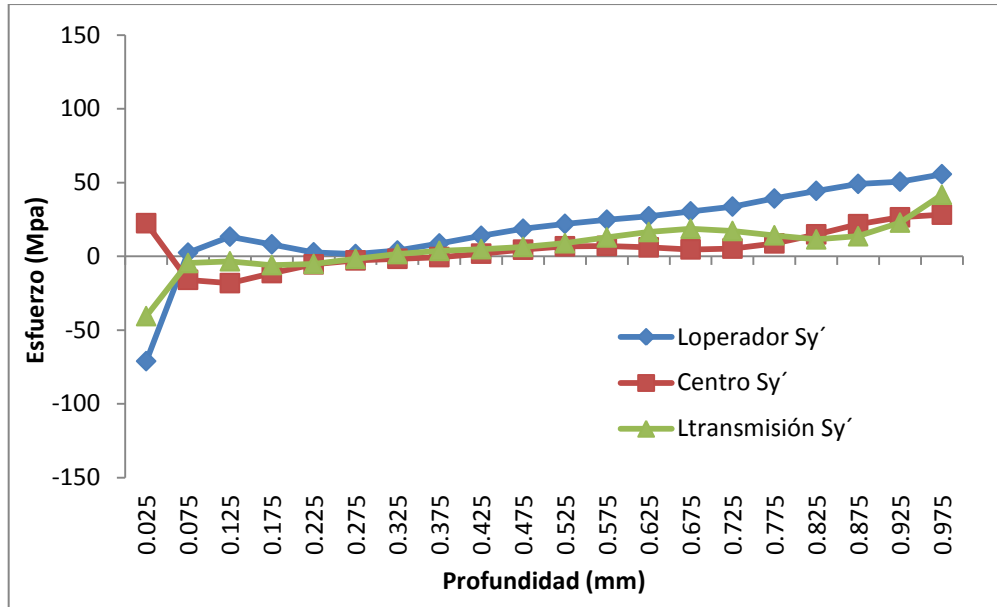


Figura 6.30 Esfuerzo (MPa) vs Deformación (mm) prueba realizada en muestra de acero Grado55, (muestra obtenida centro de rollo). 3.4mm (Calibre 10)

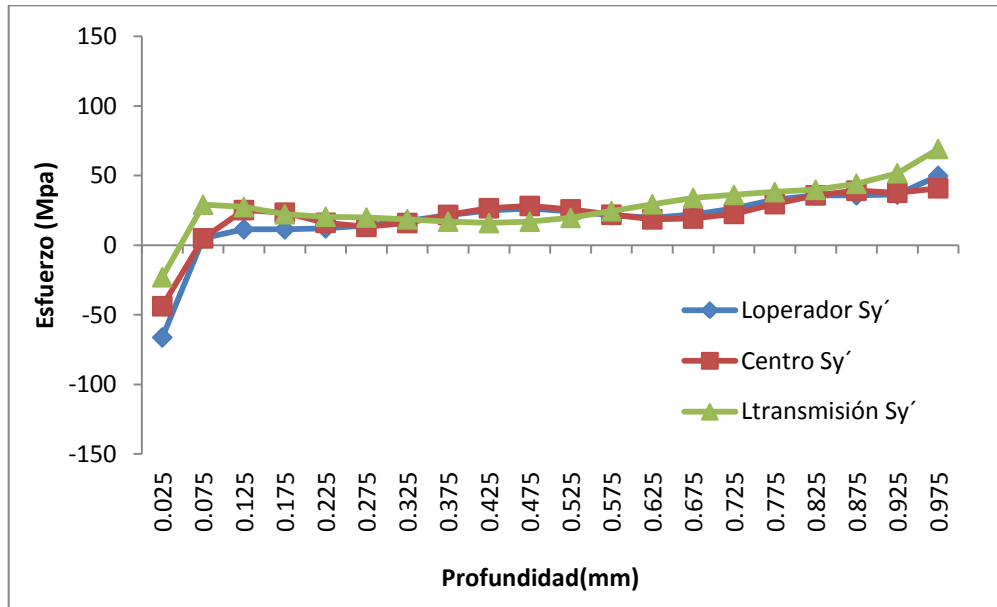


Figura 6.31 Esfuerzo (MPa) vs Deformación (mm) prueba realizada en muestra de acero Grado55, (muestra obtenida centro de rollo). Espesor 4.76mm (Calibre 3/16")

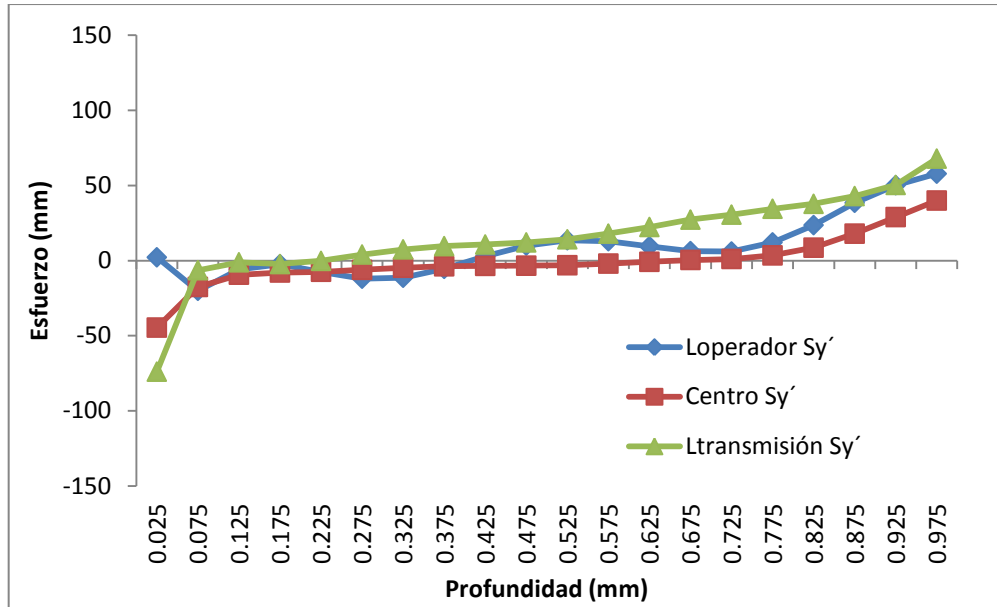


Figura 6.32 Esfuerzo (MPa) vs Deformación (mm) prueba realizada en muestra de acero Grado55, (muestra obtenida centro de rollo). Espesor 4.2 mm (Calibre 8).

Los resultados obtenidos en las muestras y expuestos como esfuerzo en la dirección de laminado en las gráficas anteriores, demuestra que se obtienen perfiles bajos de esfuerzo, además de que se comportan de manera similar en el ancho del materia, lo anterior también se obtuvo en el materia que paso únicamente por el nivelador de precisión o únicamente por el temple mecánico, a simple vista al observar las gráficas anteriores podría parecer que con este proceso se obtiene mayor homogeneidad, sin embargo al realizar un histograma de frecuencia para cada una de las muestras que pasaron por ambos procesos y compararlas con un histograma realizado para una muestra procesada únicamente en el nivelador de precisión, se obtienen las gráficas de las que se muestran continuación.

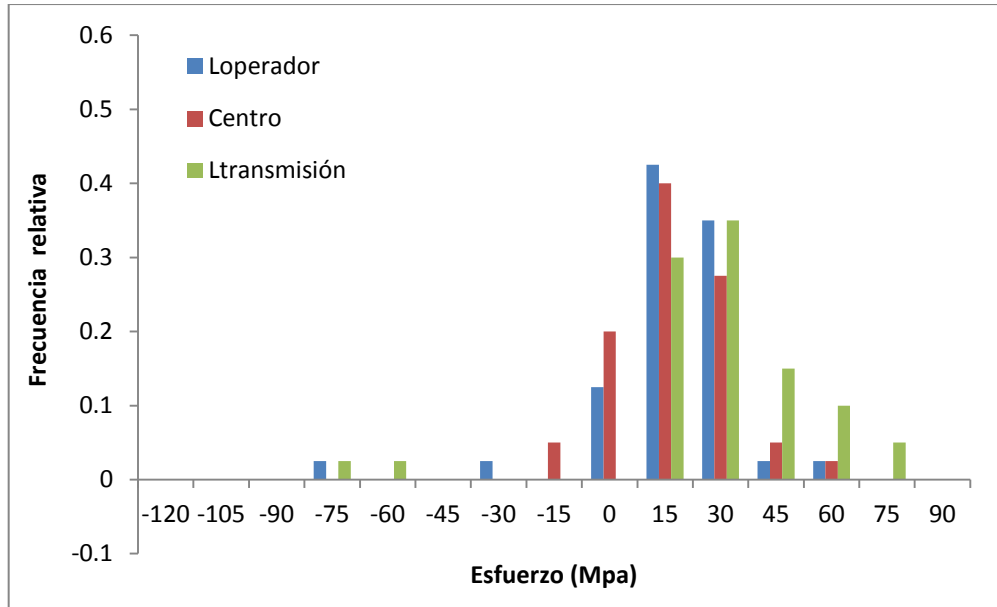


Figura 6.33 Histograma de Frecuencia relativa vs esfuerzo (MPa), muestra procesada con Nivelado de Precisión y Temple Mecánico (espesor 3.4mm)

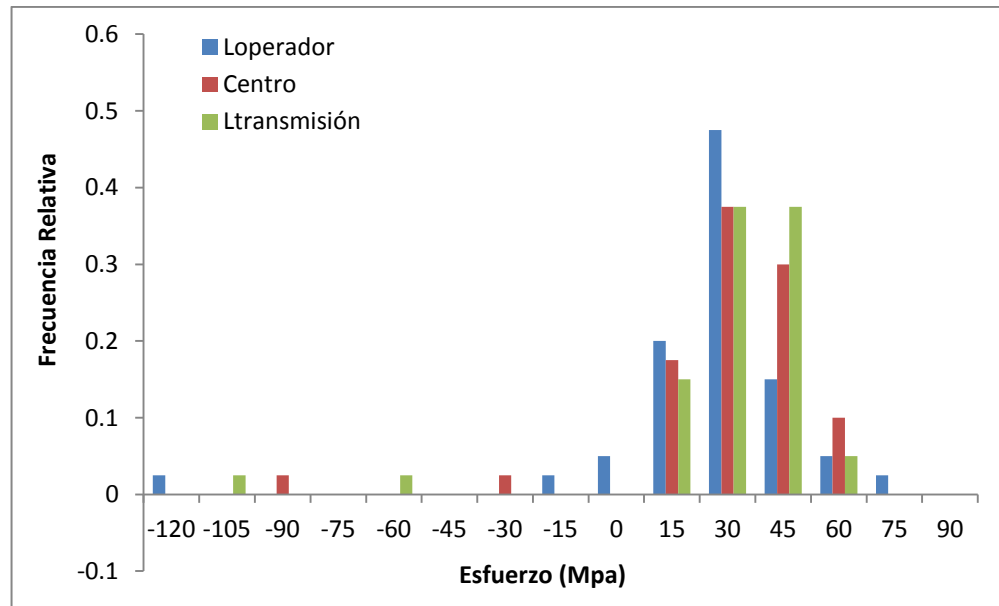


Figura 6.34 Histograma de Frecuencia relativa vs esfuerzo (MPa), muestra procesada con Nivelado de Precisión y Temple Mecánico (espesor 4.76 mm)

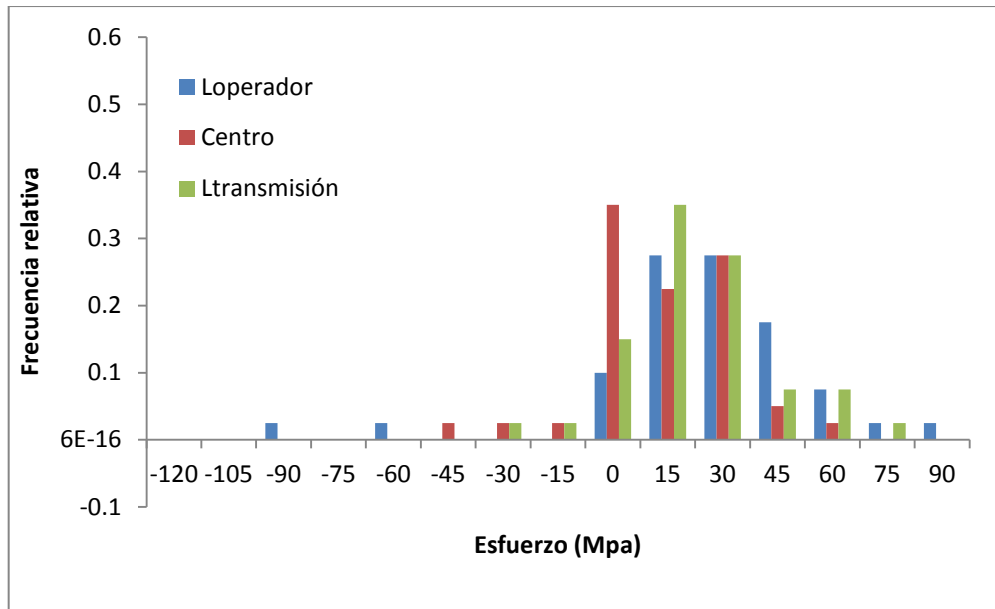


Figura 6.35 Histograma de Frecuencia relativa vs esfuerzo (MPa), muestra procesada con Nivelado de Precisión y Temple Mecánico (espesor 4.2 mm)

De las gráficas anteriores figuras 6.33, 6.34, 6.35 se puede observar que la magnitud del esfuerzo, en los perfiles obtenidos en cada prueba en las muestras que fueron procesadas por el nivelador de precisión y el temple mecánico, tienden a tener una misma distribución con magnitudes que se repiten con mayor frecuencia entre los 0 y 60 Mpa, y al observar el histograma de frecuencia realizado para una de las muestras que fue únicamente procesada por el nivelador de precisión (figura 6.36), se observa que de igual manera las magnitudes de esfuerzo con mayor repetitividad en las pruebas, se mantienen entre los 0 y 60 Mpa. Lo anterior indica que no es necesario realizar ambos procesos para controlar los esfuerzos residuales de manera efectiva, lo cual se puede obtener realizando cualquiera de los dos procesos, una ventaja que puede resultar de realizar los dos procesos es primeramente que los rangos de espesor con los que se puede trabajar es mayor, además de que posiblemente se controle mejor del espesor de las hojas a lo largo, y es posible obtener un mejor acabado superficial.

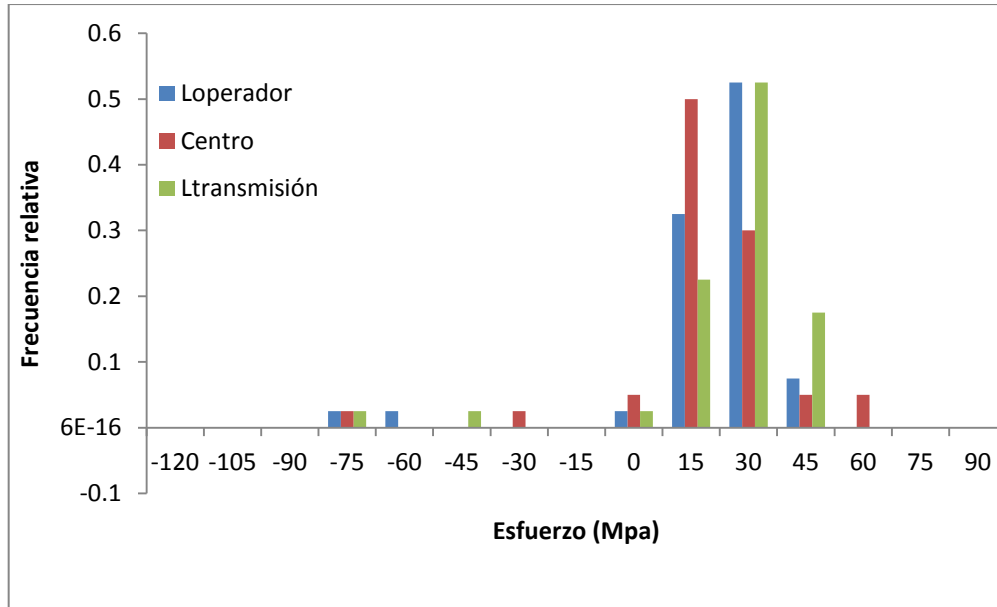


Figura 6.36 Histograma de Frecuencia relativa vs esfuerzo (MPa), muestra procesada con Nivelado de Precisión (espesor 7.96mm)

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

7.1 Conclusiones

- El proceso de nivelado de precisión mejora la distribución de esfuerzos en el ancho y largo de la placa, por lo cual una medición de esfuerzos puede representar el nivel de esfuerzos en un lote de placas obtenidas del mismo rollo.
- Debido a las diferencias en la velocidad de enfriamiento del rollo laminado en caliente, los esfuerzos residuales máximos suelen encontrarse principalmente en la superficie del material y disminuyen conforme se avanza en profundidad total de la prueba 1mm.
- Los esfuerzos residuales tienen valores similares en toda la placa, así como también entre las diferentes placas obtenidas en diferentes zonas del rollo laminado en caliente, esto después de un procesos de nivelado de precisión efectivo.
- El principal efecto del nivelado de precisión se produce en el material cercano a la superficie, esto se nota al comparar el perfil de esfuerzos obtenido en una placa sin nivelar y en la placa nivelada.

- El proceso de nivelado de precisión es igualmente efectivo que el temple mecánico para reducir esfuerzos residuales.
- El proceso de Temple mecánico eleva el esfuerzo de cedencia del material y reduce el porcentaje de elongación del material a la fractura.
- El fenómeno de recuperación elástica o cambio de dimensiones en una placa u hoja de acero plano, puede deberse a altos esfuerzos residuales, a diferencias de longitud entre las distintas zonas de la placa, a la forma de la pieza que se va a cortar o a placas que no son totalmente planas.
- Tener una línea de temple mecánico, en combinación con una de nivelado de precisión, resulta en el proceso óptimo para obtener mejor acabado superficial, tener una menor variación en el espesor de la placa, sin embargo para controlar los esfuerzos residuales es suficiente con realizar un nivelado de precisión o un temple mecánico, siempre y cuando se manejen los calibres dentro del rango de operación de los dos procesos.

7.2 Recomendaciones y áreas de oportunidad

Se tuvieron problemas con la selección y obtención de muestras, debido a que no se definió claramente el material que se iba a estudiar.

Para próximas evaluaciones del perfil de esfuerzo residual en acero plano con algún proceso en especial, o con distintos procesos para comparar entre ellos, es recomendable seleccionar un solo tipo de acero, con solo un espesor y dimensión de muestra, esto para eliminar variantes que pueden influir en los resultados de las pruebas.

Se recomienda también, tener el laboratorio donde se realizan las pruebas, con ambiente controlado, esto, para realizar las pruebas a la misma temperatura ambiente, ya que la temperatura puede llegar a tener algún efecto en el comportamiento del material y/o del equipo utilizado

7.3 Trabajo a futuro

- Realizar y continuar con pruebas en un material específico y establecer un diseño experimental, esto para lograr estandarizar un método de muestreo, para demostrar estadísticamente que el material que se evalúa representa un lote de material.
- Realizar pruebas en material procesado en un nivelado por elongación y observar los efectos de este proceso sobre los esfuerzos residuales comparado con el proceso de nivelado de precisión de rodillos y temple mecánico.
- Realizar un mayor número de evaluaciones en la cara inferior de las muestras y seguir evaluando material obtenido directamente del rollo laminado en caliente.
- Provocar la falla de recuperación elástica en una placa nivelada y analizar qué estado de esfuerzos puede causar este defecto.
- Utilizar un simulador y utilizando el estado de esfuerzos obtenido en una muestra o placa, simular posibles defectos de planeza.

Bibliografía

1. **Samala, Praveen Reddy.** *Hole Drilling residual measurement using 3d digital speckle pattern interferometry.* Rochester ,Michigan : s.n., 2007.
2. **C.Ruud.** *Measurement of Residual Stress.* Pennsylvania State University : Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, 2002.
3. —. *Measurement of Residual Stress.* 2002.
4. *The Marketing of barkhausen noise analysis.* **Cardon, Michel.** 2007, The shot peener, págs. 18-20.
5. **Gardner, C. Gerald.** *ENGINEERING EVALUATION OF BARKHAUSEN EFFECT STRESS MEASUREMENT INSTRUMENTATION FOR APPLICATION TO AUTOFRETTAGED.* Southwest Research Institute : National Technical Information Service, September 1972.
6. **Schajer, G.S.** *Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses:.* s.l. : Society for Experimental Mechanics 2010, Received: 1 May 2010 / Accepted: 2 July 2010 / Published online: 31 July 2010.
7. *Everything you need to know about flatteners and levelers for coils processing - part1- Coil processing Tech Cell.* **Theis, Eric.** s.l. : The Fabricator, October 10, 2002.
8. *Producing Flat Material- that stay flat- for cutting operations.* **Industries', Red Bud.** 2008, the cutting edge, págs. 10-12.
9. *Everything you need to know about flatteners and levelers for coil processing - Part 2 - Coil processing tech Cell.* **Theis, Eric.** s.l. : the fabricator, November 7, 2002.
10. **Dieter, George E.** *The Tension Test.* *Mechanical Metalurgy.* s.l. : McGraw-Hill Book Company.
11. **Elcoro, Ignacio Alvarez.** *Reporte sobre la operacion de una linea de nivelado de precisión para placa laminada en caliente.* Monterrey, Nuevo León : s.n., 2011.
12. *Everything you need to know about flatteners and levelers for coil processing- Part 3- Coil Processing Tech Cell.* **Theis, Eric.** s.l. : The Fabricator, January 16, 2003.
13. *The Effect of the Number of Leveling Rolls on the Straightening Process.* **Richard P. Smith, Jr.** 2006, AISTech Proceedings, Vol. II, págs. 129-140.

14. *Modeling Plastic Strain During Cold Leveling of Steel Plates*. **R. P. Smith, Jr.** 1999, AISE, Pittsburgh.
15. salzgitter Group. [En línea] http://www.salzgitter-flachstahl.de/en/Ueber_uns/Produktionsanlagen/Kaltbreitbandwalzwerk/Dressierstrassen/.
16. *Evolution of leveling systems for flat-rolled coils, plates, and sheets*. **Sipp, Bob.** s.l. : Coildworld magazine.
17. *A ROUTINE METHOD FOR THE MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES PLATES*. **CATE, R. G. BOITEN and W. TEN.** 1952, Working Party on Tension and Vibration Research, Committee for Constructional Research T.N.O., Delft .
18. Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method. [aut. libro] American Society for Testing and Materials. *ASTM Standar Test Method E837*. 2008.
19. *Hole Drilling Residual Stress Measurement at 75: Origins, Advances, Opportunities*. **Schajer, G.S.** 2009, Society for experimental Mechanics.
20. *Hole Drilling Strain Gage Method of measuring Residual Stresses*. **Vigness, N.J Rendler and I.** 1966.
21. *An account of several new instruments and process for determining the constants of a voltaic circuit*. **Charles, Wheatstone.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
22. **Hoffman, Karl.** *An introduction to measurments using strain gages*. Darmstadt : Hotting Balding Messtechnik GmbH (HBM), 1989.
23. **A.Ajovalasit, M.Scafidi, B.Zuccarello, MBeghini, LBertini, CSantus, E.Valentini, A.Benincasa, L.Bertelli.** *The Hole Drilling strain gauge method for the measurement of uniform or non-uniform residual stresses*. s.l. : University of Pisa- SINT Technology s.r.l - University of Palermo.
24. *Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Center-hole Method of Residual.stress Measurement*. **Flaman, Michael T.** 1982.
25. **P. V. Grant, J.D Lord and P.S. Whistehead.** *The measurment of residual Stresses by the incremental Hole Drilling Technique*. Teddington, Middlesex, United Kingdom : National Physical Laboratory, 2001.
26. **Technology, SINT.** *RSM Software Operating and Maintenance Manual*.
27. **International, ASTM.** Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, Solution Hardened, and Bake Hardenable1. 2007.

28. **Upshaw, David Alan.** *Influence of Drilling Parameters on the Accuracy of Hole-drilling Residual Stress Measurements.* s.l. : B.S. Texas Tech Univesity, 2011.
29. *Residual Stress in Microalloyed Steel Sheet.* **J.Hidvéghy, J.Michel, M.Bursak.** 2002.
30. **KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.** www.Kyowa-ei.com. [En línea] www.Kyowa-ei.com.
31. **Technology, SINT.** *Automatic System for determining residual stresses .* Florence Italy : s.n.

Anexo I

Norma ASTM E837

Método de Prueba estándar para determinar esfuerzos residuales por el método de Hole-Drilling con Sensores de micro-deformación

1.- Introducción

En este anexo se presentan los aspectos más relevantes de la norma en la cual se basa el equipo RESTAN MTS 3000 para realizar las pruebas de evaluación del estado de esfuerzos en un punto. Parte del contenido mostrado en el capítulo 3 es obtenido de la norma por lo cual algunas cosas se mencionan nuevamente, sin embargo se muestran las tablas de los coeficientes de calibración utilizados por el software del equipo RESTAN para realizar los cálculos de los esfuerzos.

2.- Descripción del Método

El método Hole-Drilling determina esfuerzos residuales cercanos a la superficie de un material isotrópico linealmente elástico. La medición involucra adherir una roseta de deformación a la superficie, realizar una perforación en el centro geométrico de la roseta y medir las deformaciones resultantes relajadas por la remoción del material. El esfuerzo residual en los límites del orificio es calculado utilizando las mediciones de deformación usando una serie de ecuaciones.

3.- Generalidades de la Norma

Este método se aplica para determinar perfiles de esfuerzos residuales donde el gradiente de esfuerzos entre los planos (profundidad) es pequeño. Los esfuerzos pueden permanecer aproximadamente constantes con la profundidad “esfuerzos uniformes” o pueden variar significativamente con la profundidad

“esfuerzos no uniformes”. La pieza de medición puede ser delgada con el espesor mucho menor que el diámetro del orificio perforado ó gruesa con el espesor mucho mayor que el diámetro del orificio realizado. Para piezas delgadas únicamente se puede realizar mediciones de esfuerzo uniforme y en piezas gruesas se pueden obtener mediciones con ambos métodos.

El método de prueba estándar provee resultados precisos si:

- El componente equi-biaxial del esfuerzo residual es menor que el 50 % esfuerzo de cedencia.
- El esfuerzo cortante en cualquier dirección es menor al 25 % del esfuerzo de cedencia.

De cualquier forma en la práctica se han encontrado resultados satisfactorios atribuidos a un esfuerzo residual que no excede el 60 % del esfuerzo de cedencia del material.

3.1 Roseta de Galgas Extensiométricas

Una roseta con tres o más elementos resistivos de tipo general como se muestran en el capítulo 3 (figura 3.6) es adherida a la pieza de trabajo en la zona considerada para la evaluación. Después de lo anterior se procede a realizar la perforación en el centro geométrico de la roseta en una serie de pasos hasta conseguir la profundidad del orificio deseada. Los esfuerzos residuales en el material que rodea al orificio perforado son parcialmente relevados conforme se realiza el orificio. Las deformaciones asociadas a la relajación de los esfuerzos son medidas en una secuencia específica de pasos utilizando un instrumento para grabar estos valores de deformación.

Las constantes de calibración \bar{a} y \bar{b} indican las deformaciones relevadas gracias a la concentración de esfuerzos en el interior del orificio. Estas son

adimensionales y son constantes independientemente del material. Pero cambian ligeramente dependiendo si los cálculos serán realizados para esfuerzos uniformes o no uniformes en la profundidad del orificio. Valores numéricos de estas constantes de calibración han sido calculados mediante elemento finito para las rosetas estándar y son tabuladas para calcular los esfuerzos residuales.

3.2 Constantes de calibración utilizadas en cálculo de Esfuerzo residual

Tabla I.1 Valores numéricos de coeficientes \bar{a} y \bar{b} definidos por la norma ASTM E837-08 para el tipo de rosetas A, B y C para evaluación de esfuerzo uniforme con perforación ciega y pasada. **(18)**

Rosette A	\bar{a}					\bar{b}				
Blind hole	Hole Diameter, D_0/D					Hole Diameter, D_0/D				
Depth/D	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
0.05	.027	.037	.049	.063	.080	.051	.069	.090	.113	.140
0.10	.059	.081	.109	.139	.179	.118	.169	.206	.255	.317
0.15	.085	.115	.151	.192	.238	.180	.239	.305	.375	.453
0.20	.101	.137	.177	.223	.273	.227	.299	.377	.459	.545
0.25	.110	.147	.190	.238	.288	.259	.339	.425	.513	.603
0.30	.113	.151	.195	.243	.293	.279	.364	.454	.546	.638
0.35	.113	.151	.195	.242	.292	.282	.379	.472	.566	.657
0.40	.111	.149	.192	.239	.289	.297	.367	.462	.576	.668
Through Hole	.000	.122	.160	.209	.240	.289	.377	.470	.582	.651
Rosette B	\bar{a}					\bar{b}				
Blind Hole	Hole Diameter, D_0/D					Hole Diameter, D_0/D				
Depth/D	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
0.05	.029	.039	.053	.068	.086	.058	.078	.102	.127	.157
0.10	.063	.087	.116	.148	.189	.134	.179	.231	.286	.355
0.15	.090	.123	.162	.205	.254	.208	.269	.343	.419	.504
0.20	.107	.145	.180	.228	.280	.258	.336	.423	.511	.605
0.25	.116	.156	.202	.251	.305	.282	.361	.476	.571	.668
0.30	.120	.160	.208	.258	.309	.315	.410	.509	.609	.707
0.35	.120	.160	.206	.258	.308	.330	.427	.529	.631	.730
0.40	.118	.158	.209	.253	.305	.337	.437	.541	.644	.743
Through Hole	.096	.131	.171	.216	.265	.329	.428	.531	.630	.725
Rosette C	\bar{a}					\bar{b}				
Blind Hole	Hole Diameter, D_0/D					Hole Diameter, D_0/D				
Depth/D	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
0.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
0.06	.081	.106	.132	.163	.200	.132	.167	.199	.235	.279
0.12	.178	.230	.286	.349	.427	.309	.396	.451	.539	.624
0.18	.252	.321	.395	.475	.565	.464	.569	.666	.780	.857
0.24	.297	.375	.458	.546	.640	.576	.696	.805	.905	.997
0.30	.321	.404	.491	.583	.679	.650	.778	.893	.994	1.081
0.36	.333	.417	.507	.601	.701	.697	.829	.946	1.048	1.131
0.42	.337	.422	.514	.610	.712	.727	.860	.980	1.082	1.162
0.48	.338	.423	.516	.614	.717	.746	.861	1.001	1.103	1.182
Through Hole	.316	.399	.494	.597	.707	.629	.723	.790	.847	.850

Tabla I.1 Matriz de calibración para coeficientes a y b definidos por la norma ASTM E837-08 para el tipo de rosetas A, con perforación ciega y pasada. (18)

Hole Depth		Stress Depth									
In.	mm	0.002 0.05	0.004 0.10	0.006 0.15	0.008 0.20	0.010 0.25	0.012 0.30	0.014 0.35	0.016 0.40	0.018 0.45	0.020 In. 0.50 mm
0.002	0.05	-0.00679									
0.004	0.10	-0.00815	-0.00714								
0.006	0.15	-0.00937	-0.00844	-0.00734							
0.008	0.20	-0.01046	-0.00960	-0.00859	-0.00739						
0.010	0.25	-0.01141	-0.01063	-0.00968	-0.00856	-0.00728					
0.012	0.30	-0.01223	-0.01152	-0.01064	-0.00950	-0.00830	-0.00701				
0.014	0.35	-0.01291	-0.01227	-0.01147	-0.01050	-0.00936	-0.00806	-0.00659			
0.016	0.40	-0.01360	-0.01297	-0.01207	-0.01132	-0.01015	-0.00893	-0.00759	-0.00615		
0.018	0.45	-0.01418	-0.01344	-0.01264	-0.01184	-0.01062	-0.00970	-0.00846	-0.00712	-0.00567	
0.020	0.50	-0.01463	-0.01392	-0.01312	-0.01223	-0.01154	-0.01031	-0.00917	-0.00793	-0.00657	-0.00511
0.022	0.55	-0.01508	-0.01434	-0.01354	-0.01270	-0.01173	-0.01072	-0.00977	-0.00854	-0.00730	-0.00600
0.024	0.60	-0.01545	-0.01471	-0.01391	-0.01306	-0.01211	-0.01113	-0.01013	-0.00906	-0.00791	-0.00670
0.026	0.65	-0.01578	-0.01503	-0.01422	-0.01340	-0.01243	-0.01146	-0.01049	-0.00938	-0.00842	-0.00722
0.028	0.70	-0.01608	-0.01531	-0.01450	-0.01366	-0.01271	-0.01175	-0.01078	-0.00970	-0.00869	-0.00755
0.030	0.75	-0.01629	-0.01554	-0.01473	-0.01390	-0.01294	-0.01199	-0.01102	-0.00996	-0.00892	-0.00779
0.032	0.80	-0.01649	-0.01574	-0.01493	-0.01410	-0.01313	-0.01217	-0.01123	-0.01018	-0.00919	-0.00815
0.034	0.85	-0.01665	-0.01590	-0.01510	-0.01426	-0.01330	-0.01234	-0.01138	-0.01036	-0.00938	-0.00836
0.036	0.90	-0.01679	-0.01604	-0.01523	-0.01441	-0.01344	-0.01248	-0.01151	-0.01049	-0.00955	-0.00852
0.038	0.95	-0.01692	-0.01617	-0.01536	-0.01452	-0.01357	-0.01261	-0.01164	-0.01063	-0.00967	-0.00866
0.040	1.00	-0.01704	-0.01628	-0.01548	-0.01465	-0.01368	-0.01272	-0.01176	-0.01074	-0.00978	-0.00877
Hole Depth		Stress Depth									
In.	mm	0.022 0.55	0.024 0.60	0.026 0.65	0.028 0.70	0.030 0.75	0.032 0.80	0.034 0.85	0.036 0.90	0.038 0.95	0.040 In. 1.00 mm
0.022	0.55	-0.00464									
0.024	0.60	-0.00543	-0.00411								
0.026	0.65	-0.00604	-0.00485	-0.00364							
0.028	0.70	-0.00655	-0.00544	-0.00431	-0.00316						
0.030	0.75	-0.00693	-0.00589	-0.00484	-0.00378	-0.00270					
0.032	0.80	-0.00716	-0.00624	-0.00524	-0.00425	-0.00328	-0.00231				
0.034	0.85	-0.00738	-0.00644	-0.00555	-0.00464	-0.00373	-0.00283	-0.00195			
0.036	0.90	-0.00755	-0.00665	-0.00574	-0.00482	-0.00406	-0.00323	-0.00241	-0.00162		
0.038	0.95	-0.00770	-0.00679	-0.00582	-0.00508	-0.00432	-0.00353	-0.00277	-0.00203	-0.00131	
0.040	1.00	-0.00781	-0.00690	-0.00586	-0.00521	-0.00448	-0.00374	-0.00303	-0.00234	-0.00167	-0.00108
Table 5(b) Hole-Drilling Calibration Matrix b for a 1/4 In. Type A Rosette with a 0.080 In. (2 mm) Hole*											
Hole Depth		Stress Depth									
In.	mm	0.002 0.05	0.004 0.10	0.006 0.15	0.008 0.20	0.010 0.25	0.012 0.30	0.014 0.35	0.016 0.40	0.018 0.45	0.020 In. 0.50 mm
0.002	0.05	-0.01264									
0.004	0.10	-0.01470	-0.01352								
0.006	0.15	-0.01658	-0.01554	-0.01414							
0.008	0.20	-0.01821	-0.01735	-0.01611	-0.01449						
0.010	0.25	-0.01967	-0.01897	-0.01789	-0.01642	-0.01468					
0.012	0.30	-0.02092	-0.02038	-0.01945	-0.01815	-0.01647	-0.01439				
0.014	0.35	-0.02197	-0.02159	-0.02083	-0.01968	-0.01815	-0.01624	-0.01395			
0.016	0.40	-0.02308	-0.02256	-0.02182	-0.02112	-0.01962	-0.01778	-0.01578	-0.01348		
0.018	0.45	-0.02400	-0.02351	-0.02280	-0.02202	-0.02072	-0.01917	-0.01735	-0.01525	-0.01289	-0.01216
0.020	0.50	-0.02481	-0.02434	-0.02366	-0.02273	-0.02167	-0.02031	-0.01888	-0.01678	-0.01460	-0.01216
0.022	0.55	-0.02554	-0.02507	-0.02440	-0.02335	-0.02235	-0.02103	-0.01961	-0.01769	-0.01550	-0.01366
0.024	0.60	-0.02616	-0.02571	-0.02506	-0.02428	-0.02305	-0.02177	-0.02045	-0.01860	-0.01715	-0.01522
0.026	0.65	-0.02668	-0.02625	-0.02561	-0.02487	-0.02364	-0.02239	-0.02109	-0.01940	-0.01813	-0.01623
0.028	0.70	-0.02715	-0.02673	-0.02611	-0.02536	-0.02417	-0.02294	-0.02164	-0.02012	-0.01896	-0.01708
0.030	0.75	-0.02753	-0.02713	-0.02653	-0.02582	-0.02463	-0.02341	-0.02213	-0.02064	-0.01911	-0.01757
0.032	0.80	-0.02789	-0.02749	-0.02689	-0.02620	-0.02502	-0.02382	-0.02256	-0.02106	-0.01968	-0.01807
0.034	0.85	-0.02821	-0.02781	-0.02722	-0.02652	-0.02536	-0.02417	-0.02292	-0.02146	-0.02007	-0.01850
0.036	0.90	-0.02849	-0.02809	-0.02750	-0.02682	-0.02565	-0.02447	-0.02324	-0.02176	-0.02041	-0.01885
0.038	0.95	-0.02871	-0.02832	-0.02774	-0.02706	-0.02591	-0.02473	-0.02350	-0.02204	-0.02067	-0.01916
0.040	1.00	-0.02889	-0.02851	-0.02794	-0.02727	-0.02612	-0.02495	-0.02373	-0.02227	-0.02089	-0.01940
Hole Depth		Stress Depth									
In.	mm	0.022 0.55	0.024 0.60	0.026 0.65	0.028 0.70	0.030 0.75	0.032 0.80	0.034 0.85	0.036 0.90	0.038 0.95	0.040 In. 1.00 mm
0.022	0.55	-0.01156									
0.024	0.60	-0.01310	-0.01081								
0.026	0.65	-0.01430	-0.01226	-0.01013							
0.028	0.70	-0.01531	-0.01345	-0.01149	-0.00944						
0.030	0.75	-0.01608	-0.01439	-0.01260	-0.01073	-0.00875					
0.032	0.80	-0.01652	-0.01511	-0.01344	-0.01172	-0.00995	-0.00812				
0.034	0.85	-0.01698	-0.01549	-0.01408	-0.01251	-0.01069	-0.00921	-0.00747			
0.036	0.90	-0.01739	-0.01590	-0.01441	-0.01312	-0.01159	-0.01004	-0.00847	-0.00688		
0.038	0.95	-0.01769	-0.01624	-0.01480	-0.01340	-0.01213	-0.01072	-0.00928	-0.00781	-0.00632	
0.040	1.00	-0.01796	-0.01655	-0.01511	-0.01367	-0.01240	-0.01121	-0.00989	-0.00858	-0.00719	-0.00581

* Data are for a 1/4 in. rosette. Multiply hole and stress depths by 0.5 for a 1/8 in. rosette, and by 2 for a 3/8 in. rosette.

Table 6(a) Hole-Drilling Calibration Matrix a for a 1/4 In. Type B Rosette with a 0.080 In. (2 mm) Hole											
		Stress Depth									
Hole Depth In.	mm	0.002 0.05	0.004 0.10	0.006 0.15	0.008 0.20	0.010 0.25	0.012 0.30	0.014 0.35	0.016 0.40	0.018 0.45	0.020 In. 0.50 mm
0.002	0.05	-0.00726									
0.004	0.10	-0.00878	-0.00766								
0.006	0.15	-0.01013	-0.00909	-0.00798							
0.008	0.20	-0.01139	-0.01037	-0.00924	-0.00793						
0.010	0.25	-0.01237	-0.01149	-0.01043	-0.00921	-0.00781					
0.012	0.30	-0.01325	-0.01245	-0.01147	-0.01039	-0.00901	-0.00751				
0.014	0.35	-0.01397	-0.01325	-0.01235	-0.01129	-0.01004	-0.00863	-0.00704			
0.016	0.40	-0.01471	-0.01388	-0.01297	-0.01214	-0.01088	-0.00956	-0.00811	-0.00654		
0.018	0.45	-0.01533	-0.01450	-0.01360	-0.01268	-0.01161	-0.01039	-0.00904	-0.00758	-0.00609	
0.020	0.50	-0.01587	-0.01504	-0.01414	-0.01313	-0.01217	-0.01105	-0.00981	-0.00845	-0.00696	-0.00536
0.022	0.55	-0.01634	-0.01550	-0.01460	-0.01367	-0.01257	-0.01147	-0.01046	-0.00909	-0.00774	-0.00633
0.024	0.60	-0.01672	-0.01589	-0.01500	-0.01405	-0.01299	-0.01190	-0.01082	-0.00944	-0.00809	-0.00678
0.026	0.65	-0.01705	-0.01621	-0.01532	-0.01441	-0.01332	-0.01225	-0.01118	-0.00967	-0.00832	-0.00704
0.028	0.70	-0.01735	-0.01651	-0.01561	-0.01468	-0.01362	-0.01255	-0.01148	-0.01031	-0.00921	-0.00810
0.030	0.75	-0.01759	-0.01675	-0.01586	-0.01493	-0.01387	-0.01280	-0.01174	-0.01059	-0.00945	-0.00840
0.032	0.80	-0.01781	-0.01697	-0.01607	-0.01515	-0.01408	-0.01302	-0.01196	-0.01080	-0.00974	-0.00860
0.034	0.85	-0.01799	-0.01715	-0.01625	-0.01533	-0.01426	-0.01320	-0.01213	-0.01099	-0.00992	-0.00881
0.036	0.90	-0.01814	-0.01730	-0.01640	-0.01550	-0.01441	-0.01334	-0.01229	-0.01114	-0.01008	-0.00897
0.038	0.95	-0.01829	-0.01744	-0.01654	-0.01561	-0.01454	-0.01347	-0.01242	-0.01129	-0.01021	-0.00912
0.040	1.00	-0.01843	-0.01757	-0.01666	-0.01573	-0.01465	-0.01358	-0.01253	-0.01140	-0.01035	-0.00925

Table 6(b) Hole-Drilling Calibration Matrix b for a 1/4 In. Type B Rosette with a 0.080 In. (2 mm) Hole											
		Stress Depth									
Hole Depth In.	mm	0.022 0.55	0.024 0.60	0.026 0.65	0.028 0.70	0.030 0.75	0.032 0.80	0.034 0.85	0.036 0.90	0.038 0.95	0.040 In. 1.00 mm
0.022	0.55	-0.00486									
0.024	0.60	-0.00572	-0.00430								
0.026	0.65	-0.00637	-0.00509	-0.00379							
0.028	0.70	-0.00691	-0.00571	-0.00460	-0.00327						
0.030	0.75	-0.00730	-0.00619	-0.00506	-0.00392	-0.00277					
0.032	0.80	-0.00753	-0.00655	-0.00549	-0.00443	-0.00339	-0.00234				
0.034	0.85	-0.00775	-0.00674	-0.00581	-0.00484	-0.00387	-0.00291	-0.00195			
0.036	0.90	-0.00793	-0.00695	-0.00598	-0.00514	-0.00423	-0.00333	-0.00246	-0.00162		
0.038	0.95	-0.00809	-0.00710	-0.00617	-0.00528	-0.00440	-0.00356	-0.00285	-0.00207	-0.00131	
0.040	1.00	-0.00822	-0.00724	-0.00632	-0.00541	-0.00466	-0.00389	-0.00314	-0.00242	-0.00172	-0.00104

Table 6(c) Hole-Drilling Calibration Matrix c for a 1/4 In. Type B Rosette with a 0.080 In. (2 mm) Hole											
		Stress Depth									
Hole Depth In.	mm	0.002 0.05	0.004 0.10	0.006 0.15	0.008 0.20	0.010 0.25	0.012 0.30	0.014 0.35	0.016 0.40	0.018 0.45	0.020 In. 0.50 mm
0.002	0.05	-0.01417									
0.004	0.10	-0.01853	-0.01516								
0.006	0.15	-0.01886	-0.01748	-0.01595							
0.008	0.20	-0.02055	-0.01953	-0.01810	-0.01624						
0.010	0.25	-0.02222	-0.02138	-0.02012	-0.01844	-0.01634					
0.012	0.30	-0.02365	-0.02299	-0.02190	-0.02040	-0.01848	-0.01614				
0.014	0.35	-0.02485	-0.02437	-0.02346	-0.02214	-0.02039	-0.01823	-0.01584			
0.016	0.40	-0.02610	-0.02547	-0.02469	-0.02375	-0.02195	-0.01997	-0.01789	-0.01510		
0.018	0.45	-0.02715	-0.02656	-0.02571	-0.02479	-0.02331	-0.02154	-0.01947	-0.01709	-0.01440	
0.020	0.50	-0.02806	-0.02750	-0.02670	-0.02561	-0.02440	-0.02283	-0.02097	-0.01879	-0.01631	-0.01353
0.022	0.55	-0.02888	-0.02833	-0.02755	-0.02664	-0.02517	-0.02365	-0.02225	-0.02008	-0.01787	-0.01546
0.024	0.60	-0.02958	-0.02906	-0.02830	-0.02740	-0.02598	-0.02450	-0.02298	-0.02119	-0.01919	-0.01699
0.026	0.65	-0.03019	-0.02968	-0.02894	-0.02808	-0.02666	-0.02521	-0.02370	-0.02186	-0.02036	-0.01816
0.028	0.70	-0.03072	-0.03023	-0.02950	-0.02864	-0.02727	-0.02584	-0.02435	-0.02257	-0.02089	-0.01910
0.030	0.75	-0.03116	-0.03068	-0.02998	-0.02914	-0.02778	-0.02638	-0.02491	-0.02316	-0.02139	-0.01978
0.032	0.80	-0.03158	-0.03108	-0.03038	-0.02956	-0.02822	-0.02684	-0.02539	-0.02366	-0.02202	-0.02022
0.034	0.85	-0.03192	-0.03143	-0.03073	-0.02990	-0.02859	-0.02723	-0.02580	-0.02410	-0.02247	-0.02071
0.036	0.90	-0.03221	-0.03173	-0.03104	-0.03022	-0.02891	-0.02756	-0.02616	-0.02444	-0.02287	-0.02112
0.038	0.95	-0.03247	-0.03200	-0.03131	-0.03048	-0.02919	-0.02785	-0.02645	-0.02475	-0.02317	-0.02146
0.040	1.00	-0.03268	-0.03222	-0.03154	-0.03074	-0.02944	-0.02810	-0.02671	-0.02501	-0.02342	-0.02173

Table 6(d) Hole-Drilling Calibration Matrix d for a 1/4 In. Type B Rosette with a 0.080 In. (2 mm) Hole											
		Stress Depth									
Hole Depth In.	mm	0.022 0.55	0.024 0.60	0.026 0.65	0.028 0.70	0.030 0.75	0.032 0.80	0.034 0.85	0.036 0.90	0.038 0.95	0.040 In. 1.00 mm
0.022	0.22	-0.01285									
0.024	0.24	-0.01480	-0.01202								
0.026	0.26	-0.01596	-0.01367	-0.01126							
0.028	0.28	-0.01710	-0.01490	-0.01278	-0.01046						
0.030	0.30	-0.01795	-0.01603	-0.01401	-0.01188	-0.00964					

0.032	0.32	-0.01846	-0.01685	-0.01493	-0.01299	-0.01100	-0.00896				
0.034	0.34	-0.01899	-0.01729	-0.01567	-0.01390	-0.01207	-0.01019	-0.00825			
0.036	0.36	-0.01942	-0.01779	-0.01609	-0.01459	-0.01288	-0.01115	-0.00940	-0.00762		
0.038	0.38	-0.01979	-0.01817	-0.01650	-0.01493	-0.01349	-0.01191	-0.01030	-0.00866	-0.00700	
0.040	0.40	-0.02008	-0.01848	-0.01684	-0.01521	-0.01389	-0.01245	-0.01095	-0.00949	-0.00796	-0.00641

Anexo II

Tabla de recomendaciones para diámetros de orificios y secuencias de perforado según el espesor de la muestra y el tipo de roseta utilizada

Tabla II.1 Espesores de muestras recomendados, diámetros de orificio y profundidad de pasos. ⁽¹⁸⁾

Rosette Type	D	Max. thickness of a "Thin" workpiece	Min. thickness of a "Thick" workpiece	Uniform Stresses			Non-Uniform Stresses		
				Min. hole diameter	Max. hole diameter	Practical depth steps ^B	Min. hole diameter	Max. hole diameter	Practical depth steps ^B
Type A									
Conceptual	D	0.4 D	1.2 D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.05 D	Min D ₀	Max D ₀	0.01 D
1/2 in. nominal	0.101 (2.57)	0.040 (1.03)	0.121 (3.08)	0.024 (0.61)	0.040 (1.01)	0.005 (0.25)	0.037 (0.93)	0.040 (1.00)	0.001 (0.025)
1/8 in. nominal	0.202 (5.13)	0.081 (2.06)	0.242 (6.17)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.010 (0.25)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)
1/16 in. nominal	0.404 (10.26)	0.162 (4.11)	0.485 (12.34)	0.132 (3.35)	0.220 (5.59)	0.020 (0.50)	0.150 (3.75)	0.170 (4.25)	0.004 (0.10)
Type B									
Conceptual	D	0.4 D	1.2 D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.05 D	Min D ₀	Max D ₀	0.01D
1/8 in. nominal	0.202 (5.13)	0.081 (2.06)	0.242 (6.17)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.010 (0.25)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)
Type C									
Conceptual	D	0.48 D	1.44 D	0.6 Max D ₀	Max D ₀	0.0575 D	Min D ₀	Max D ₀	0.0115 D
1/8 in. nominal	0.170 (4.32)	0.082 (2.07)	0.245 (6.22)	0.060 (1.52)	0.100 (2.54)	0.010 (0.25)	0.075 (1.88)	0.085 (2.12)	0.002 (0.05)

^A Dimensions are in inches (mm).

Anexo III

Tablas de resultados en pruebas realizadas en muestras sin proceso, enderezada y nivelada.

Muestra #12 (Punta de Rollo) Obtenida directamente de la punta del Rollo, sin proceso posterior al rolado en caliente.

- Prueba #27 Acero Grado 050 (Prueba en línea central a lo ancho)

III.1 Datos obtenidos en prueba #27 Hole Drilling (M12)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	4.186	7.298	4.07	-45.523	-174.505	-57.789
0.075	19.321	35.23	17.028	-47.303	-573.581	-117.294
0.125	30.052	56.684	23.576	-50.211	-317.973	28.784
0.175	34.507	67.16	24.4	-53.927	-53.064	93.803
0.225	35.121	70.175	23.253	70.088	73.507	87.946
0.275	34.369	69.969	22.359	40.018	35.82	116.22
0.325	33.586	69.159	22.123	38.182	7.647	97.786
0.375	33.133	68.702	22.126	38.36	0.898	69.719
0.425	32.905	68.603	21.997	40.366	7.761	52.928
0.475	32.732	68.587	21.728	42.481	12.349	45.273
0.525	32.547	68.471	21.548	41.04	7.939	41.976
0.575	32.378	68.241	21.646	38.201	-4.109	36.776
0.625	32.268	67.971	21.998	36.625	-14.21	31.069
0.675	32.219	67.728	22.385	36.968	-16.515	24.628
0.725	32.184	67.517	22.562	39.904	-6.478	22.706
0.775	32.107	67.304	22.441	47.747	12.929	30.414
0.825	31.974	67.064	22.156	56.086	21.094	32.516
0.875	31.826	66.818	21.97	45.674	15.314	28.212
0.925	31.742	66.632	22.078	35.409	-12.471	11.826

0.975	31.781	66.57	22.449	33.556	-33.344	1.384
--------------	--------	-------	--------	--------	---------	-------

- Prueba #28 Sin Proceso Acero Grado 050 (Prueba en línea central a lo ancho)

III.2 Datos obtenidos en prueba #28 Hole Drilling (M12)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	-0.697	0.726	-0.741	-45.44	-6.985	51.35
0.075	-0.65	-0.051	-0.3	40.417	-34.424	12.415
0.125	-0.452	-1.06	0.655	38.803	-46.983	11.699
0.175	-0.33	-2.202	1.763	37.442	-44.076	12.54
0.225	-0.339	-3.529	2.833	37.067	-38.481	15.475
0.275	-0.49	-5.005	3.783	36.947	-32.112	18.085
0.325	-0.806	-6.556	4.593	36.177	-25.009	20.098
0.375	-1.322	-8.137	5.276	34.269	-17.962	22.291
0.425	-2.066	-9.754	5.855	31.402	-11.64	25.653
0.475	-3.034	-11.429	6.354	28.632	-6.791	30.205
0.525	-4.179	-13.153	6.789	26.739	-3.032	34.921
0.575	-5.414	-14.872	7.17	25.674	-0.44	37.729
0.625	-6.637	-16.498	7.496	24.885	2.004	37.824
0.675	-7.763	-17.951	7.767	24.165	3.803	34.79
0.725	-8.743	-19.198	7.979	23.575	5.273	30.11
0.775	-9.583	-20.273	8.132	23.958	6.899	26.833
0.825	-10.335	-21.254	8.228	26.032	8.757	27.272
0.875	-11.072	-22.221	8.277	27.542	13.154	34.069
0.925	-11.859	-23.207	8.292	26.288	21.832	46.956
0.975	-12.719	-24.175	8.29	21.251	38.223	65.597

- Prueba #29 Sin Proceso Acero Grado 050 (Prueba en línea central a lo ancho)

III.3 Datos obtenidos en prueba #29 Hole Drilling (M12)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.963	2.989	2.273	-39.951	-80.349	-45.847
0.075	2.99	5.542	4.072	-35.108	-46.791	-8.383
0.125	3.862	8.15	5.787	-35.829	-39.509	-1.31
0.175	4.627	10.745	7.458	-35.57	-34.838	0.887
0.225	5.175	13.188	9.059	-33.554	-29.434	3.796
0.275	5.449	15.435	10.582	-30.713	-24.593	7.468
0.325	5.479	17.529	12.05	-28.54	-22.13	10.546
0.375	5.337	19.533	13.481	-27.598	-21.48	12.698
0.425	5.081	21.468	14.867	-27.454	-21.519	13.985
0.475	4.731	23.298	16.173	-27.4	-20.57	15.435
0.525	4.279	24.949	17.359	-26.79	-17.902	17.218
0.575	3.715	26.358	18.397	-25.303	-13.155	19.975
0.625	3.044	27.495	19.286	-22.744	-7.538	22.947
0.675	2.287	28.374	20.046	-19.47	-2.423	25.786
0.725	1.47	29.033	20.701	-16.083	1.386	28.086
0.775	0.609	29.514	21.265	-13.41	5.702	31.921
0.825	-0.296	29.847	21.74	-11.798	10.564	37.181
0.875	-1.242	30.051	22.128	-10.854	17.575	45.173
0.925	-2.209	30.149	22.447	-9.743	24.349	52.89
0.975	-3.152	30.177	22.732	-7.457	32.501	61.156

- Prueba #30 Sin Proceso Acero Grado 050 (Prueba en línea central a lo ancho)

III.4 Datos obtenidos en prueba #30 Hole Drilling (M12)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	7.274	46.252	41.4	-26.048	-1359.206	-197.267
0.075	8.767	50.327	44.534	69.148	26.25	119.123
0.125	9.914	54.132	47.33	71.575	22.734	81.109
0.175	11.644	61.249	52.879	-39.905	-37.579	2.873
0.225	13.686	68.401	58.114	-44.476	-47.426	-3.224
0.275	15.692	74.053	61.656	-67.908	-21.288	12.671
0.325	17.53	78.678	64.052	-77.053	-13.078	24.946
0.375	19.232	83.155	66.286	-69.777	-16.148	19.717
0.425	20.872	87.785	68.808	-57.196	-29.41	5.158
0.475	22.476	92.274	71.465	-51.092	-35.809	-5.003
0.525	24.007	96.195	73.892	-55.801	-33.74	-14.111
0.575	25.394	99.387	75.891	-74.785	-22.676	-10.531
0.625	26.574	102.035	77.544	-84.125	-18.49	-7.913
0.675	27.534	104.479	79.079	-54.413	-17.754	-6.83
0.725	28.317	106.954	80.663	-37.869	-36.839	-11.995
0.775	29.008	109.464	82.294	-34.841	-51.308	-14.342
0.825	29.695	111.845	83.842	-35.932	-58.04	-21.693
0.875	30.433	113.954	85.188	-40.21	-56.459	-28.334
0.925	31.217	115.799	86.336	-51.231	-56.716	-37.645
0.975	31.987	117.533	87.402	-58.549	-54.142	-36.549

Muestra #14 (Inicio de Rollo) con proceso de enderezado (pre-nivelado)

- Prueba #46 Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

III.5 Datos obtenidos en prueba #46 Hole Drilling (M14)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.415	2.352	1.296	-69.227	-67.489	-39.344
0.075	2.091	1.56	1.818	31.12	-11.908	26.027
0.125	1.057	0.386	2.243	23.756	-3.066	33.063
0.175	-0.301	-0.863	2.598	18.633	1.285	32.516
0.225	-2.199	-2.495	2.703	16.099	8.862	40.463
0.275	-4.816	-4.687	2.455	14.301	19.477	54.065
0.325	-8.077	-7.339	1.894	12.165	28.999	66.266
0.375	-11.693	-10.182	1.174	9.998	33.951	72.12
0.425	-15.311	-12.937	0.475	8.372	33.155	70.144
0.475	-18.659	-15.421	-0.073	7.789	27.747	62.341
0.525	-21.627	-17.583	-0.423	8.208	20.556	52.659
0.575	-24.258	-19.477	-0.611	9.135	15.294	45.851
0.625	-26.67	-21.21	-0.722	9.849	14.385	44.441
0.675	-28.967	-22.873	-0.84	10.346	18.559	48.707
0.725	-31.171	-24.507	-1.013	11.449	23.744	53.498
0.775	-33.215	-26.092	-1.228	14.182	28.205	56.758
0.825	-35.001	-27.566	-1.427	18.89	24.803	52.203
0.875	-36.473	-28.861	-1.535	23.496	13.569	41.004
0.925	-37.678	-29.944	-1.5	24.135	-0.472	28.01
0.975	-38.757	-30.832	-1.325	18.572	-2.472	27.659

- Prueba #48 Acero Grado 050 (Prueba centro de hoja)

III.6 Datos obtenidos en prueba #48 Hole Drilling (M14)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	7.165	6.005	4.066	-82.958	-171.6	-117.76
0.075	7.904	4.958	4.485	43.677	-13.767	38.666
0.125	7.268	2.568	4.3	38.316	2.449	57.311
0.175	6.643	0.504	4.011	38.211	5.695	41.872
0.225	5.79	-1.725	3.442	38.953	10.059	40.23
0.275	4.317	-4.833	2.51	38.382	13.788	54.17
0.325	2.263	-8.815	1.34	37.694	14.434	67.525
0.375	0.03	-13.002	0.132	37.277	14.226	68.398
0.425	-1.978	-16.671	-1.002	37.109	15.185	56.055
0.475	-3.691	-19.669	-2.099	37.342	18.831	43.61
0.525	-5.459	-22.633	-3.307	37.733	24.1	48.267
0.575	-7.882	-26.682	-4.8	37.453	32.2	84.76
0.625	-11.477	-32.784	-6.698	37.146	43.329	151.008
0.675	-16.373	-41.128	-9.048	36.954	62.478	230.894
0.725	-22.207	-50.906	-11.837	36.818	90.178	292.822
0.775	-28.265	-60.615	-15.025	36.741	132.581	316.895
0.825	-33.798	-68.775	-18.553	36.901	180.246	291.041
0.875	-38.328	-74.627	-22.292	45.687	222.408	233.494
0.925	-41.78	-78.42	-25.991	-56.606	167.341	237.35
0.975	-44.354	-81.057	-29.267	-57.654	138.3	223.876

- Prueba #47 Acero Grado 050 (Prueba lado transmisión)

III.7 Datos obtenidos en prueba #47 Hole Drilling (M14)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.176	2.797	2.283	-42.313	-64.48	-46.017
0.075	1.982	1.909	2.398	40.557	-3.199	25.089
0.125	0.887	0.059	1.739	39.149	12.88	39.743
0.175	-0.573	-1.982	0.848	35.715	17.721	38.32
0.225	-2.341	-4.254	-0.149	32.288	18.777	39.012
0.275	-4.484	-6.932	-1.26	30.851	19.867	44.393
0.325	-6.984	-10.027	-2.461	30.331	20.917	50.762
0.375	-9.707	-13.384	-3.682	29.995	21.189	54.902
0.425	-12.481	-16.804	-4.847	29.809	20.37	55.772
0.475	-15.186	-20.159	-5.928	29.948	19.355	55.04
0.525	-17.794	-23.422	-6.956	30.332	19.488	54.98
0.575	-20.346	-26.621	-7.982	30.563	22.38	57.795
0.625	-22.884	-29.765	-9.023	30.121	27.061	62.474
0.675	-25.396	-32.8	-10.031	28.787	31.827	67.198
0.725	-27.807	-35.627	-10.916	26.897	31.566	66.809
0.775	-30.026	-38.171	-11.605	25.306	27.96	63.348
0.825	-32.015	-40.44	-12.105	25.062	21.847	57.974
0.875	-33.826	-42.55	-12.524	26.473	22.823	60.405
0.925	-35.574	-44.655	-13.018	28.928	38.779	78.425
0.975	-37.354	-46.845	-13.683	31.078	78.708	120.124

Muestra #4 (Inicio de Rollo) con proceso de enderezado (pre-nivelado)

- Prueba #17 Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

III.8 Datos obtenidos en prueba #17 Hole Drilling (M4)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.431	4.22	2.489	-38.413	-77.472	-9.851
0.075	1.072	6.068	3.696	-28.466	-18.11	16.45
0.125	0.875	7.766	4.521	-34.875	-12.033	13.256
0.175	0.662	9.464	5.151	-38.369	-10.577	14.117
0.225	0.208	11.078	5.646	-37.373	-8.312	17.643
0.275	-0.374	12.679	6.056	-37.337	-7.723	19.381
0.325	-0.845	14.37	6.407	-39.939	-9.64	17.945
0.375	-1.079	16.135	6.668	-44.165	-11.68	15.342
0.425	-1.132	17.822	6.774	-48.592	-11.307	13.833
0.475	-1.142	19.244	6.673	-52.582	-7.308	14.39
0.525	-1.205	20.296	6.371	-57.129	-1.391	15.558
0.575	-1.292	21.003	5.932	-64.665	3.267	15.751
0.625	-1.288	21.485	5.45	-78.519	2.815	13.329
0.675	-1.076	21.851	4.986	87.936	-3.162	9.561
0.725	-0.641	22.121	4.529	79.92	-11.266	6.427
0.775	-0.079	22.203	3.987	75.117	-14.156	9.83
0.825	0.456	21.966	3.23	71.999	-7.913	23.08
0.875	0.867	21.345	2.165	70.622	7.713	46.206
0.925	1.181	20.409	0.801	70.984	24.501	70.59
0.975	1.519	19.343	-0.732	72.286	34.945	88.124

- Prueba #14 Acero Grado 050 (Prueba 1/4 lado operador)

III.9 Datos obtenidos en prueba #14 Hole Drilling (M4)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.49	5.451	12.872	15.1	-247.473	-97.678
0.075	4.836	6.396	15.927	40.437	-22.49	-0.927
0.125	5.604	7.242	17.89	78.643	1.842	3.555
0.175	6.255	8.45	20.662	3.732	-13.513	-2.1
0.225	6.848	9.555	23.946	14.808	-24.558	-3.825
0.275	7.299	10.25	27.144	21.828	-25.255	-0.475
0.325	7.521	10.572	29.944	24.325	-20.209	3.562
0.375	7.486	10.753	32.325	20.72	-12.42	6.372
0.425	7.238	11.031	34.402	7.481	-7.19	7.185
0.475	6.88	11.535	36.288	-9.546	-6.514	8.487
0.525	6.524	12.258	38.036	-19.491	-9.628	7.855
0.575	6.247	13.098	39.641	-23.879	-11.44	6.356
0.625	6.059	13.911	41.074	-25.266	-11.759	3.499
0.675	5.902	14.569	42.309	-22.178	-8.854	2.553
0.725	5.681	14.992	43.349	-11.341	-5.427	3.448
0.775	5.318	15.174	44.232	1.404	-0.65	9.648
0.825	4.803	15.175	45.021	6.31	1.984	16.014
0.875	4.21	15.109	45.796	6.954	0.429	18.356
0.925	3.673	15.101	46.629	6.277	-9.789	10.035
0.975	3.312	15.23	47.553	5.599	-24.539	-5.875

- Prueba #13 Acero Grado 050 (Prueba en centro de muestra)

III.10 Datos obtenidos en prueba #13 Hole Drilling (M4)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.803	5.977	2.356	-52.014	-113.813	-25.457
0.075	5.651	9.347	5.747	-9.536	-55.035	-29.545
0.125	6.836	12.173	8.768	-8.784	-37.354	-12.896
0.175	7.85	15.023	11.499	-18.582	-30.261	-7.18
0.225	8.768	17.934	14.206	-21.621	-29.455	-5.583
0.275	9.519	20.808	16.96	-20.338	-29.357	-4.491
0.325	10.059	23.555	19.708	-18.57	-28.798	-2.996
0.375	10.419	26.118	22.405	-16.328	-27.766	-2.02
0.425	10.676	28.45	25.068	-12.138	-27.718	-3.22
0.475	10.89	30.506	27.727	-4.858	-29.164	-5.728
0.525	11.054	32.231	30.351	3.727	-31.436	-7.287
0.575	11.093	33.577	32.815	9.667	-30.511	-4.693
0.625	10.91	34.515	34.941	12.153	-23.405	2.632
0.675	10.446	35.046	36.603	12.024	-10.579	13.657
0.725	9.727	35.21	37.813	11.975	2.834	25.207
0.775	8.86	35.072	38.747	15.391	9.202	32.764
0.825	7.985	34.713	39.654	21.246	1.218	32.021
0.875	7.192	34.214	40.712	25.11	-18.45	24.37
0.925	6.468	33.634	41.892	26.345	-35.287	17.445
0.975	5.707	33.009	42.96	25.434	-22.055	29.799

- Prueba #16 Acero Grado 050 (Prueba ¼ lado transmisión)

III.11 Datos obtenidos en prueba #16 Hole Drilling (M4)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	-2.852	3.656	-1.284	-41.101	-39.882	136.326
0.075	0.005	8.702	0.078	-56.431	-85.784	-22.952
0.125	3.995	14.952	1.793	-57.901	-93.16	-23.75
0.175	8.291	21.893	3.46	-56.608	-90.787	-13.64
0.225	12.937	29.286	5.185	-56.613	-90.291	-12.119
0.275	17.918	37.147	7.03	-56.369	-93.574	-13.16
0.325	23.049	45.537	8.91	-55.116	-98.804	-9.412
0.375	28.107	54.397	10.673	-53.66	-103.514	-0.536
0.425	32.938	63.504	12.202	-52.677	-105.807	9.709
0.475	37.478	72.519	13.453	-52.344	-104.921	17.044
0.525	41.709	81.105	14.435	-52.574	-100.316	19.943
0.575	45.62	89.019	15.162	-53.193	-93.573	19.686
0.625	49.185	96.172	15.635	-53.952	-85.055	20.371
0.675	52.392	102.627	15.844	-54.525	-78.384	23.394
0.725	55.268	108.537	15.803	-54.736	-72.854	30.552
0.775	57.889	114.072	15.579	-54.695	-73.599	35.523
0.825	60.352	119.341	15.283	-54.648	-80.049	34.894
0.875	62.722	124.353	15.023	-54.687	-91.582	25.745
0.925	64.985	129.021	14.846	-54.88	-101.31	12.211
0.975	67.046	133.206	14.693	-55.213	-102.014	2.11

Muestra #3 (Inicio de Rollo) con proceso de Nivelado de precisión

- Prueba #11 Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

III.12 Datos obtenidos en prueba #11 Hole Drilling (M3)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	-0.718	0.864	-0.709	-44.917	-7.34	40.289
0.075	-2.755	-2.799	-2.668	44.432	13.207	66.303
0.125	-4.871	-6.591	-5.134	48.546	19.095	58.015
0.175	-7.046	-10.369	-7.831	51.141	21.848	51.451
0.225	-9.353	-14.423	-10.65	50.141	21.213	51.564
0.275	-11.734	-18.651	-13.515	49.247	20.766	51.716
0.325	-14.092	-22.816	-16.343	49.218	21.232	49.664
0.375	-16.395	-26.857	-19.063	48.635	21.09	47.811
0.425	-18.688	-30.93	-21.635	46.418	19.632	49.658
0.475	-21.035	-35.227	-24.051	43.993	17.057	55.905
0.525	-23.449	-39.767	-26.319	42.466	15.304	63.708
0.575	-25.87	-44.337	-28.444	41.61	15.97	68.375
0.625	-28.2	-48.612	-30.418	40.955	19.404	67.021
0.675	-30.357	-52.36	-32.229	40.147	24.99	61.727
0.725	-32.329	-55.588	-33.875	38.886	29.245	56.239
0.775	-34.168	-58.518	-35.379	38.106	32.7	58.043
0.825	-35.939	-61.405	-36.78	38.806	35.167	67.902
0.875	-37.656	-64.314	-38.111	39.73	39.497	81.258
0.925	-39.262	-67.048	-39.367	40.215	45.511	87.036
0.975	-40.674	-69.296	-40.495	39.08	54.907	81.458

- Prueba #09 Acero Grado 050 (Prueba a ¼ de lado operador)

III.13 Datos obtenidos en prueba #09 Hole Drilling (M3)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.171	1.196	1.179	-39.445	-31.829	-31.085
0.075	0.092	-0.41	0.81	34.086	8.292	39.081
0.125	-1.87	-2.456	-0.366	23.073	31.165	46.425
0.175	-2.928	-3.585	-0.622	22.814	3.929	17.379
0.225	-3.675	-4.567	-0.412	28.126	-9.251	10.298
0.275	-5.04	-6.285	-0.681	29.783	3.761	27.737
0.325	-6.955	-8.615	-1.527	31.042	18.392	41.968
0.375	-8.733	-10.835	-2.389	32.842	16.666	36.981
0.425	-10.015	-12.533	-2.877	33.516	4.632	21.596
0.475	-11.092	-13.949	-3.163	31.11	0.761	16.143
0.525	-12.419	-15.535	-3.649	27.774	12.14	27.519
0.575	-14.026	-17.322	-4.433	24.981	27.166	40.985
0.625	-15.481	-18.776	-5.183	7.784	27.113	34.46
0.675	-16.392	-19.274	-5.503	-36.007	-1.775	16.071
0.725	-16.774	-18.689	-5.31	-40.644	-40.93	0.488
0.775	-16.852	-17.481	-4.818	-41.173	-61.764	-7.366
0.825	-16.7	-16.269	-4.279	-42.966	-62.515	-18.815
0.875	-16.383	-15.406	-3.888	-51.499	-49.777	-27.196
0.925	-16.233	-14.86	-3.651	-50.842	-23.665	-9.558
0.975	-16.135	-14.186	-2.908	-13.399	-73.083	-52.335

- Prueba #09 Acero Grado 050 (Prueba centro de muestra)

III.14 Datos obtenidos en prueba #09 Hole Drilling (M3)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	0.788	0.034	-0.974	-85.898	-12.022	16.583
0.075	0.654	-0.925	-0.983	38.835	-12.528	14.971
0.125	0.452	-2.242	-1.25	43.225	-9.189	18.439
0.175	0.085	-3.709	-1.821	45.949	-1.56	19.861
0.225	-0.55	-5.251	-2.519	42.97	4.498	20.583
0.275	-1.379	-6.832	-3.225	37.886	6.907	20.817
0.325	-2.254	-8.421	-3.895	36.603	6.324	20.335
0.375	-3.075	-9.983	-4.512	38.058	4.31	19.17
0.425	-3.834	-11.491	-5.059	38.703	2.672	18.111
0.475	-4.591	-12.932	-5.527	36.602	2.394	17.789
0.525	-5.418	-14.312	-5.922	31.829	3.83	18.923
0.575	-6.346	-15.651	-6.274	26.775	6.313	21.538
0.625	-7.348	-16.963	-6.617	23.934	9.229	24.709
0.675	-8.354	-18.234	-6.968	23.87	11.685	26.829
0.725	-9.285	-19.392	-7.302	23.864	12.182	25.684
0.775	-10.088	-20.313	-7.554	16.684	10.176	20.343
0.825	-10.743	-20.846	-7.633	-10.9	1.308	11.936
0.875	-11.261	-20.874	-7.465	-27.088	-18.268	5.003
0.925	-11.659	-20.382	-7.033	-31.249	-43.453	-2.822
0.975	-11.944	-19.495	-6.392	-32.44	-68.698	-14.951

- Prueba #07 Acero Grado 050 (Prueba a ¼ de lado transmisión)

III.15 Datos obtenidos en prueba #07 Hole Drilling (M3)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	-2.338	-3.392	-3.009	57.521	55.081	81.584
0.075	-3.391	-6.145	-4.66	50.428	-0.62	39.888
0.125	-4.681	-8.994	-6.609	52.324	8.969	37.951
0.175	-6.148	-12.029	-8.597	49.742	10.29	37.638
0.225	-7.682	-15.362	-10.424	45.796	4.388	39.053
0.275	-9.336	-19.083	-12.183	44.009	0.938	43.603
0.325	-11.17	-23.146	-14.048	43.738	3.674	49.855
0.375	-13.135	-27.36	-16.082	44.395	9.421	53.968
0.425	-15.077	-31.471	-18.207	45.848	14.212	54.061
0.475	-16.837	-35.281	-20.292	47.997	15.244	50.144
0.525	-18.341	-38.714	-22.248	50.345	14.055	45.21
0.575	-19.64	-41.822	-24.072	52.057	13.214	42.096
0.625	-20.869	-44.721	-25.824	52.484	16.994	44.018
0.675	-22.172	-47.512	-27.565	51.328	26.593	51.368
0.725	-23.622	-50.231	-29.31	48.503	39.898	61.54
0.775	-25.193	-52.835	-31.012	43.973	52.631	70.786
0.825	-26.781	-55.232	-32.593	38.291	59.717	74.677
0.875	-28.257	-57.323	-33.978	32.213	58.717	70.574
0.925	-29.52	-59.03	-35.114	22.875	48.998	57.109
0.975	-30.525	-60.296	-35.972	-7.464	33.14	39.254

Anexo IV

Resultados obtenidos en pruebas Hole Drilling para hoja calibre 3/8" Nivelada

Muestra 6 (Inicio de rollo) Nivelada

Prueba #37 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

Tabla IV.1 de Datos obtenidos en prueba #37 Hole Drilling

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.283	1.055	1.909	50.089	-63.995	-32.24
0.075	2.121	-1.627	0.99	50.009	-7.635	48.111
0.125	0.329	-5.636	-1.399	49.254	27.264	67.398
0.175	-2.125	-10.131	-4.26	47.429	34.632	67.596
0.225	-4.662	-14.938	-7.297	48.205	30.059	65.321
0.275	-7.117	-20.018	-10.573	50.903	26.617	65.518
0.325	-9.517	-25.24	-14.127	53.826	27.468	66.765
0.375	-11.867	-30.371	-17.814	56.193	30.045	66.128
0.425	-14.081	-35.183	-21.369	57.364	30.076	61.854
0.475	-16.024	-39.563	-24.576	56.96	25.277	54.962
0.525	-17.615	-43.549	-27.389	56.07	17.196	48.441
0.575	-18.889	-47.293	-29.948	56.061	11.117	46.933
0.625	-19.988	-50.963	-32.466	57.067	11.364	52.038
0.675	-21.08	-54.642	-35.085	58.325	20.422	63.734
0.725	-22.254	-58.278	-37.776	59.142	32.253	74.594
0.775	-23.461	-61.712	-40.36	58.914	41.069	79.863
0.825	-24.541	-64.771	-42.624	57.663	36.907	72.447
0.875	-25.323	-67.365	-44.468	56.942	19.704	54.974
0.925	-25.752	-69.55	-45.988	58.64	-0.178	37.751
0.975	-25.96	-71.491	-47.414	62.536	3.371	44.364

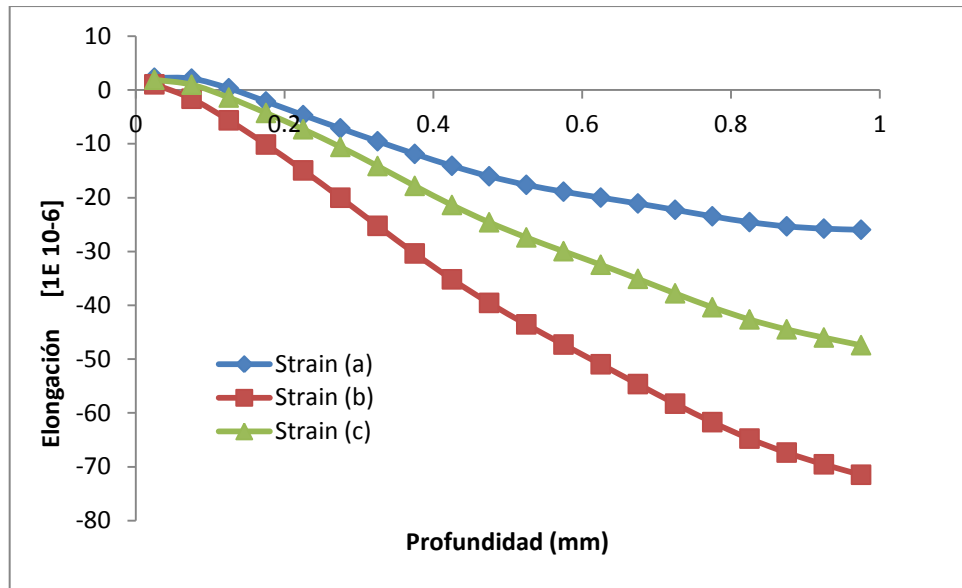


Figura IV. 1 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba 37)

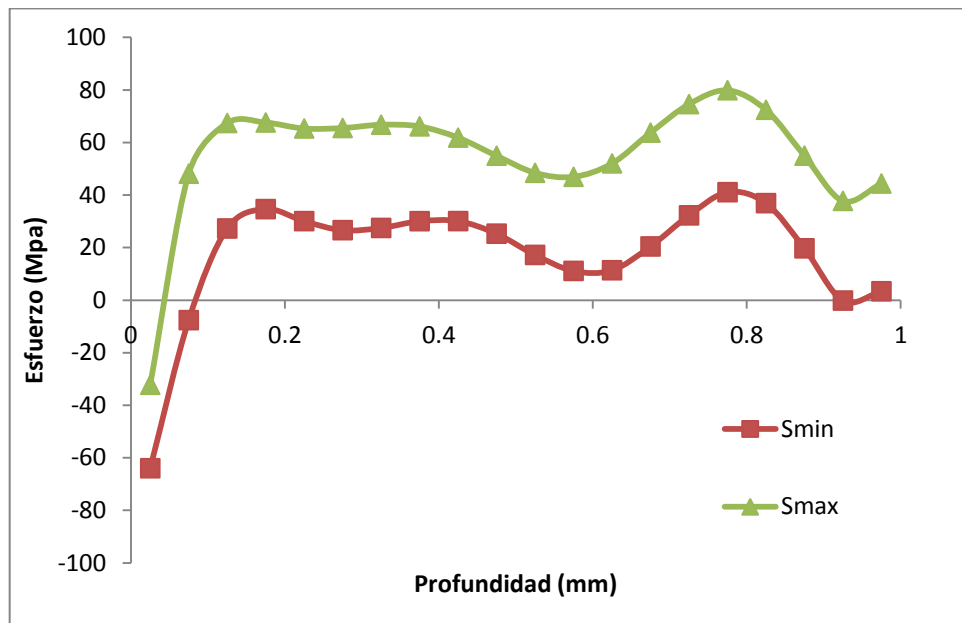


Figura IV. 2 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba 37)

Prueba #38 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba Centro de hoja)

Tabla IV.2 Datos obtenidos en prueba #38 Hole Drilling

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.004	1.679	2.889	46.304	-91.305	-51.16
0.075	2.938	0.057	2.412	49.831	1.93	36.117
0.125	2.112	-2.382	1.079	50.993	16.809	45.995
0.175	1.102	-5.069	-0.456	50.841	16.08	43.389
0.225	-0.097	-8.036	-2.171	50.079	15.921	43.585
0.275	-1.575	-11.392	-4.151	49.295	18.867	48.107
0.325	-3.328	-15.131	-6.391	48.716	22.284	53.735
0.375	-5.24	-19.114	-8.777	48.323	24.123	57.644
0.425	-7.15	-23.13	-11.138	48	23.008	57.929
0.475	-8.913	-26.975	-13.314	47.647	19.211	54.681
0.525	-10.449	-30.511	-15.21	47.175	13.684	48.602
0.575	-11.761	-33.687	-16.811	46.542	9.086	42.6
0.625	-12.914	-36.535	-18.176	45.711	6.917	38.312
0.675	-14.003	-39.136	-19.401	44.768	9.708	38.815
0.725	-15.112	-41.585	-20.583	43.852	15.877	42.774
0.775	-16.284	-43.948	-21.786	43.257	26.841	52.118
0.825	-17.499	-46.247	-23.019	43.319	37.641	62.26
0.875	-18.689	-48.448	-24.238	44.13	45.019	70.164
0.925	-19.757	-50.487	-25.367	45.454	43.452	70.011
0.975	-20.618	-52.294	-26.328	46.783	37.09	65.156

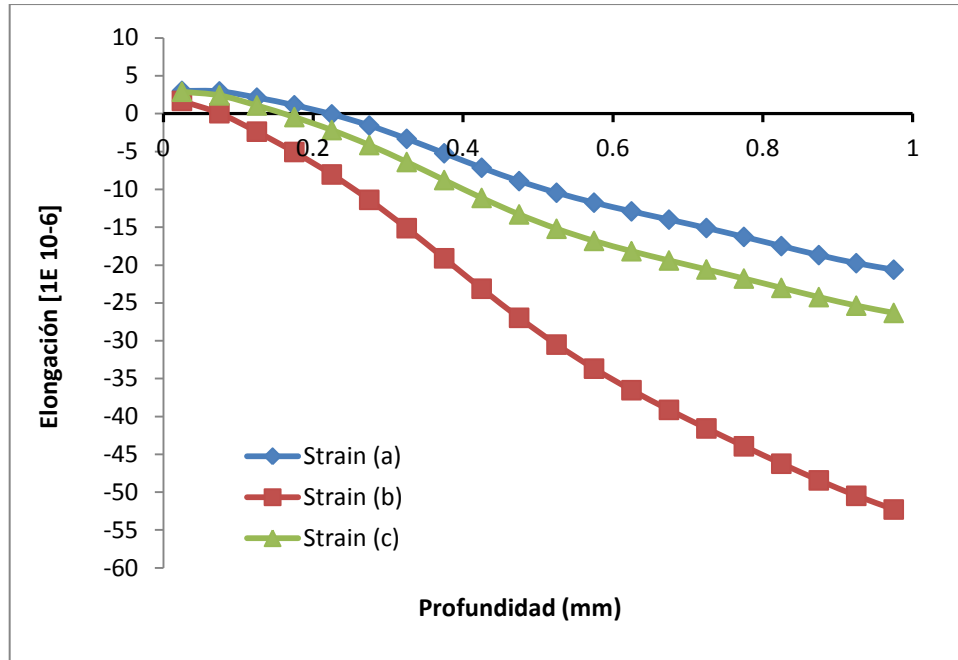


Figura IV. 3 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba 38)

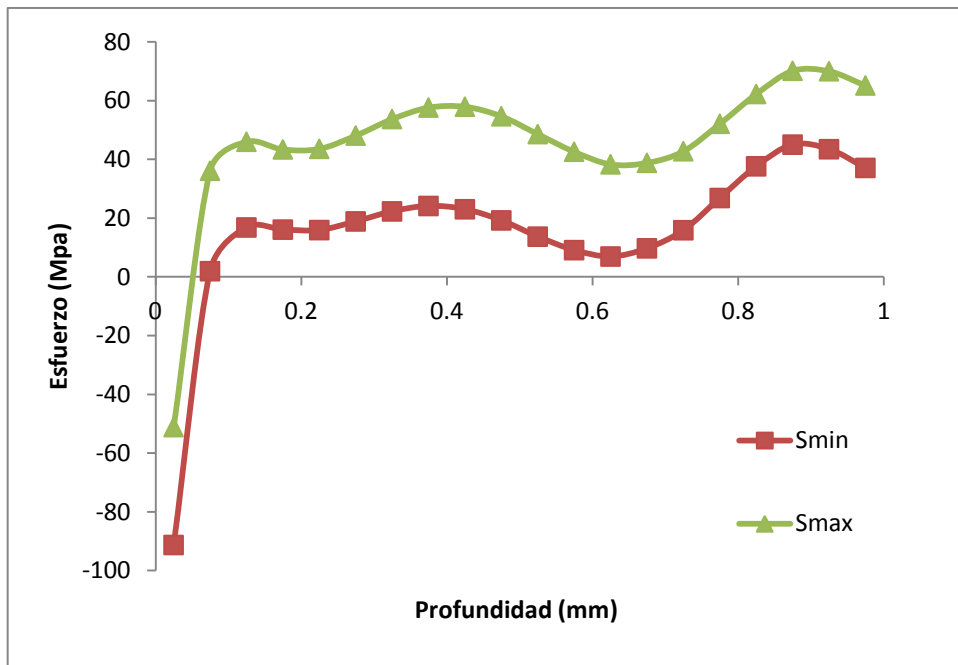


Figura IV. 4 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba 38)

Prueba #39 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba Lado Transmisión)

Tabla IV.3 Datos obtenidos en prueba #39 Hole Drilling

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	5.382	4.329	3.49	86.767	-149.834	-112.958
0.075	7.197	5.032	2.766	-85.586	-11.451	29.222
0.125	7.799	4.627	1.06	-85.541	18.577	48.571
0.175	8.016	3.904	-0.748	-87.908	21.752	43.295
0.225	8.069	3.047	-2.605	-89.125	20.692	38.936
0.275	7.98	2.084	-4.608	-86.985	21.558	39.434
0.325	7.743	1.05	-6.776	-82.546	23.169	41.839
0.375	7.38	0.021	-9.032	-77.263	24.636	44.264
0.425	6.948	-0.921	-11.266	-72.179	24.364	44.923
0.475	6.519	-1.717	-13.384	-68.356	22.486	44.073
0.525	6.151	-2.353	-15.345	-66.388	18.871	41.297
0.575	5.876	-2.856	-17.152	-66.639	16.014	38.976
0.625	5.697	-3.277	-18.834	-68.597	13.541	36.735
0.675	5.601	-3.655	-20.418	-71.455	13.124	36.67
0.725	5.573	-3.999	-21.919	-73.802	11.447	35.831
0.775	5.612	-4.282	-23.335	-74.434	11.048	37.197
0.825	5.724	-4.46	-24.659	-73.084	8.1	37.515
0.875	5.913	-4.499	-25.894	-70.719	4.363	38.886
0.925	6.161	-4.411	-27.06	-68.465	1.468	41.954
0.975	6.428	-4.252	-28.18	-67.001	10.007	54.885

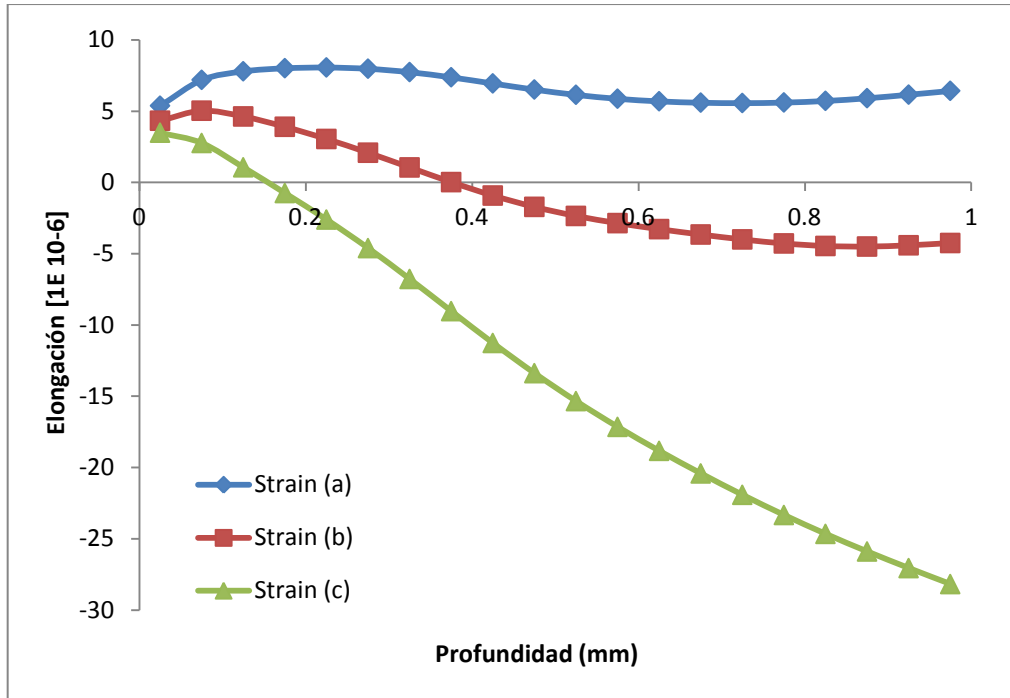


Figura IV. 5 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba 39)

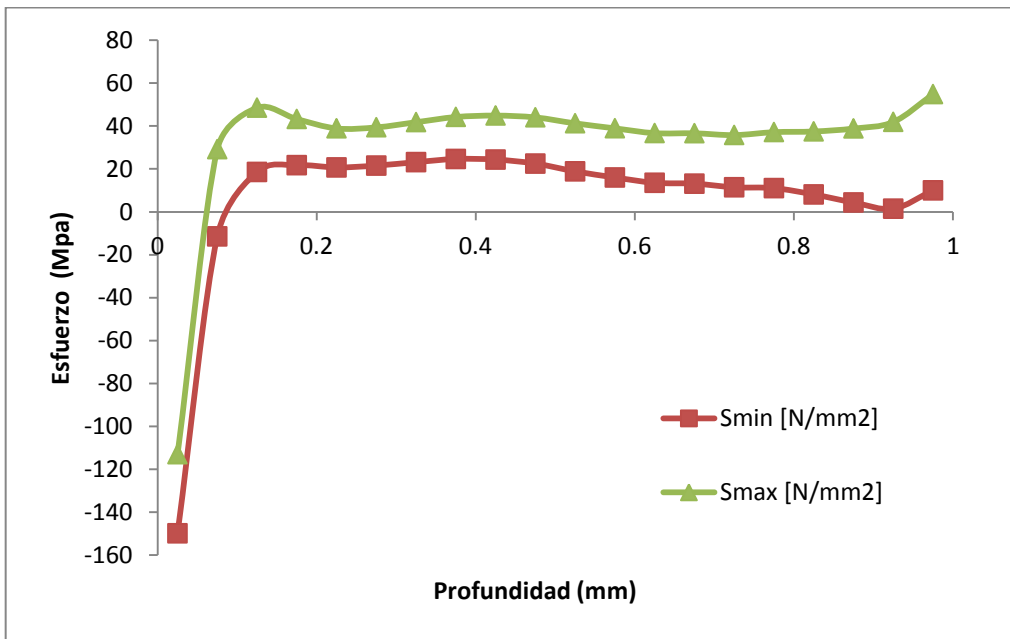


Figura IV. 6 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba 39)

Muestra #7 (Zona Central del Rollo) Nivelada

Prueba # 52 Nivelada Acero HSLA Grado 050 (Prueba lado operador)

Tabla IV.4 Datos obtenidos en prueba #52 Hole Drilling (M7)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.291	0.478	2.003	47.464	-92.304	-29.916
0.075	1.907	-1.405	1.57	45.064	0.992	42.785
0.125	0.317	-4.495	0.027	43.877	27.523	64.471
0.175	-1.578	-7.973	-1.545	41.011	22.264	62.461
0.225	-3.489	-11.429	-2.781	37.831	11.832	54.075
0.275	-5.494	-14.829	-3.829	35.018	9.381	49.907
0.325	-7.784	-18.351	-5.001	32.984	16.064	53.596
0.375	-10.479	-22.164	-6.482	31.839	27.633	63.665
0.425	-13.535	-26.268	-8.219	31.098	37.335	74.422
0.475	-16.75	-30.453	-9.976	30.072	40.416	79.887
0.525	-19.845	-34.397	-11.498	28.538	35.24	75.574
0.575	-22.574	-37.837	-12.659	27.199	25.342	63.197
0.625	-24.817	-40.71	-13.539	27.59	16.244	48.086
0.675	-26.618	-43.195	-14.372	33.369	15.425	41.16
0.725	-28.15	-45.615	-15.42	45.108	22.856	49.19
0.775	-29.623	-48.261	-16.824	52.159	40.541	76.702
0.825	-31.174	-51.215	-18.526	52.766	62.111	110.198
0.875	-32.801	-54.293	-20.297	50.547	79.005	133.971
0.925	-34.382	-57.148	-21.865	47.03	78.767	130.521
0.975	-35.76	-59.49	-23.078	42.657	70.286	108.789

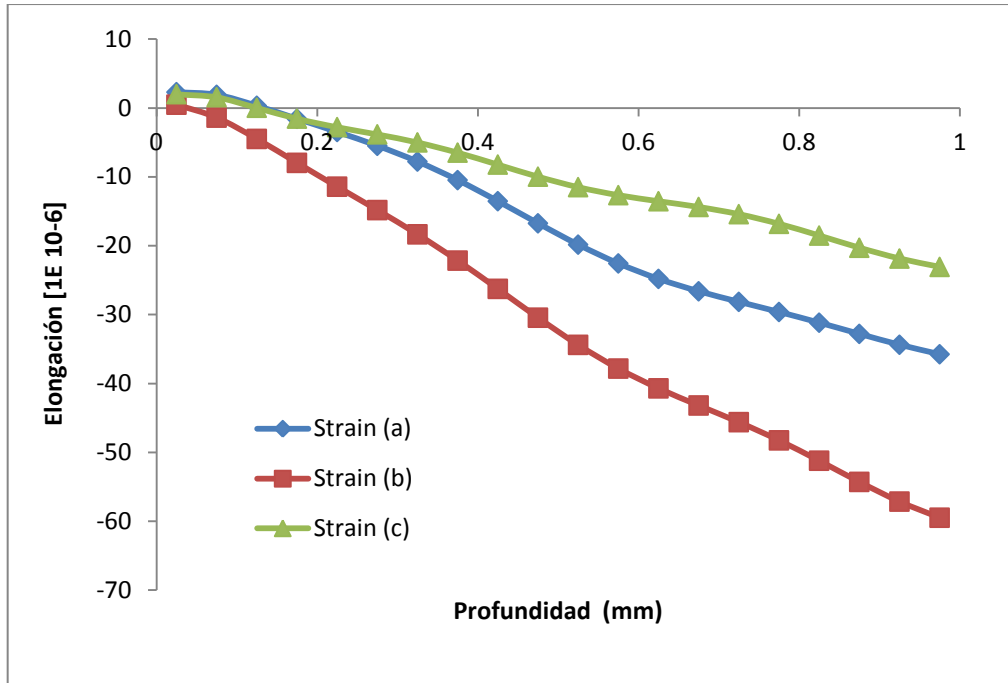


Figura IV. 7 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #52)

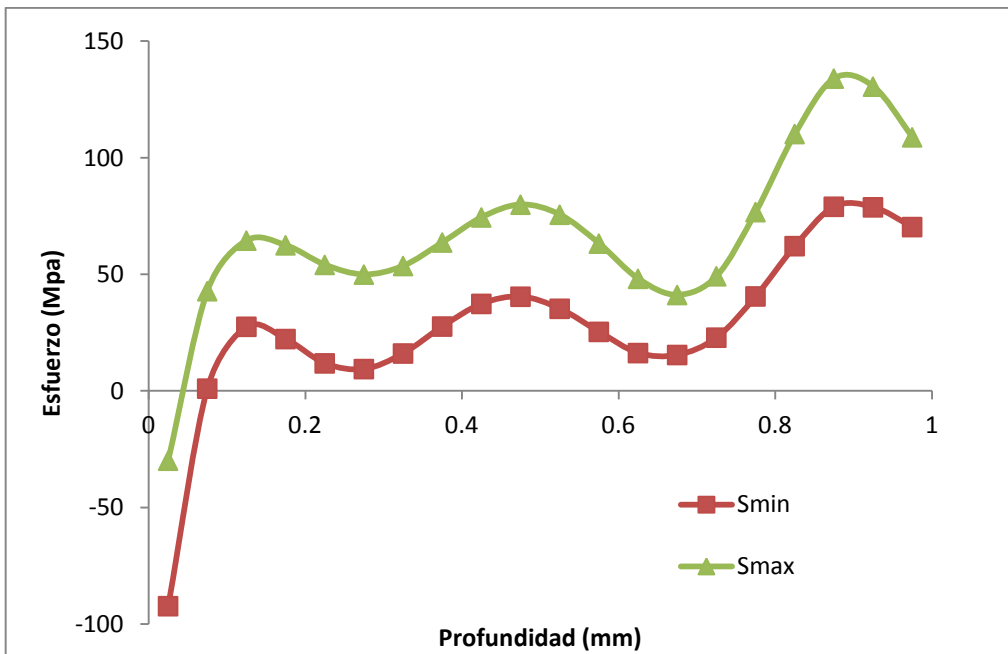


Figura IV. 8 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #52)

Prueba #53 Nivelada Acero HSLA Grado 050 (Prueba Centro de hoja)

Tabla IV.5 Datos obtenidos en prueba #53 Hole Drilling (M7)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.135	-0.237	-0.368	70.221	-28.723	7.148
0.075	2.456	-1.427	-0.704	57.105	-40.432	18.649
0.125	1.968	-3.475	-1.602	45.054	3.985	37.971
0.175	0.326	-6.136	-2.865	32.598	22.469	50.432
0.225	-1.503	-9.077	-4.229	34.354	20.384	50.376
0.275	-3.072	-12.061	-5.525	39.672	11.202	44.81
0.325	-4.446	-15.034	-6.699	41.66	4.321	41.112
0.375	-5.878	-18.06	-7.776	40.075	3.338	42.066
0.425	-7.529	-21.19	-8.803	37.124	6.802	46.964
0.475	-9.361	-24.372	-9.817	35.128	11.141	51.859
0.525	-11.201	-27.459	-10.824	34.858	14.233	52.857
0.575	-12.874	-30.283	-11.803	36.047	15.446	48.95
0.625	-14.315	-32.743	-12.722	37.578	15.616	42.258
0.675	-15.583	-34.859	-13.551	37.1	16.759	37.521
0.725	-16.798	-36.745	-14.277	32.709	18.864	37.418
0.775	-18.054	-38.536	-14.91	27.959	23.23	44.625
0.825	-19.355	-40.303	-15.475	26.899	27.424	53.972
0.875	-20.624	-42.018	-16.005	28.111	31.89	61.207
0.925	-21.762	-43.578	-16.527	30.003	34.827	61.151
0.975	-22.71	-44.894	-17.047	31.82	42.521	59.789

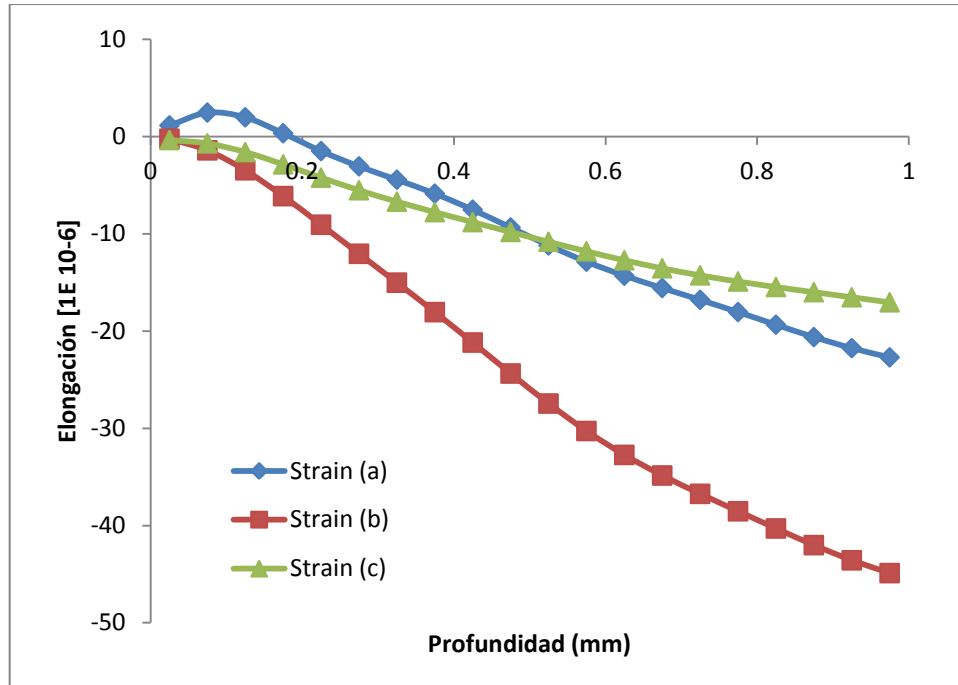


Figura IV. 9 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #53)

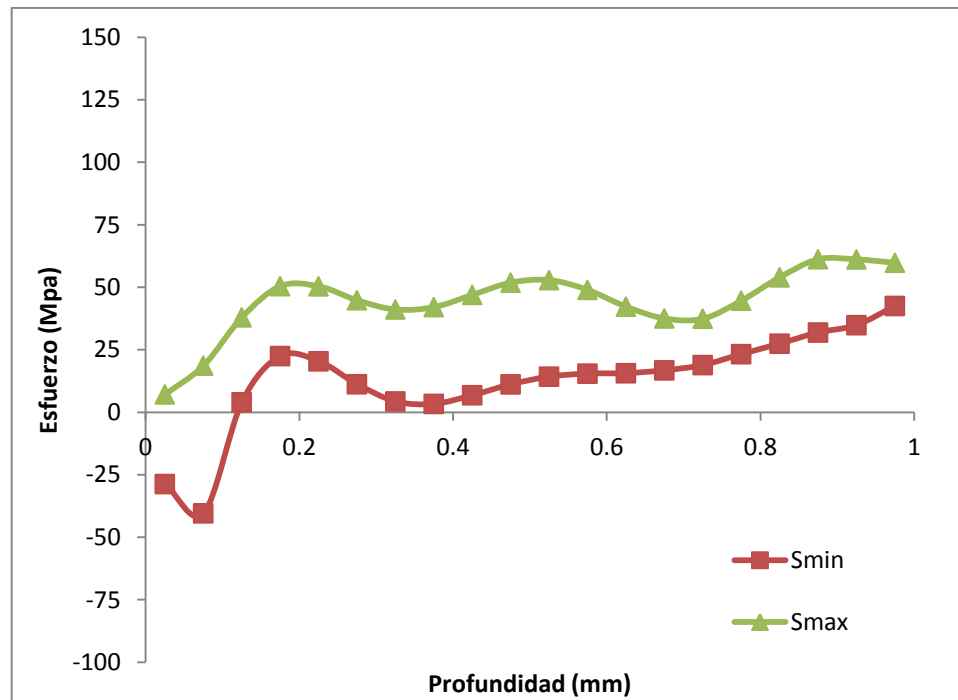


Figura IV.10 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #53)

Prueba #54 Nivelada Acero HSLA Grado 050 (Prueba lado transmisión)

Tabla IV.6 Datos obtenidos en prueba #54 Hole Drilling (M7)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.641	4.367	1.536	-51.813	-108.528	-16.631
0.075	2.058	3.369	0.955	41.811	13.623	41.444
0.125	0.698	1.968	0.025	29.439	26.736	45.401
0.175	-0.714	0.673	-1.081	21.484	28.885	36.877
0.225	-2.219	-0.894	-2.467	37.747	30.156	37.736
0.275	-3.977	-2.843	-4.107	40.247	33.201	44.038
0.325	-6.003	-4.98	-5.86	32.324	37.267	47.561
0.375	-8.166	-7.08	-7.587	18.535	38.912	47.706
0.425	-10.294	-9.076	-9.221	12.686	37.377	45.848
0.475	-12.274	-11.05	-10.764	25.376	34.477	44.25
0.525	-14.079	-13.112	-12.252	38.315	29.911	46.11
0.575	-15.739	-15.264	-13.708	42.964	27.334	50.245
0.625	-17.285	-17.358	-15.122	44.45	28.718	51.69
0.675	-18.714	-19.167	-16.463	45.273	35.104	48.248
0.725	-19.989	-20.512	-17.697	-52.185	37.665	41.594
0.775	-21.075	-21.38	-18.817	-48.889	27.047	47.544
0.825	-21.969	-21.946	-19.839	-50.472	20.441	48.354
0.875	-22.712	-22.476	-20.791	-55.189	23.9	45.833
0.925	-23.364	-23.175	-21.685	-83.333	34.701	43.406
0.975	-23.959	-24.051	-22.501	56.518	39.292	58.083

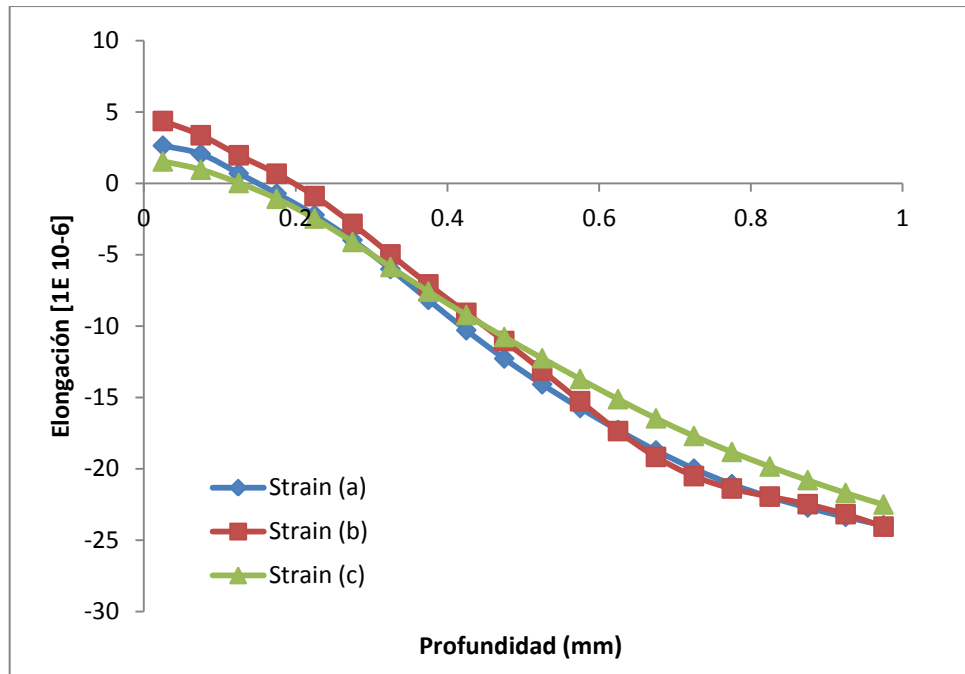


Figura IV.11 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #54)

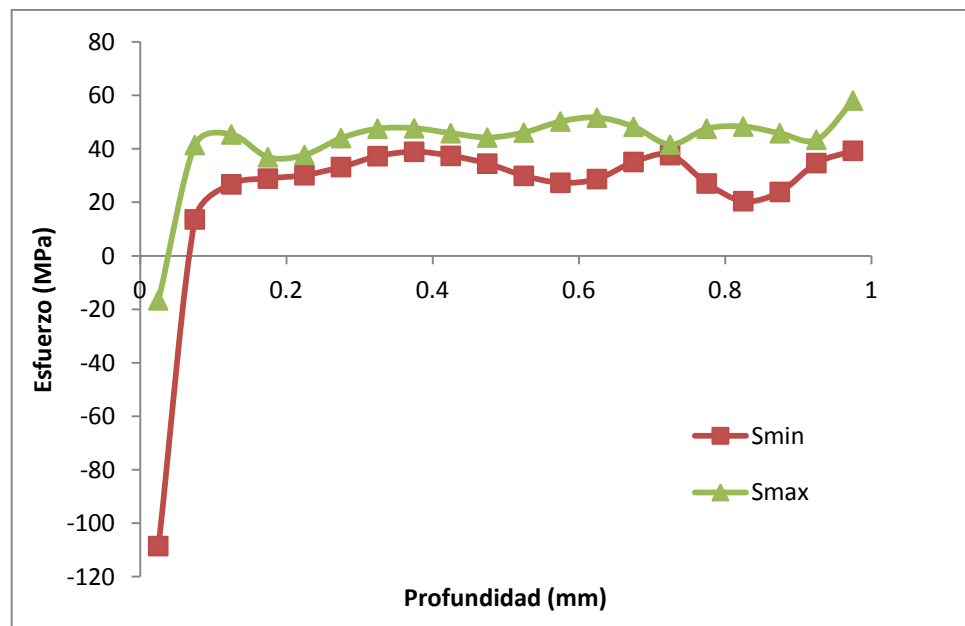


Figura IV.12 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #54)

Muestra #8 (Zona Final del Rollo) Nivelada

Prueba #55 Nivelada Acero HSLA Grado 050 (Prueba lado operador)

Tabla IV.7 Datos obtenidos en prueba #55 Hole Drilling (M8)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.922	3.684	3.352	-85.315	-113.991	-102.726
0.075	3.447	4.033	4.676	2.504	-9.056	24.983
0.125	1.784	3.181	5.549	10.519	4.401	47.679
0.175	-0.149	1.766	6.18	16.89	5.821	48.094
0.225	-2.218	0.166	6.488	17.018	11.416	45.722
0.275	-4.413	-1.326	6.487	7.786	19.277	43.659
0.325	-6.674	-2.59	6.299	-7.243	21.75	43.299
0.375	-8.922	-3.719	6.047	-12.717	20.889	42.845
0.425	-11.122	-4.936	5.779	-5.567	21.231	40.914
0.475	-13.291	-6.447	5.453	11.433	22.532	42.835
0.525	-15.461	-8.307	4.999	23.769	23.89	49.761
0.575	-17.619	-10.379	4.384	28.522	28.66	57.22
0.625	-19.687	-12.396	3.651	28.743	34.667	58.462
0.675	-21.544	-14.103	2.902	22.846	38.734	52.499
0.725	-23.092	-15.381	2.233	-4.064	33.878	40.086
0.775	-24.316	-16.32	1.676	-31.286	25.494	31.617
0.825	-25.314	-17.169	1.167	-35.692	25.249	25.605
0.875	-26.246	-18.195	0.587	48.857	31.652	44.35
0.925	-27.253	-19.513	-0.15	47.443	53.812	79.922
0.975	-28.36	-20.991	-1.013	46.273	94.158	123.825

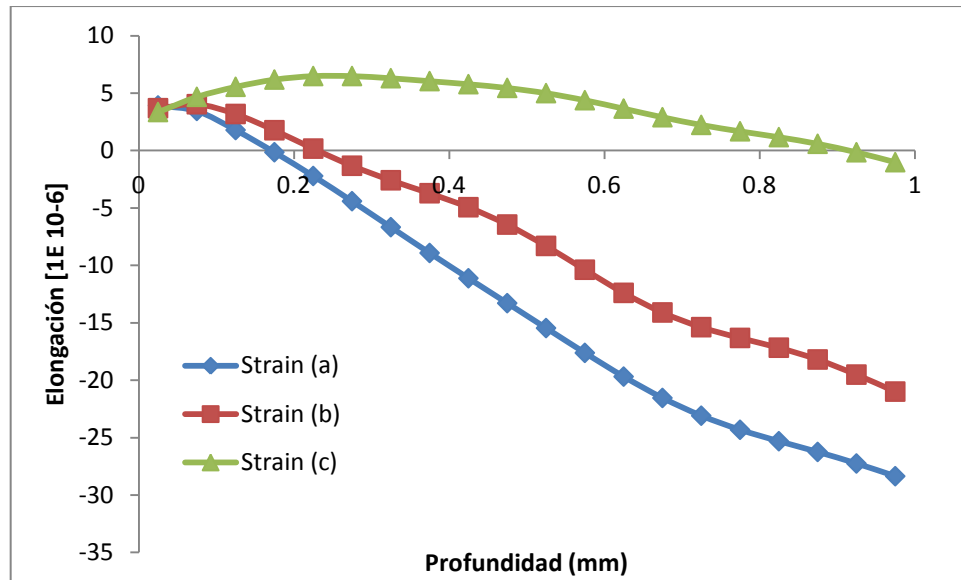


Figura IV.13 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #55)

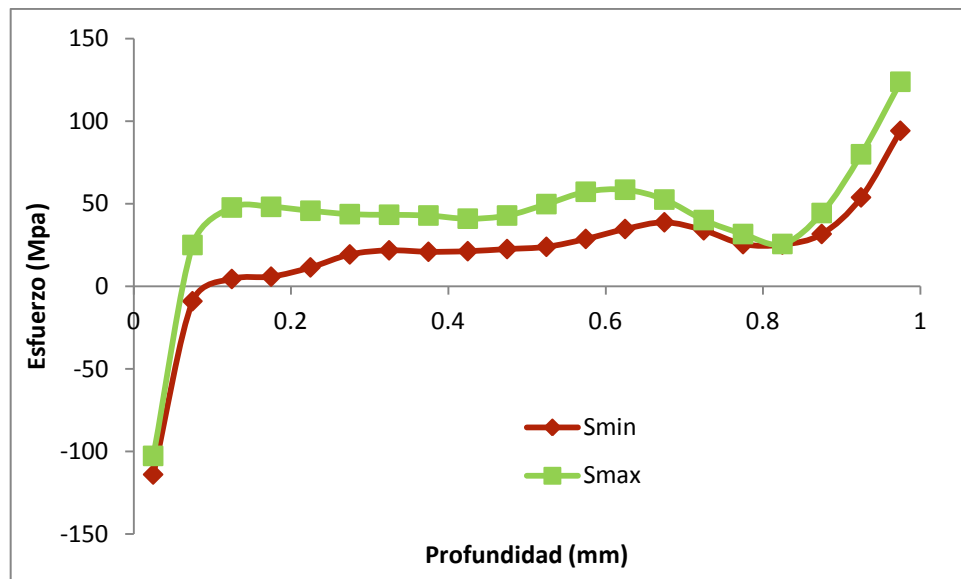


Figura IV.14 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #55)

Prueba #56 Nivelada Acero HSLA Grado 050 (Prueba centro de hoja)

Tabla IV.8 Datos obtenidos en prueba #56 Hole Drilling (M8)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.807	3.97	3.357	-60.041	-98.774	-83.813
0.075	3.616	2.969	3.356	41.173	3.884	33.813
0.125	2.119	0.656	2.461	36.572	22.593	54.379
0.175	0.262	-2.075	1.284	36.445	23.324	53.61
0.225	-1.761	-5.201	-0.17	39.264	22.449	54.017
0.275	-4.005	-8.781	-1.948	41.336	24.483	58.469
0.325	-6.534	-12.742	-4	41.387	28.598	63.711
0.375	-9.334	-16.925	-6.212	39.863	33.512	67.982
0.425	-12.316	-21.17	-8.471	37.823	37.551	70.603
0.475	-15.348	-25.366	-10.71	36.61	40.164	72.243
0.525	-18.302	-29.45	-12.899	37.045	40.957	72.687
0.575	-21.075	-33.368	-15.027	38.822	41.212	72.833
0.625	-23.609	-37.046	-17.063	40.857	40.721	71.307
0.675	-25.889	-40.393	-18.959	42.045	41.177	68.811
0.725	-27.927	-43.331	-20.656	41.486	39.682	62.116
0.775	-29.746	-45.841	-22.118	38.086	39.982	56.721
0.825	-31.371	-47.98	-23.348	32.573	38.008	51.502
0.875	-32.817	-49.864	-24.393	31.405	36.242	50.452
0.925	-34.089	-51.612	-25.311	36.075	34.408	53.254
0.975	-35.19	-53.279	-26.137	40.602	39.955	65.306

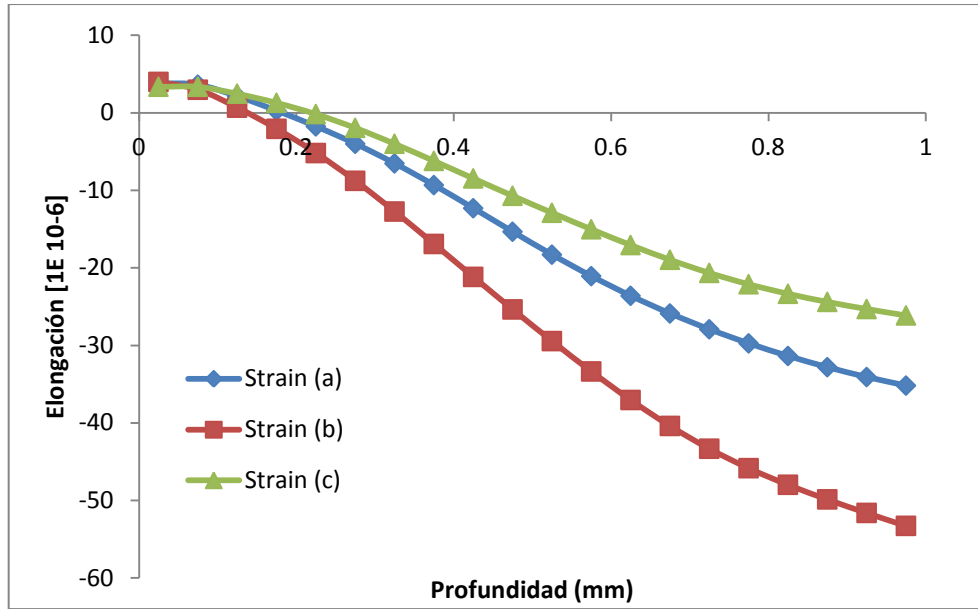


Figura IV.15 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #56)

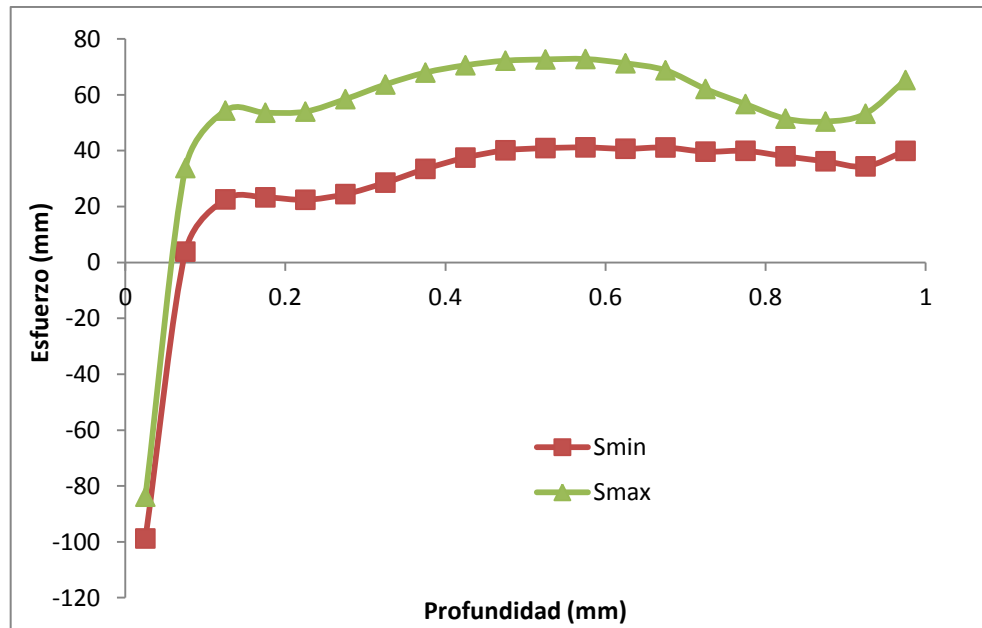


Figura IV.16 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #56)

Prueba #57 Nivelada Acero HSLA Grado 050 (Prueba lado transmisión)

Tabla IV.8 Datos obtenidos en prueba #57 Hole Drilling (M8)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	-0.694	-3.255	-1.234	48.357	-14.518	65.827
0.075	-1.928	-6.843	-2.69	46.062	-1.843	58.927
0.125	-4.014	-11.124	-4.492	41.928	10.814	65.072
0.175	-6.679	-15.855	-6.586	39.676	18.953	68.014
0.225	-9.566	-20.726	-8.822	39.087	21.893	66.062
0.275	-12.499	-25.597	-11.1	39.218	22.508	63.198
0.325	-15.472	-30.483	-13.404	39.298	23.508	63.194
0.375	-18.543	-35.443	-15.742	38.915	25.752	66.33
0.425	-21.718	-40.473	-18.088	38.212	28.686	71.18
0.475	-24.916	-45.479	-20.361	37.537	29.93	74.728
0.525	-28.001	-50.313	-22.457	37.073	28.448	74.992
0.575	-30.855	-54.846	-24.303	36.911	24.243	71.819
0.625	-33.445	-59.024	-25.902	36.84	20.424	67.818
0.675	-35.836	-62.88	-27.326	36.53	21.422	67.728
0.725	-38.151	-66.5	-28.677	35.603	28.666	73.091
0.775	-40.487	-69.964	-30.021	33.968	43.043	85.86
0.825	-42.849	-73.294	-31.354	32.233	57.441	100.005
0.875	-45.139	-76.444	-32.602	31.485	64.776	108.984
0.925	-47.211	-79.335	-33.682	32.189	58.779	105.355
0.975	-48.976	-81.916	-34.565	33.816	50.368	97.997

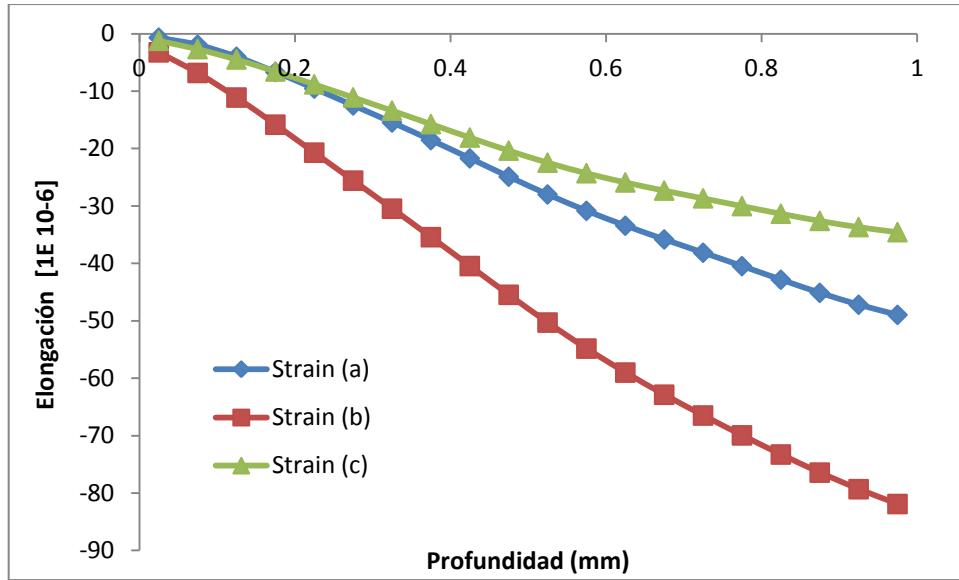


Figura IV.17 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #57)

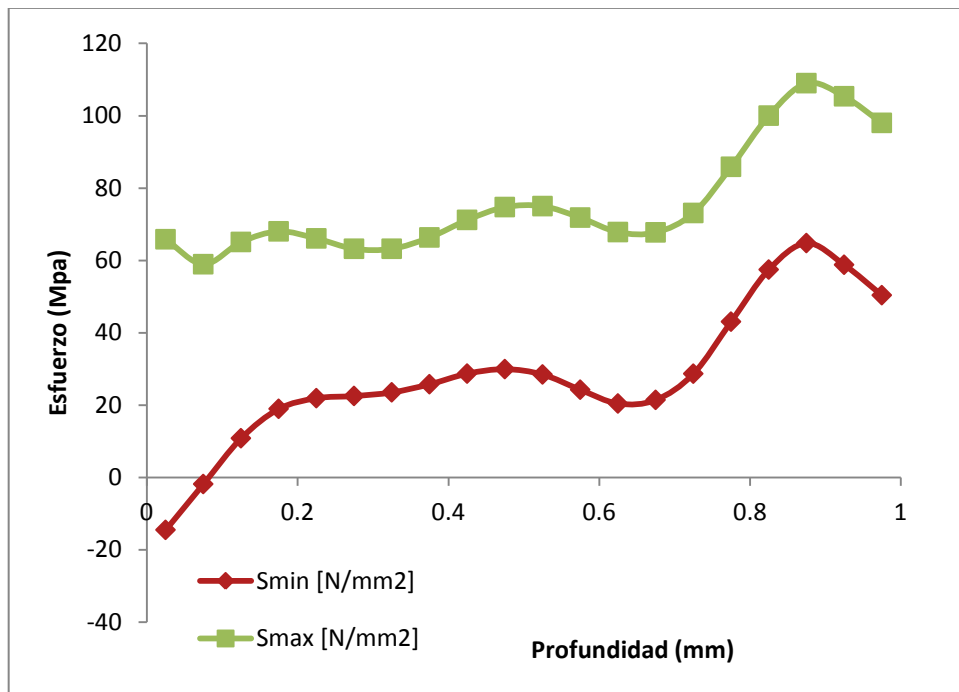


Figura IV.18 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #57)

Anexo V

Resultados obtenidos en pruebas Hole Drilling para hoja calibre ½" Nivelada

Muestra 9 (Inicio de rollo) Nivelada

Prueba #43 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

Tabla V.1 Datos obtenidos en prueba #43 Hole Drilling (M9)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.859	3.748	2.095	-43.093	-84.444	-21.962
0.075	1.425	3.687	1.986	11.516	13.894	18.985
0.125	1.392	2.838	1.495	53.965	-1.489	25.298
0.175	1.7	2.012	1.078	56.168	-9.981	18.689
0.225	1.387	1.152	0.717	43.547	2.847	18.111
0.275	-0.053	-0.008	0.299	7.959	15.704	33.24
0.325	-2.24	-1.56	-0.235	4.273	21.286	46.165
0.375	-4.221	-3.308	-0.874	17.497	19.436	40.503
0.425	-5.131	-4.91	-1.561	47.882	1.403	25.264
0.475	-4.707	-6.106	-2.241	63.705	-27.706	12.175
0.525	-3.394	-6.889	-2.877	69.364	-46.51	2.558
0.575	-2.018	-7.484	-3.462	70.942	-42.172	1.212
0.625	-1.276	-8.17	-4.011	67.456	-17.543	9.135
0.675	-1.348	-9.072	-4.546	48.191	10.813	23.603
0.725	-1.866	-10.083	-5.082	27.65	23.072	34.751
0.775	-2.252	-10.976	-5.624	43.408	18.29	27.395
0.825	-2.168	-11.622	-6.169	71.314	-4.605	12.75
0.875	-1.762	-12.133	-6.712	74.296	-21.849	5.494
0.925	-1.477	-12.768	-7.259	66.693	-8.022	20.21
0.975	-1.579	-13.636	-7.823	53.102	31.916	57.951

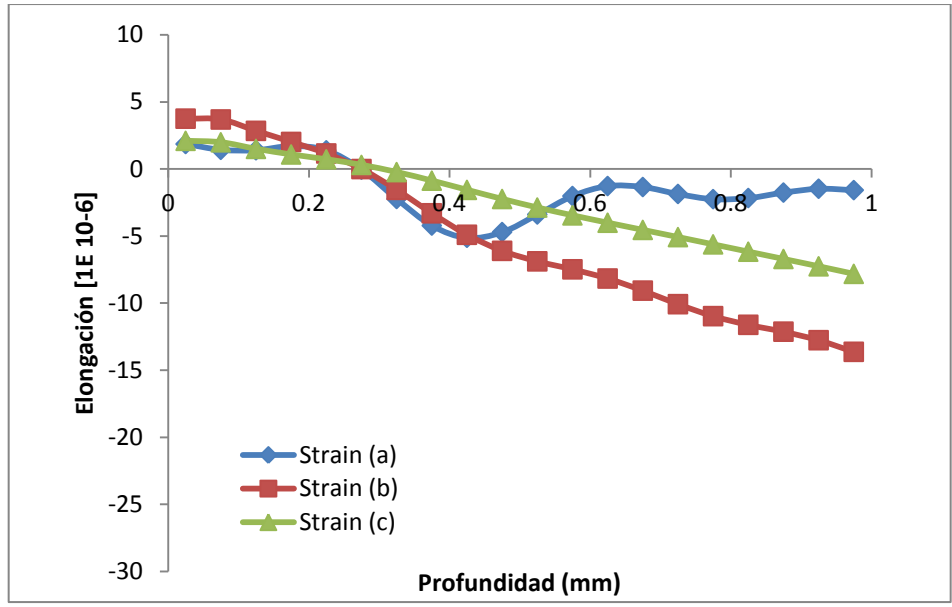


Figura V.1 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #43)

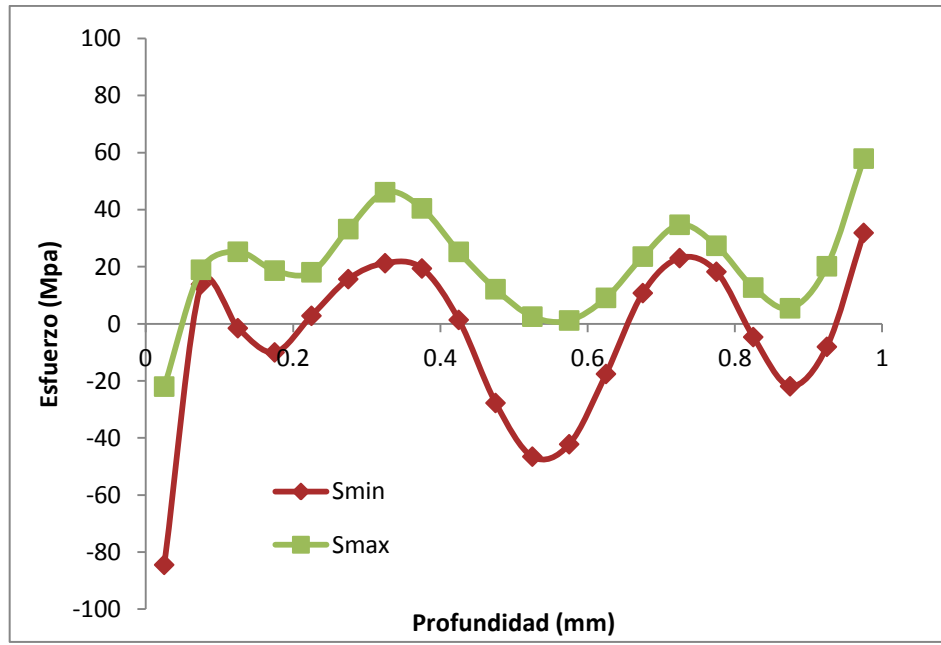


Figura V.2 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #43)

Prueba #44 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba centro de la hoja)

Tabla V.2 Datos obtenidos en prueba #44 Hole Drilling (M9)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	6.735	6.088	6.399	54.668	-169.416	-153.117
0.075	6.3	3.958	5.688	47.164	20.299	64.373
0.125	6.37	2.764	5.898	42.079	-0.124	30.101
0.175	6.948	2.344	6.884	37.363	-15.479	8.097
0.225	7.064	1.507	7.595	35.263	-8.244	15.507
0.275	6.532	0.065	7.863	33.288	2.315	27.276
0.325	5.715	-1.533	8.081	30.229	3.2	28.432
0.375	4.946	-2.922	8.554	27.035	-2.809	22.233
0.425	4.265	-4.109	9.23	25.293	-8.043	16.838
0.475	3.516	-5.326	9.838	25.54	-5.664	18.926
0.525	2.572	-6.725	10.166	26.514	2.278	25.674
0.575	1.487	-8.22	10.232	26.579	10.783	31.618
0.625	0.454	-9.556	10.252	24.083	11.096	28.29
0.675	-0.344	-10.529	10.442	19.116	2.877	17.269
0.725	-0.883	-11.17	10.849	16.772	-10.186	3.633
0.775	-1.312	-11.741	11.307	22.072	-13.356	2.426
0.825	-1.826	-12.544	11.576	30.705	-2.316	18.617
0.875	-2.503	-13.677	11.538	36.811	18.39	45.421
0.925	-3.223	-14.933	11.313	39.873	30.253	59.165
0.975	-3.774	-15.947	11.167	39.761	19.844	42.907

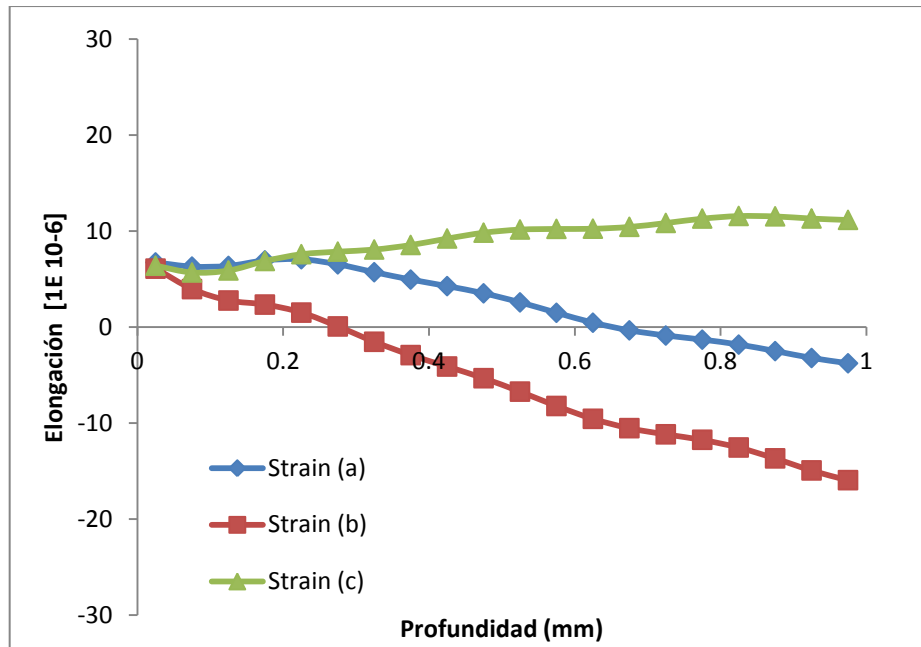


Figura V.3 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #44)

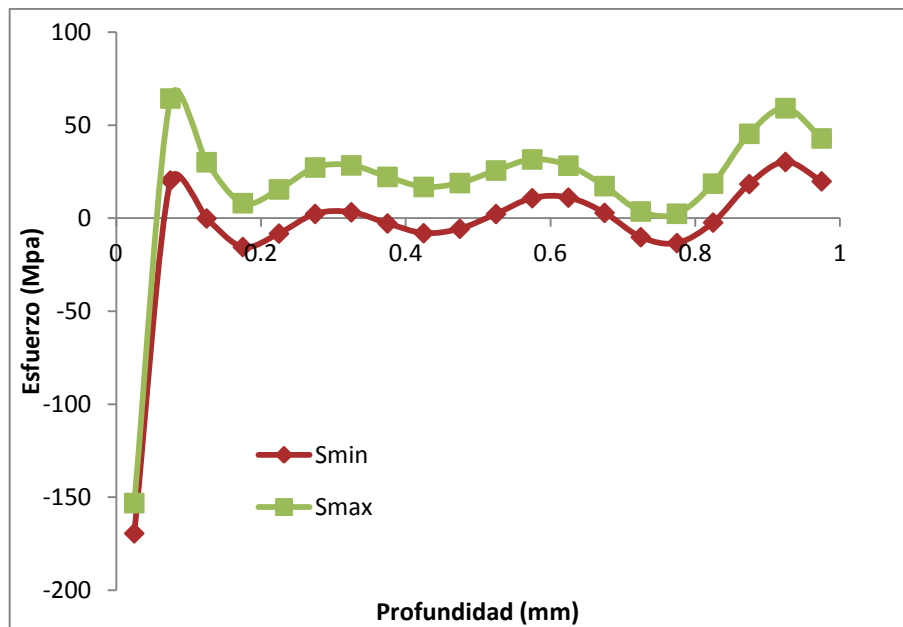


Figura V.4 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #44)

Prueba #45 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba Lado transmisión)

Tabla V.3 Datos obtenidos en prueba #45 Hole Drilling (M9)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	0.754	-0.544	0.208	52.455	-26.301	4.77
0.075	0.31	-2.4	-0.61	48.877	0.52	29.595
0.125	-0.81	-4.554	-1.211	36.234	2.936	30.149
0.175	-2.353	-6.811	-1.598	28.448	2.588	29.756
0.225	-4.189	-9.236	-1.993	26.221	4.096	31.103
0.275	-6.253	-11.897	-2.462	26.63	5.712	33.705
0.325	-8.506	-14.784	-2.925	27.233	5.522	36.636
0.375	-10.913	-17.835	-3.282	27.061	3.78	39.167
0.425	-13.428	-20.966	-3.5	26.47	2.148	41.215
0.475	-15.996	-24.103	-3.639	25.973	2.239	42.993
0.525	-18.553	-27.177	-3.794	25.709	4.773	44.493
0.575	-21.032	-30.119	-4.031	25.612	8.965	45.456
0.625	-23.37	-32.85	-4.333	25.205	12.641	44.915
0.675	-25.52	-35.292	-4.606	23.853	13.536	42.455
0.725	-27.448	-37.397	-4.727	21.551	8.998	36.594
0.775	-29.144	-39.171	-4.619	19.637	0.894	29.654
0.825	-30.618	-40.688	-4.305	19.793	-8.564	22.719
0.875	-31.898	-42.069	-3.91	22.476	-13.443	20.164
0.925	-33.022	-43.424	-3.594	27.07	-9.167	25.589
0.975	-34.033	-44.796	-3.457	31.892	6.31	40.262

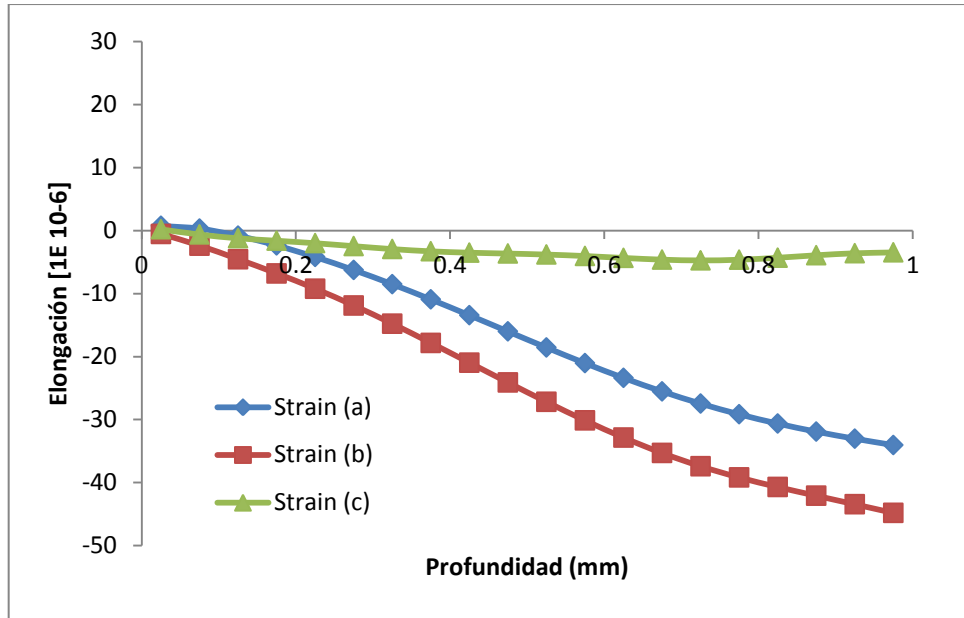


Figura V.5 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #45)

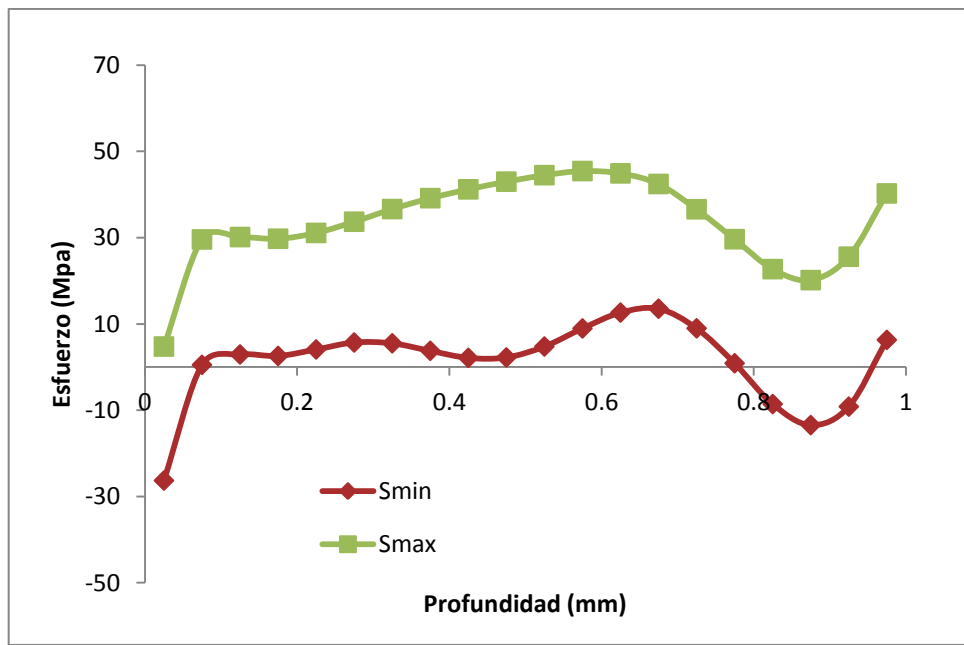


Figura V.6 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #45)

Muestra 10 (Zona central del Rollo) Nivelada

Prueba #49 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

Tabla V.4 Datos obtenidos en prueba #49 Hole Drilling (M10)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	5.527	2.661	2.815	65.963	-155.584	-80.462
0.075	6.933	2.255	3.702	46.113	-31.227	13.902
0.125	7.073	1.228	3.763	39.115	4.861	29.374
0.175	6.933	0.368	3.664	29.75	12.143	23.073
0.225	6.737	-0.294	3.593	14.369	10.63	17.086
0.275	6.465	-0.951	3.47	11.188	10.434	15.901
0.325	6.073	-1.757	3.177	22.766	12.687	17.67
0.375	5.56	-2.749	2.689	35.707	15.567	21.404
0.425	4.963	-3.869	2.08	40.956	16.842	24.184
0.475	4.334	-5.026	1.464	40.502	16.216	25.07
0.525	3.715	-6.148	0.922	37.844	13.412	23.553
0.575	3.129	-7.204	0.467	36.165	11.168	22.3
0.625	2.58	-8.203	0.051	36.906	10.28	21.623
0.675	2.058	-9.165	-0.392	40.491	12.744	23.506
0.725	1.552	-10.107	-0.9	46.104	15.959	25.906
0.775	1.052	-11.026	-1.462	50.874	21.19	30.501
0.825	0.557	-11.907	-2.03	51.295	24.537	33.45
0.875	0.065	-12.74	-2.557	47.105	26.782	35.798
0.925	-0.421	-13.531	-3.031	41.882	28.349	38.122
0.975	-0.901	-14.305	-3.489	40.74	40.714	51.403

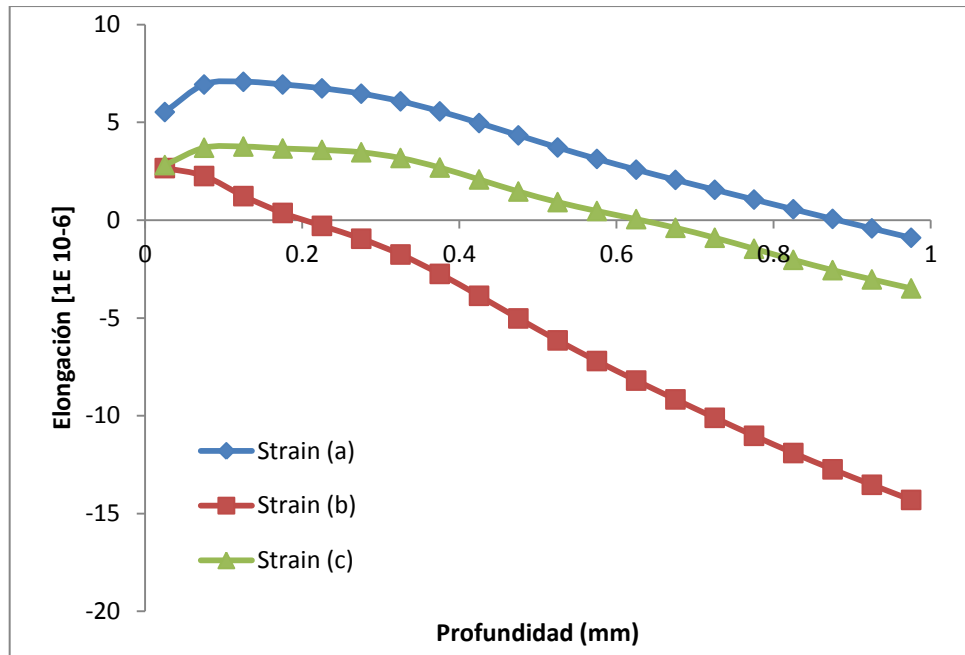


Figura V.7 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #49)

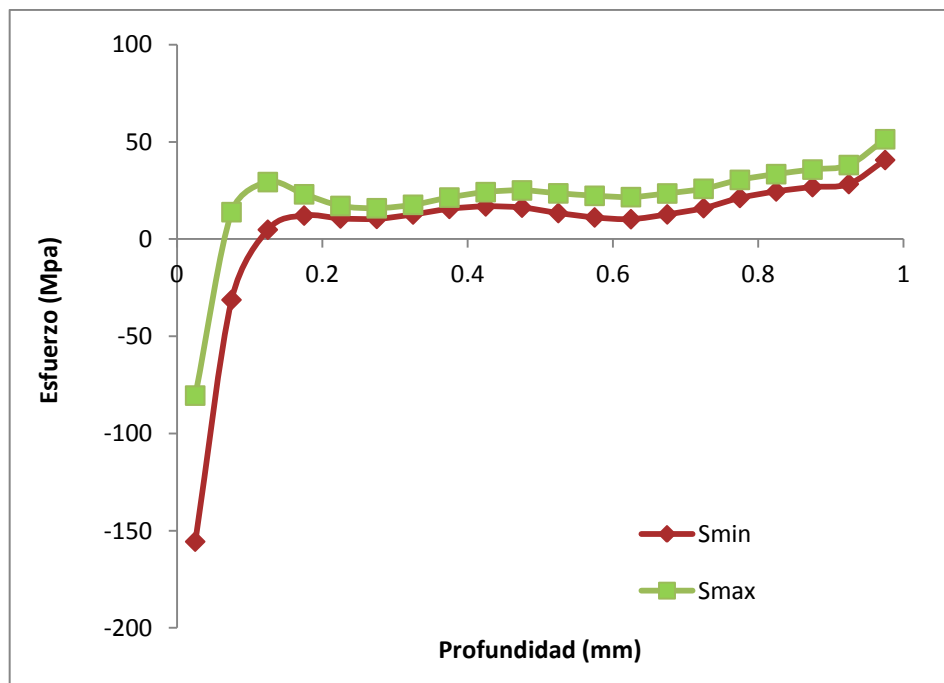


Figura V.8 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #49)

Prueba #50 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba centro de hoja)

Tabla V.5 Datos obtenidos en prueba #50 Hole Drilling (M10)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	4.886	7.095	5.582	-39.697	-192.822	-119.04
0.075	6.018	7.122	6.177	53.014	-16.511	25.44
0.125	6.357	6.479	6.194	50.056	2.592	34.673
0.175	6.594	6.31	6.389	45.199	5.888	17.791
0.225	6.793	6.353	6.585	40.595	7.162	10.169
0.275	6.935	6.294	6.606	61.34	8.168	11.312
0.325	7.029	6.059	6.452	63.489	7.479	13.788
0.375	7.097	5.723	6.212	62.272	6.712	14.736
0.425	7.142	5.377	5.962	61.658	6.084	13.458
0.475	7.156	5.061	5.717	63.038	6.791	12.331
0.525	7.134	4.764	5.445	70.122	7.621	11.756
0.575	7.082	4.456	5.101	81.039	9.616	14.154
0.625	7.019	4.112	4.657	85.503	10.788	17.426
0.675	6.958	3.721	4.114	85.573	12.705	21.923
0.725	6.897	3.287	3.502	84.251	13.218	24.432
0.775	6.822	2.834	2.872	83.128	15.764	27.392
0.825	6.722	2.4	2.281	82.936	17.572	27.643
0.875	6.6	2.038	1.78	88.397	18.35	25.192
0.925	6.48	1.791	1.397	-69.904	14.651	19.481
0.975	6.385	1.661	1.112	-53.557	13.144	20.058

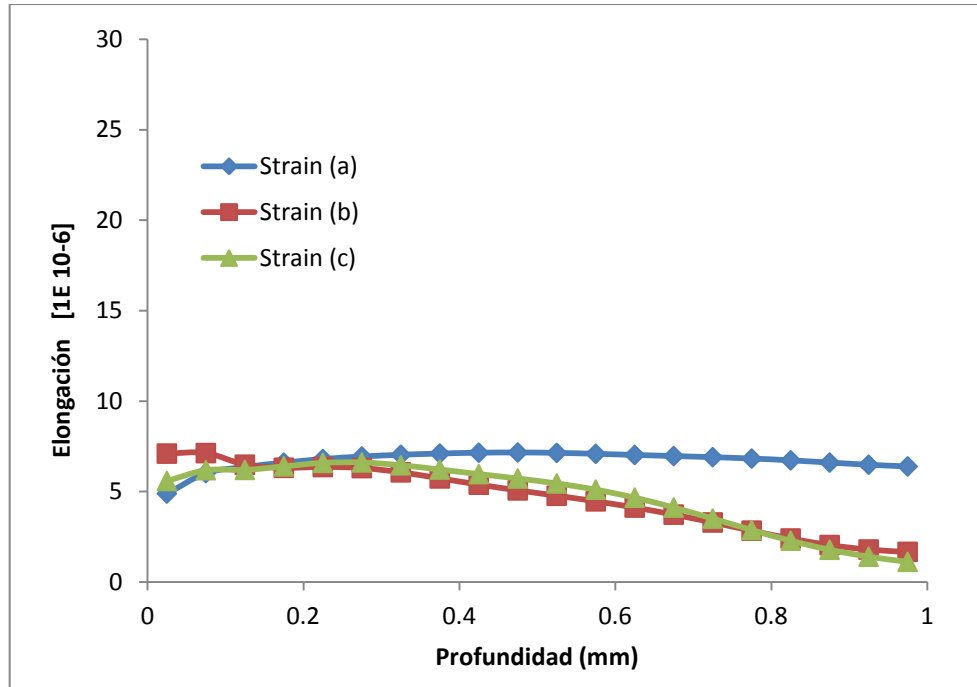


Figura V.9 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #50)

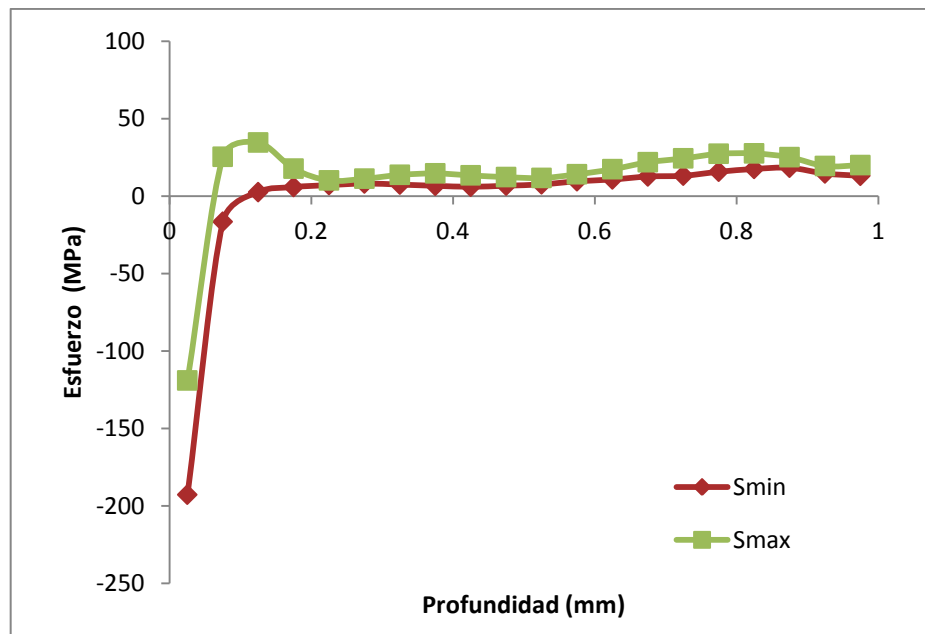


Figura V.10 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #49)

Prueba #51 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba lado transmisión)

Tabla V.6 Datos obtenidos en prueba #51 Hole Drilling (M10)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.588	3.569	1.498	-67.761	-104.306	-47.232
0.075	5.365	3.925	2.766	47.034	-52.153	-4.444
0.125	6.13	3.259	3.106	46.361	-18.681	21.701
0.175	6.422	2.224	2.728	51.6	1.353	29.016
0.225	6.533	1.045	2.035	55.835	7.022	29.346
0.275	6.558	-0.15	1.324	54.901	6.69	26.28
0.325	6.486	-1.286	0.714	50.71	5.937	22.273
0.375	6.287	-2.335	0.178	45.204	7.572	19.789
0.425	5.965	-3.307	-0.369	40.681	11.494	19.248
0.475	5.575	-4.225	-0.998	45.175	15.912	19.932
0.525	5.203	-5.098	-1.723	72.108	17.349	21.066
0.575	4.928	-5.911	-2.5	80.674	15.114	22.062
0.625	4.78	-6.638	-3.252	80.287	10.592	20.26
0.675	4.735	-7.261	-3.911	78.434	6.246	16.65
0.725	4.723	-7.781	-4.45	76.654	3.441	12.109
0.775	4.67	-8.227	-4.896	77.169	6.455	11.73
0.825	4.531	-8.636	-5.316	-86.052	13.424	15.856
0.875	4.315	-9.034	-5.785	-63.385	22.899	27.479
0.925	4.087	-9.417	-6.343	-66.025	30.848	40.472
0.975	3.928	-9.746	-6.971	-70.267	37.2	53.57

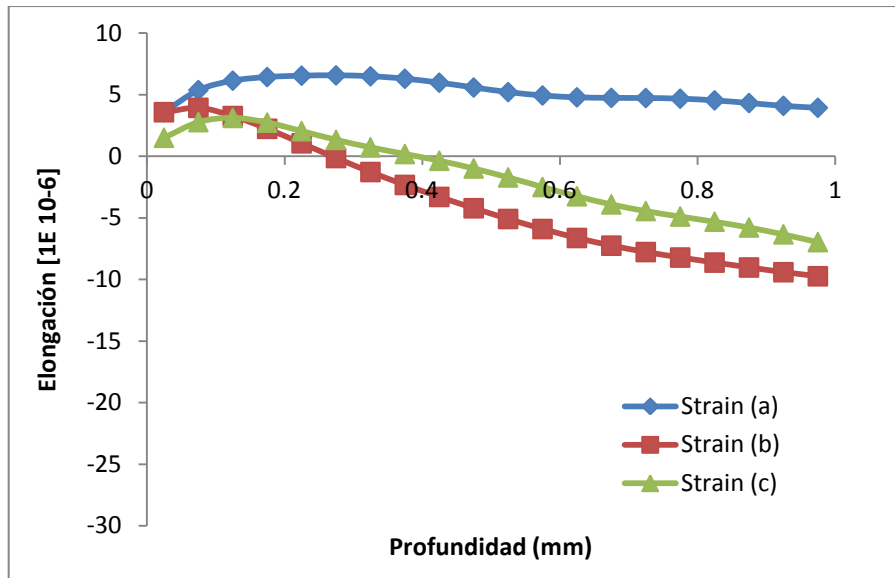


Figura V.11 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #51)

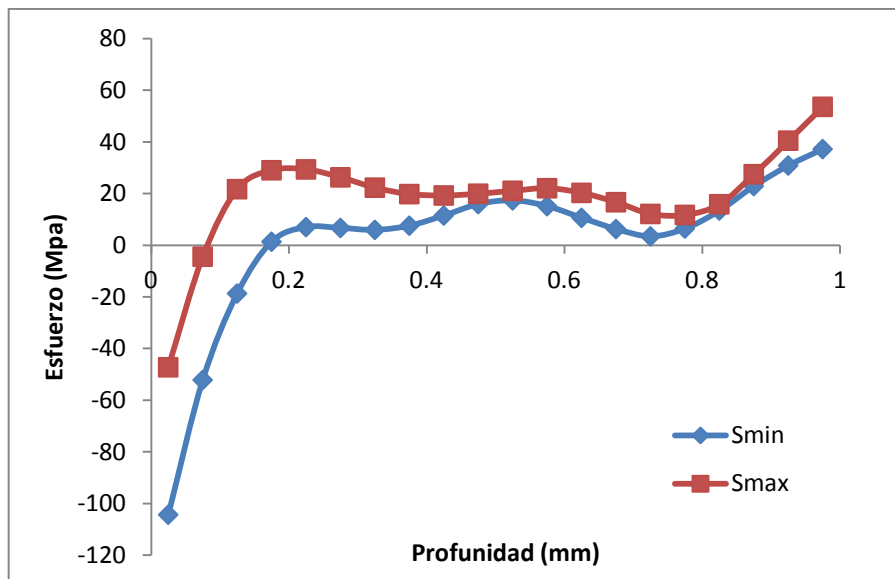


Figura V.12 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #51)

Muestra 11 (Zona final de rollo) Nivelada

Prueba #40 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

Tabla V.7 Datos obtenidos en prueba #40 Hole Drilling (M11)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.682	2.396	2.139	73.143	-107.261	-70.259
0.075	3.968	1.62	2.145	45.736	-3.497	27.496
0.125	3.771	0.545	1.706	45.61	10.472	30.512
0.175	3.471	-0.545	1.112	48.401	12.486	26.36
0.225	2.961	-1.826	0.363	46.82	14.484	27.793
0.275	2.265	-3.324	-0.496	44.49	15.409	30.62
0.325	1.51	-4.924	-1.386	44.37	13.909	30.805
0.375	0.784	-6.514	-2.269	45.595	12.349	29.34
0.425	0.067	-8.061	-3.17	47.119	13.242	28.653
0.475	-0.722	-9.594	-4.144	47.996	18.211	30.949
0.525	-1.643	-11.138	-5.218	47.532	25.559	35.064
0.575	-2.671	-12.665	-6.358	45.878	32.738	39.244
0.625	-3.702	-14.094	-7.477	44.743	35.189	39.386
0.675	-4.613	-15.342	-8.478	48.718	32.102	35.108
0.725	-5.331	-16.368	-9.301	55.52	22.826	25.942
0.775	-5.869	-17.203	-9.951	56.086	14.947	18.99
0.825	-6.301	-17.918	-10.476	51.415	10.763	15.862
0.875	-6.698	-18.568	-10.93	45.909	12.77	18.529
0.925	-7.07	-19.156	-11.331	41.501	15.67	21.215
0.975	-7.368	-19.641	-11.657	41.16	15.431	19.713

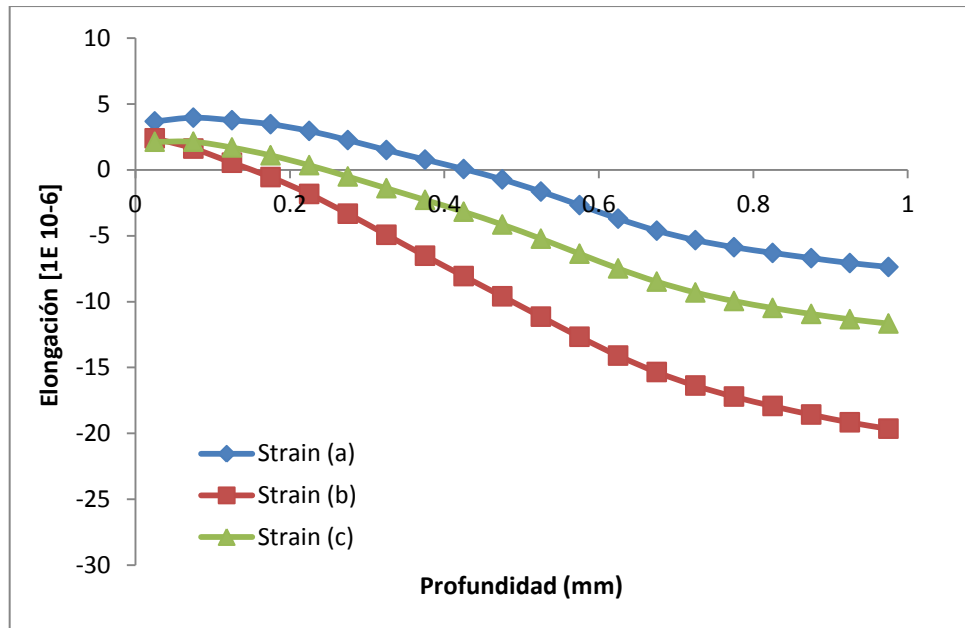


Figura V.13 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #40)

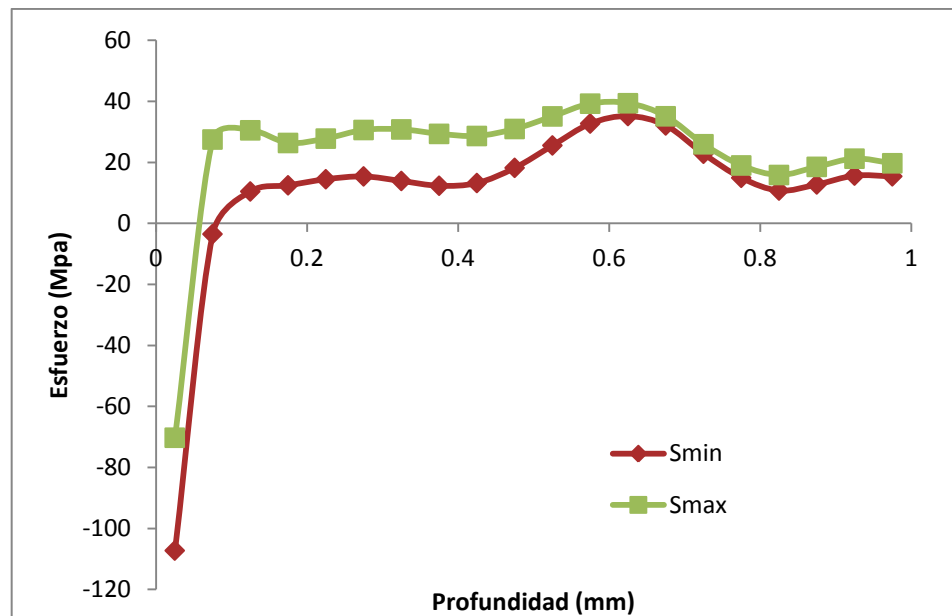


Figura V.14 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #40)

Prueba #41 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba centro de hoja)

Nota: Prueba con alta excentricidad y valores de elongación con alta variación, baja confiabilidad en los resultados obtenidos en esta prueba.

Tabla V.8 Datos obtenidos en prueba #41 Hole Drilling (M11)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	5.346	5.927	2.542	-62.63	-171.729	-73.118
0.075	5.591	5.857	3.23	31.291	-8.927	26.542
0.125	4.75	-0.835	3.522	41.967	-93.1	143.464
0.175	3.701	-8.947	3.645	42.471	-97.245	145.936
0.225	2.457	-14.674	3.555	40.762	-36.63	87.896
0.275	0.972	-17.642	3.251	16.095	19.081	39.274
0.325	-0.672	-19.714	2.807	-23.669	18.879	42.985
0.375	-2.327	-22.766	2.319	31.172	13.809	46.532
0.425	-3.882	-26.984	1.845	40.278	-13.197	68.259
0.475	-5.302	-30.547	1.392	39.149	-2.784	53.527
0.525	-6.622	-30.711	0.939	-41.73	-19.134	68.062
0.575	-7.887	-25.633	0.463	-44.153	-128.654	181.243
0.625	-9.122	-15.845	-0.035	-44.501	-227.413	284.453
0.675	-10.308	-4.431	-0.526	-44.547	-251.518	312.686
0.725	-11.404	4.352	-0.973	-44.371	-170.599	228.034
0.775	-12.378	7.407	-1.352	-41.227	-5.041	58.639
0.825	-13.239	4.731	-1.673	44.153	-111.528	161.21
0.875	-14.038	-0.4	-1.974	44.418	-170.416	227.459
0.925	-14.839	-3.527	-2.303	43.776	-63.426	143.88
0.975	-15.679	-2.375	-2.684	-43.369	-21.025	153.535

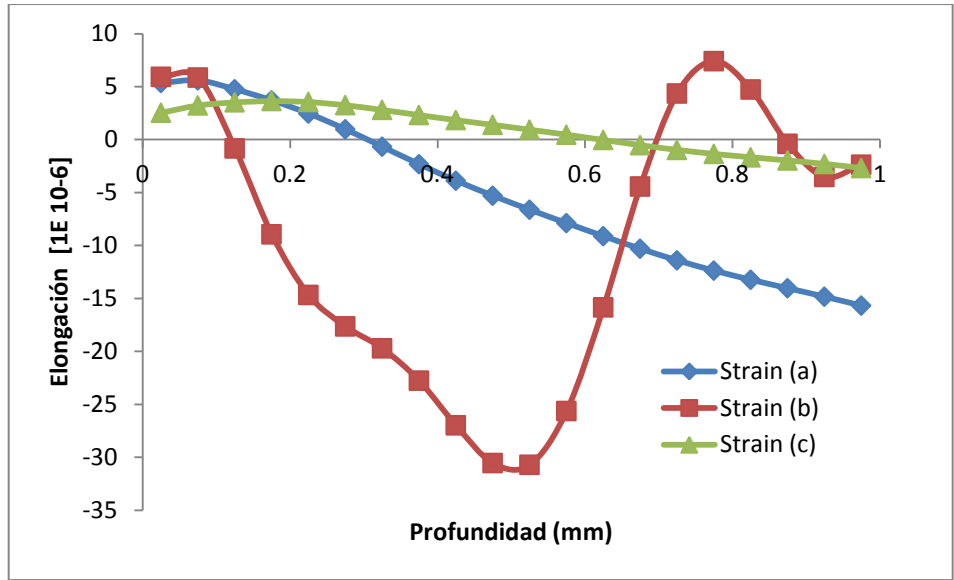


Figura V.15 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #41)

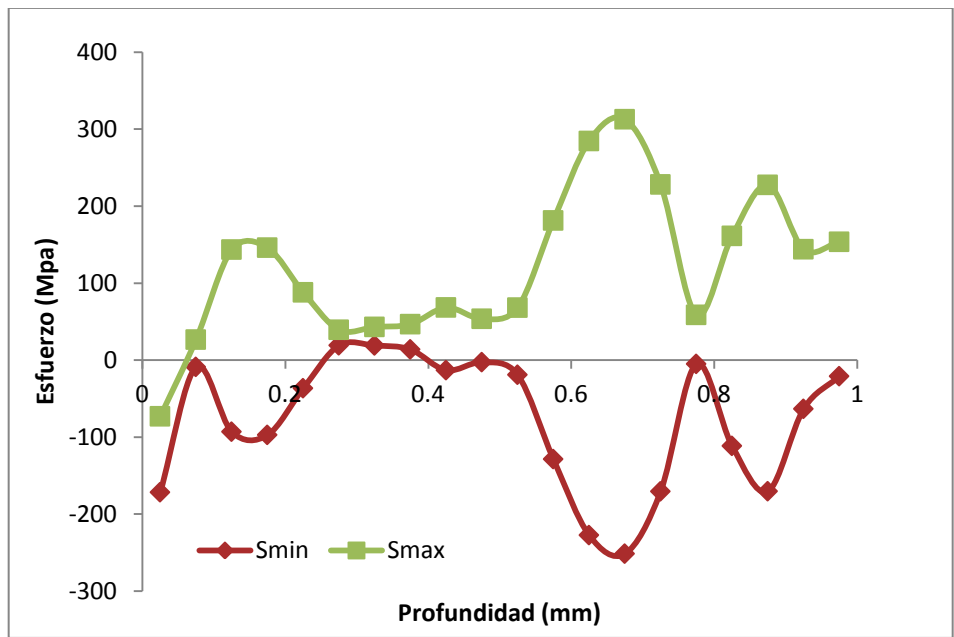


Figura V.16 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #41)

Prueba #42 Nivelada Acero Grado 050 (Prueba lado transmisión)

Tabla V.9 Datos obtenidos en prueba #42 Hole Drilling (M11)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.013	2.928	2.949	2.421	-66.362	-167.41	-139.718
0.062	5.186	6.203	3.787	-51.701	-45.934	10.064
0.113	6.055	8.626	3.953	-48.892	-23.525	33.469
0.162	6.547	10.905	3.985	-46.477	-16.163	34.403
0.212	6.74	13.005	3.933	-44.573	-8.817	34.657
0.262	6.707	14.896	3.741	-44.488	-11.288	27.418
0.312	6.621	16.665	3.451	-45.585	-6.677	30.433
0.363	6.634	18.427	3.147	-47.271	-7.537	26.183
0.413	6.777	20.238	2.877	-48.636	-13.341	22.057
0.438	6.874	21.157	2.753	-48.742	-13.664	21.621
0.488	7.047	22.974	2.501	-48.164	-12.264	22.847
0.538	7.121	24.708	2.21	-47.377	-12.553	25.323
0.588	7.092	26.324	1.868	-46.875	-8.769	29.074
0.613	7.061	27.093	1.682	-47.031	-7.482	29.962
0.663	7.038	28.585	1.3	-48.604	-10.78	27.555
0.713	7.151	30.076	0.928	-51.034	-14.892	24.158
0.763	7.44	31.619	0.58	-53.257	-20.135	21.828
0.813	7.866	33.229	0.257	-54.092	-30.089	17.305
0.863	8.338	34.884	-0.036	-53.126	-32.939	19.44
0.913	8.772	36.539	-0.278	-51.272	-37.601	18.402
0.988	9.279	38.931	-0.487	-47.781	-37.296	20.068

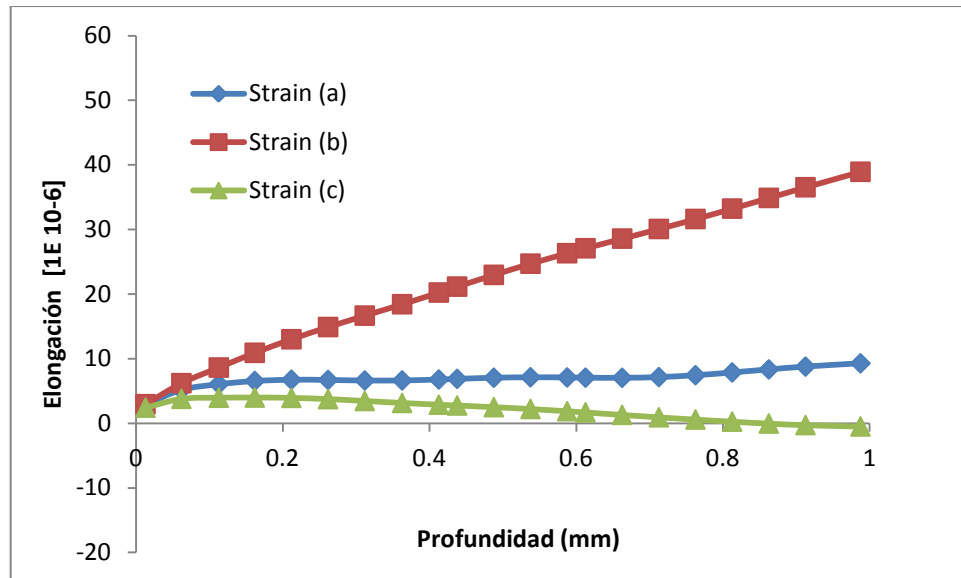


Figura V.17 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #42)

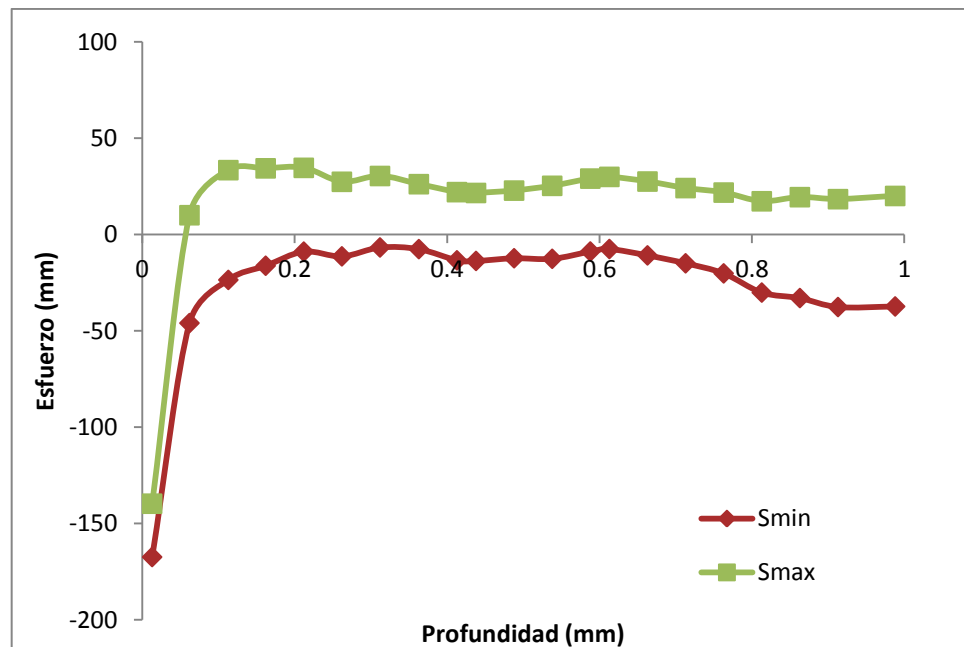


Figura V.18 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #42)

Anexo VI

Resultados obtenidos en pruebas Hole Drilling para hoja calibre 5/16”

Muestra #14 (Inicio de Rollo) con proceso de enderezado (pre-nivelado)

Prueba #46 Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

VI.1 Datos obtenidos en prueba #46 Hole Drilling (M14)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.415	2.352	1.296	-69.227	-67.489	-39.344
0.075	2.091	1.56	1.818	31.12	-11.908	26.027
0.125	1.057	0.386	2.243	23.756	-3.066	33.063
0.175	-0.301	-0.863	2.598	18.633	1.285	32.516
0.225	-2.199	-2.495	2.703	16.099	8.862	40.463
0.275	-4.816	-4.687	2.455	14.301	19.477	54.065
0.325	-8.077	-7.339	1.894	12.165	28.999	66.266
0.375	-11.693	-10.182	1.174	9.998	33.951	72.12
0.425	-15.311	-12.937	0.475	8.372	33.155	70.144
0.475	-18.659	-15.421	-0.073	7.789	27.747	62.341
0.525	-21.627	-17.583	-0.423	8.208	20.556	52.659
0.575	-24.258	-19.477	-0.611	9.135	15.294	45.851
0.625	-26.67	-21.21	-0.722	9.849	14.385	44.441
0.675	-28.967	-22.873	-0.84	10.346	18.559	48.707
0.725	-31.171	-24.507	-1.013	11.449	23.744	53.498
0.775	-33.215	-26.092	-1.228	14.182	28.205	56.758
0.825	-35.001	-27.566	-1.427	18.89	24.803	52.203
0.875	-36.473	-28.861	-1.535	23.496	13.569	41.004
0.925	-37.678	-29.944	-1.5	24.135	-0.472	28.01
0.975	-38.757	-30.832	-1.325	18.572	-2.472	27.659

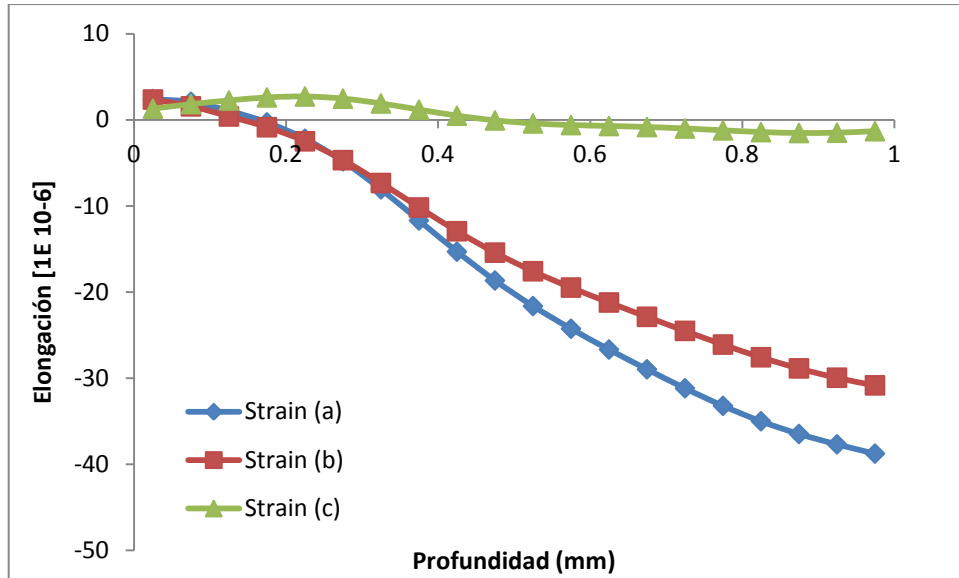


Figura VI.1 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #46)

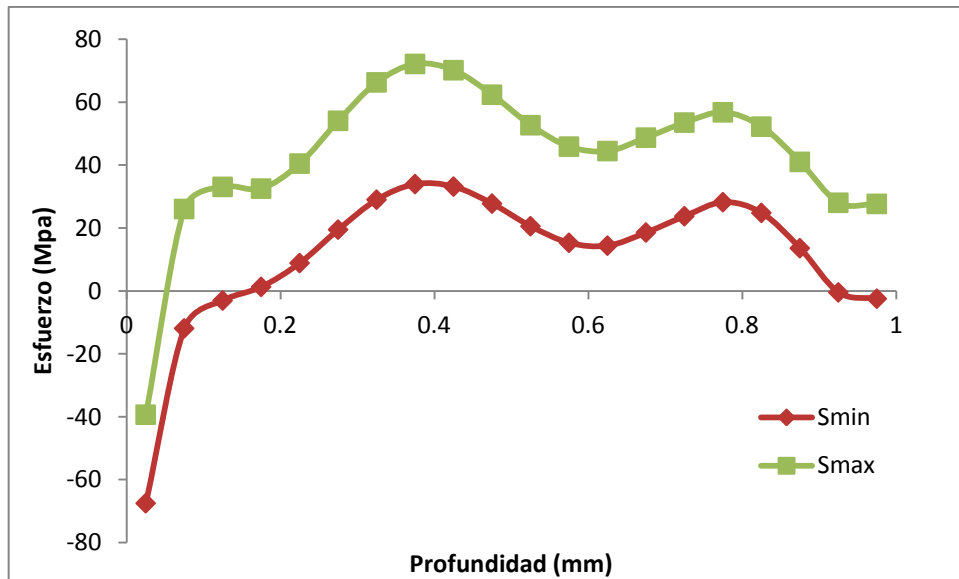


Figura VI.2 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #46)

Prueba #48 Acero Grado 050 (Prueba centro de hoja)

VI.2 Datos obtenidos en prueba #48 Hole Drilling (M14)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	7.165	6.005	4.066	-82.958	-171.6	-117.76
0.075	7.904	4.958	4.485	43.677	-13.767	38.666
0.125	7.268	2.568	4.3	38.316	2.449	57.311
0.175	6.643	0.504	4.011	38.211	5.695	41.872
0.225	5.79	-1.725	3.442	38.953	10.059	40.23
0.275	4.317	-4.833	2.51	38.382	13.788	54.17
0.325	2.263	-8.815	1.34	37.694	14.434	67.525
0.375	0.03	-13.002	0.132	37.277	14.226	68.398
0.425	-1.978	-16.671	-1.002	37.109	15.185	56.055
0.475	-3.691	-19.669	-2.099	37.342	18.831	43.61
0.525	-5.459	-22.633	-3.307	37.733	24.1	48.267
0.575	-7.882	-26.682	-4.8	37.453	32.2	84.76
0.625	-11.477	-32.784	-6.698	37.146	43.329	151.008
0.675	-16.373	-41.128	-9.048	36.954	62.478	230.894
0.725	-22.207	-50.906	-11.837	36.818	90.178	292.822
0.775	-28.265	-60.615	-15.025	36.741	132.581	316.895
0.825	-33.798	-68.775	-18.553	36.901	180.246	291.041
0.875	-38.328	-74.627	-22.292	45.687	222.408	233.494
0.925	-41.78	-78.42	-25.991	-56.606	167.341	237.35
0.975	-44.354	-81.057	-29.267	-57.654	138.3	223.876

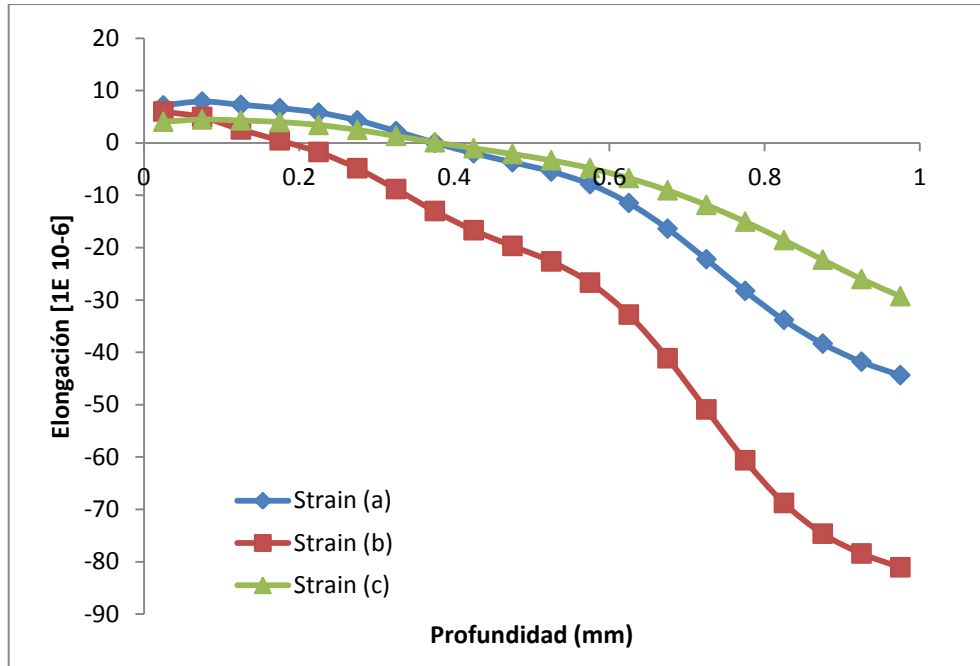


Figura VI.3 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #48)

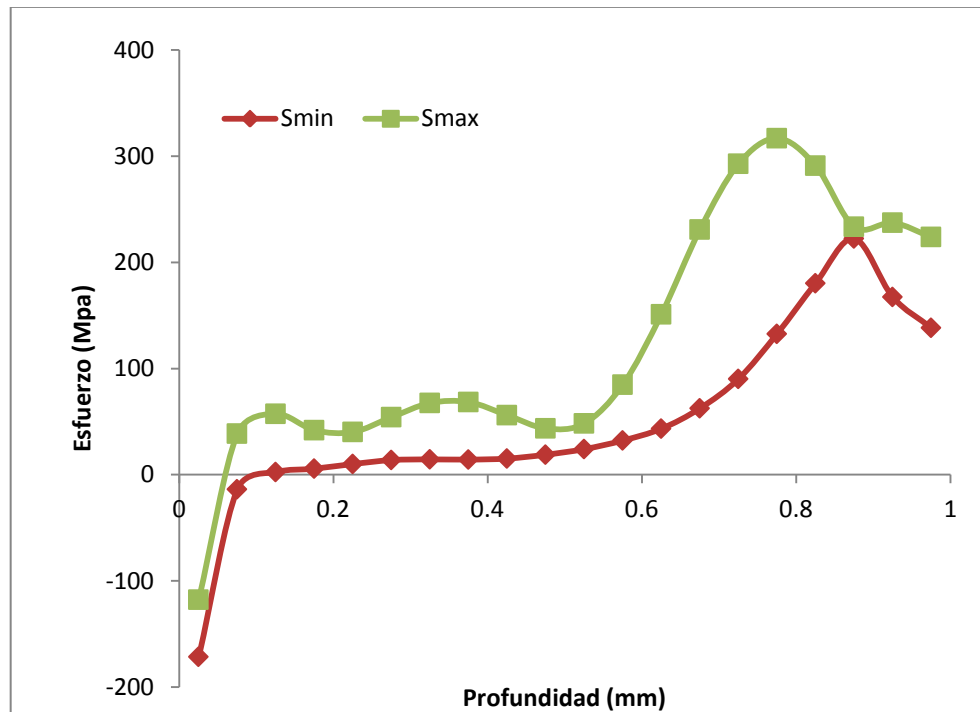


Figura VI.4 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #46)

Prueba #47 Acero Grado 050 (Prueba lado transmisión)

VI.3 Datos obtenidos en prueba #47 Hole Drilling (M14)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.176	2.797	2.283	-42.313	-64.48	-46.017
0.075	1.982	1.909	2.398	40.557	-3.199	25.089
0.125	0.887	0.059	1.739	39.149	12.88	39.743
0.175	-0.573	-1.982	0.848	35.715	17.721	38.32
0.225	-2.341	-4.254	-0.149	32.288	18.777	39.012
0.275	-4.484	-6.932	-1.26	30.851	19.867	44.393
0.325	-6.984	-10.027	-2.461	30.331	20.917	50.762
0.375	-9.707	-13.384	-3.682	29.995	21.189	54.902
0.425	-12.481	-16.804	-4.847	29.809	20.37	55.772
0.475	-15.186	-20.159	-5.928	29.948	19.355	55.04
0.525	-17.794	-23.422	-6.956	30.332	19.488	54.98
0.575	-20.346	-26.621	-7.982	30.563	22.38	57.795
0.625	-22.884	-29.765	-9.023	30.121	27.061	62.474
0.675	-25.396	-32.8	-10.031	28.787	31.827	67.198
0.725	-27.807	-35.627	-10.916	26.897	31.566	66.809
0.775	-30.026	-38.171	-11.605	25.306	27.96	63.348
0.825	-32.015	-40.44	-12.105	25.062	21.847	57.974
0.875	-33.826	-42.55	-12.524	26.473	22.823	60.405
0.925	-35.574	-44.655	-13.018	28.928	38.779	78.425
0.975	-37.354	-46.845	-13.683	31.078	78.708	120.124

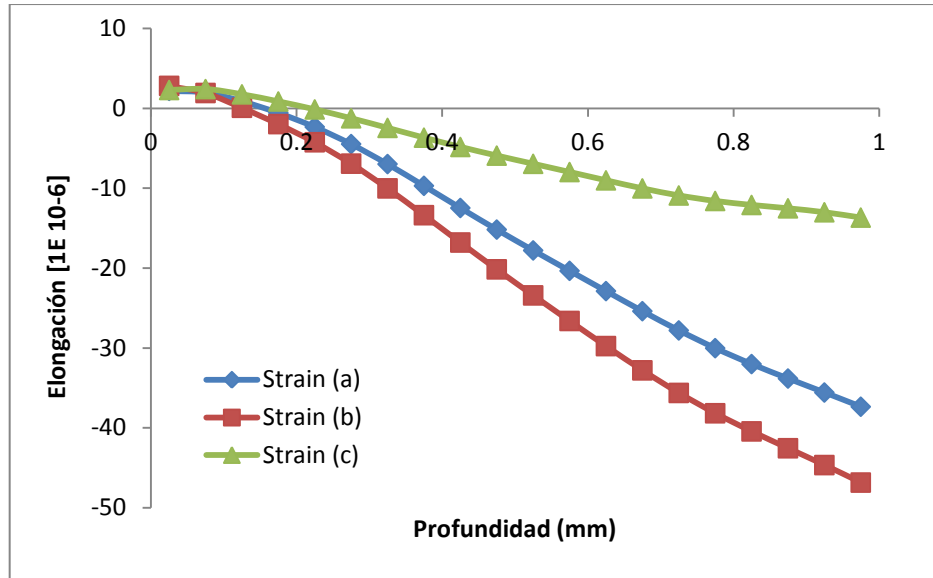


Figura VI.5 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #47)

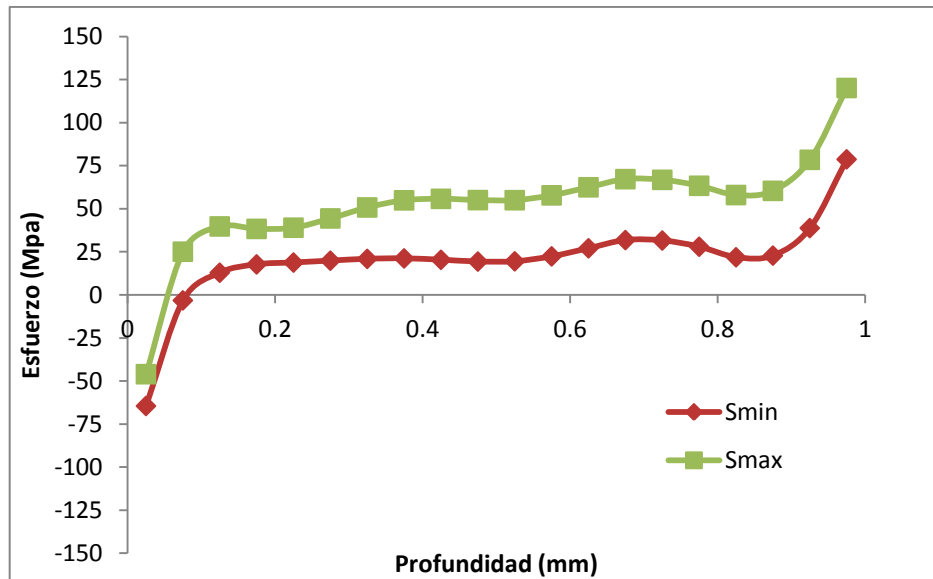


Figura VI.6 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #47)

Muestra #16 (Inicio de Rollo) Nivelada Acero HSLA Grado 50

Prueba #64 Acero Grado 050 (Prueba lado operador)

VI.4 Datos obtenidos en prueba #64 Hole Drilling (M16)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.158	2.829	3.209	-7.763	-89.531	-68.528
0.075	1.996	2.462	4.144	29.462	-12.313	19.903
0.125	0.913	1.257	4.464	26.246	5.978	37.457
0.175	-0.185	0.02	4.575	27.183	8.249	31.479
0.225	-0.954	-1.084	4.524	37.11	6.13	22.264
0.275	-1.452	-2.135	4.289	50.583	4.061	18.695
0.325	-1.884	-3.246	3.878	55.893	4.383	19.689
0.375	-2.421	-4.48	3.334	54.221	7.745	22.907
0.425	-3.123	-5.829	2.718	49.203	11.575	26.267
0.475	-3.948	-7.237	2.083	44.257	14.213	28.842
0.525	-4.806	-8.626	1.467	41.753	14.606	29.051
0.575	-5.616	-9.926	0.89	41.541	14.172	27.756
0.625	-6.338	-11.091	0.361	42.631	13.111	24.906
0.675	-6.975	-12.106	-0.119	43.207	13.295	22.7
0.725	-7.558	-12.987	-0.55	41.029	13.472	20.407
0.775	-8.112	-13.762	-0.935	34.269	15.496	20.923
0.825	-8.648	-14.47	-1.28	28.709	16.867	22.486
0.875	-9.156	-15.139	-1.6	30.639	18.519	25.314
0.925	-9.62	-15.786	-1.916	37.545	20.276	28.507
0.975	-10.043	-16.414	-2.248	44.972	29.523	38.428

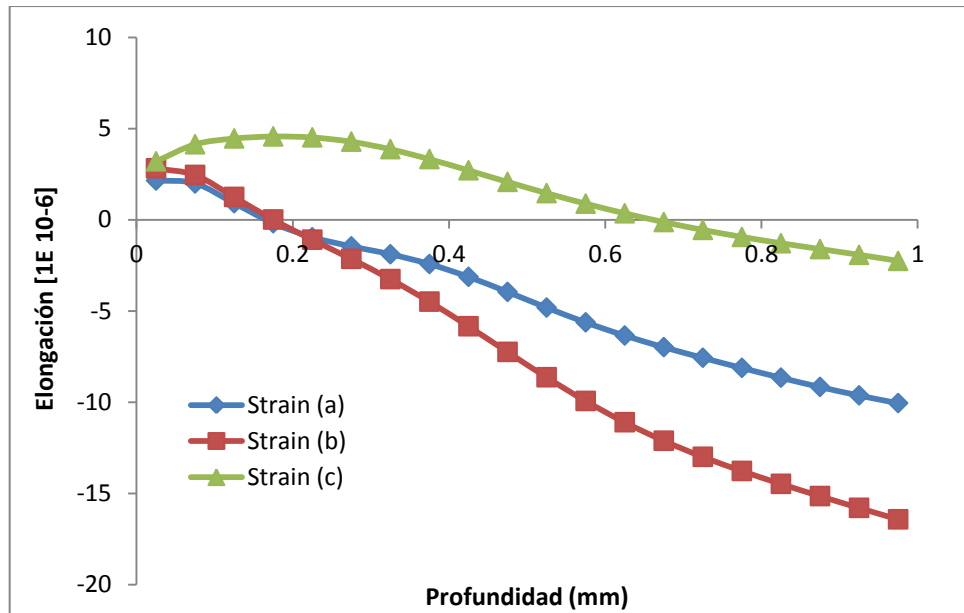


Figura VI.7 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #64)

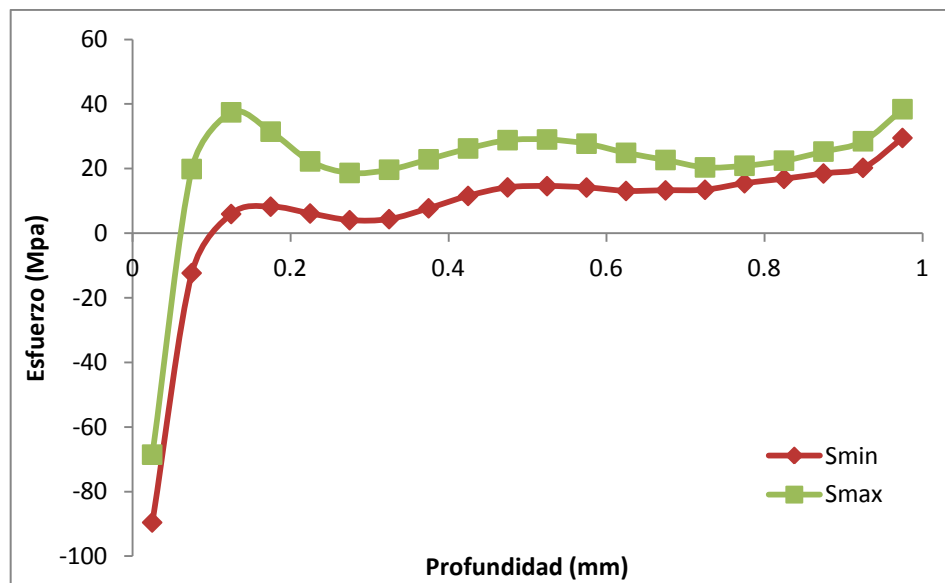


Figura VI.8 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #64)

Prueba #65 Acero Grado 050 (Prueba centro de hoja)

VI.5 Datos obtenidos en prueba #65 Hole Drilling (M16)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.53	2.864	2.585	-28.396	-79.62	-42.268
0.075	1.733	2.959	3.296	35.224	-10.684	7.716
0.125	1.54	2.651	3.721	32.746	-2.199	15.35
0.175	1.235	2.306	3.991	30.233	2.076	13.777
0.225	0.871	1.84	4.006	37.227	6.148	14.316
0.275	0.439	1.215	3.801	45.613	8.786	16.534
0.325	-0.061	0.5	3.51	44.679	9.411	17.249
0.375	-0.611	-0.219	3.25	37.711	8.719	16.409
0.425	-1.179	-0.898	3.047	30.994	7.645	15.184
0.475	-1.739	-1.548	2.851	29.451	7.777	14.777
0.525	-2.273	-2.194	2.598	34.668	9.169	15.155
0.575	-2.776	-2.841	2.27	43.86	11.3	16.492
0.625	-3.246	-3.456	1.909	49.838	12.476	16.756
0.675	-3.684	-3.987	1.586	44.031	12.751	15.157
0.725	-4.094	-4.404	1.342	-0.015	10.453	12.356
0.775	-4.479	-4.73	1.152	-17.667	9.274	12.941
0.825	-4.848	-5.04	0.926	-29.784	13.313	16.512
0.875	-5.211	-5.419	0.574	-74.314	24.119	26.95
0.925	-5.578	-5.901	0.075	85.146	36.156	43.351
0.975	-5.952	-6.434	-0.479	79.978	49.846	58.812

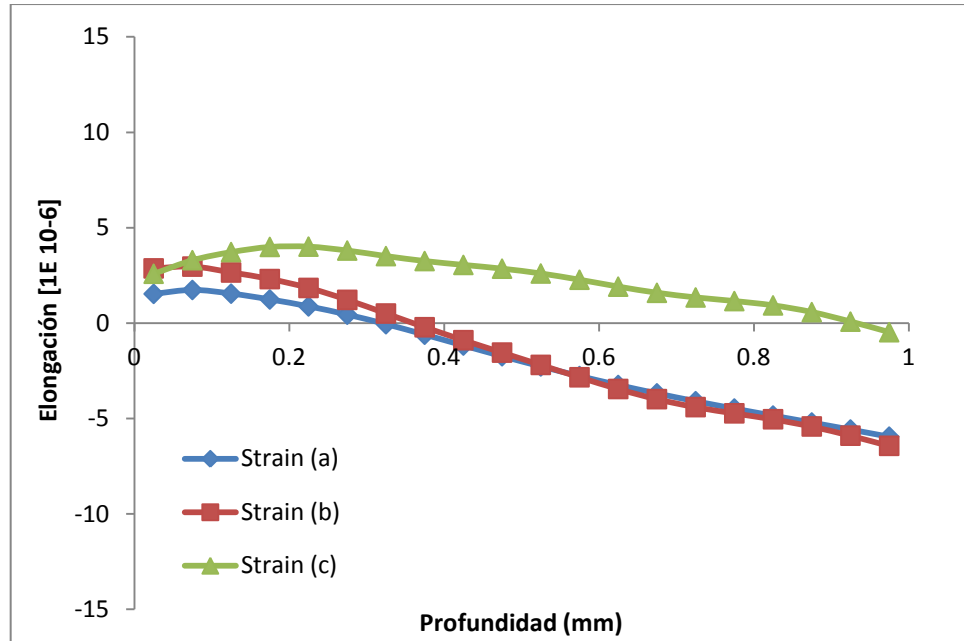


Figura VI.9 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #65)

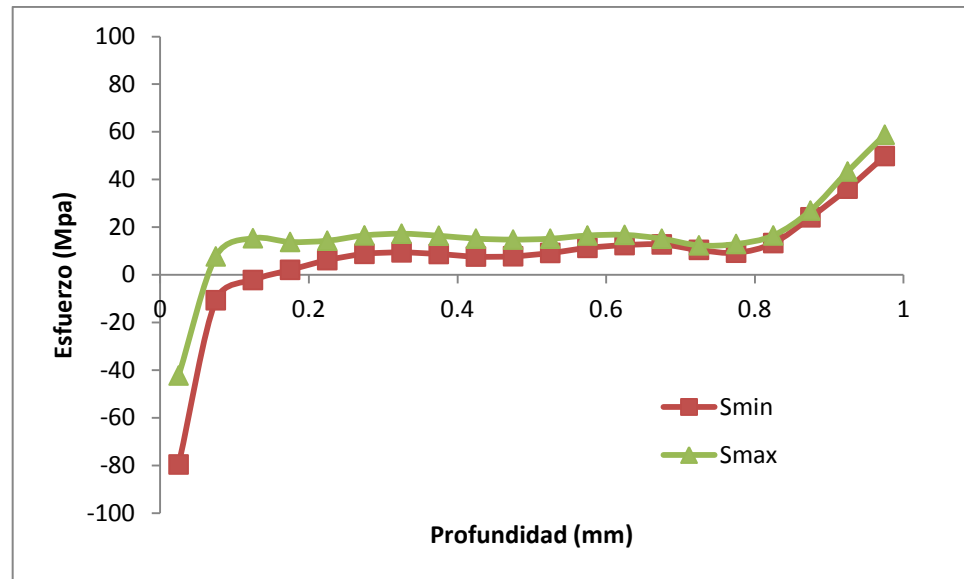


Figura VI.10 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #65)

Prueba #66 Acero Grado 050 (Prueba lado transmisión)

VI.6 Datos obtenidos en prueba #66 Hole Drilling (M16)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.755	2.293	1.47	-82.161	-83.493	-54.9
0.075	2.997	1.732	1.502	45.27	-5.949	22.73
0.125	2.639	0.519	1.161	41.451	4.662	34.628
0.175	2.087	-0.825	0.72	39.893	7.057	32.456
0.225	1.38	-2.257	0.178	38.709	9.653	31.231
0.275	0.553	-3.769	-0.474	38.591	12.404	31.301
0.325	-0.315	-5.298	-1.192	39.461	13.526	30.376
0.375	-1.161	-6.766	-1.908	40.029	13.204	28.219
0.425	-1.961	-8.121	-2.568	39.044	12.289	25.415
0.475	-2.733	-9.357	-3.155	35.887	12.073	23.531
0.525	-3.51	-10.5	-3.689	31.131	12.794	23.084
0.575	-4.307	-11.586	-4.199	27.15	15.049	24.852
0.625	-5.119	-12.637	-4.706	25.672	17.473	27.141
0.675	-5.915	-13.655	-5.208	26.911	19.73	29.582
0.725	-6.665	-14.619	-5.682	28.889	19.365	29.551
0.775	-7.347	-15.499	-6.102	29.421	18.565	28.889
0.825	-7.958	-16.269	-6.452	27.05	16.792	26.536
0.875	-8.509	-16.919	-6.74	20.202	16.849	25.064
0.925	-9.018	-17.457	-6.996	6.117	19.663	26.313
0.975	-9.499	-17.915	-7.255	-12.733	30.341	36.864

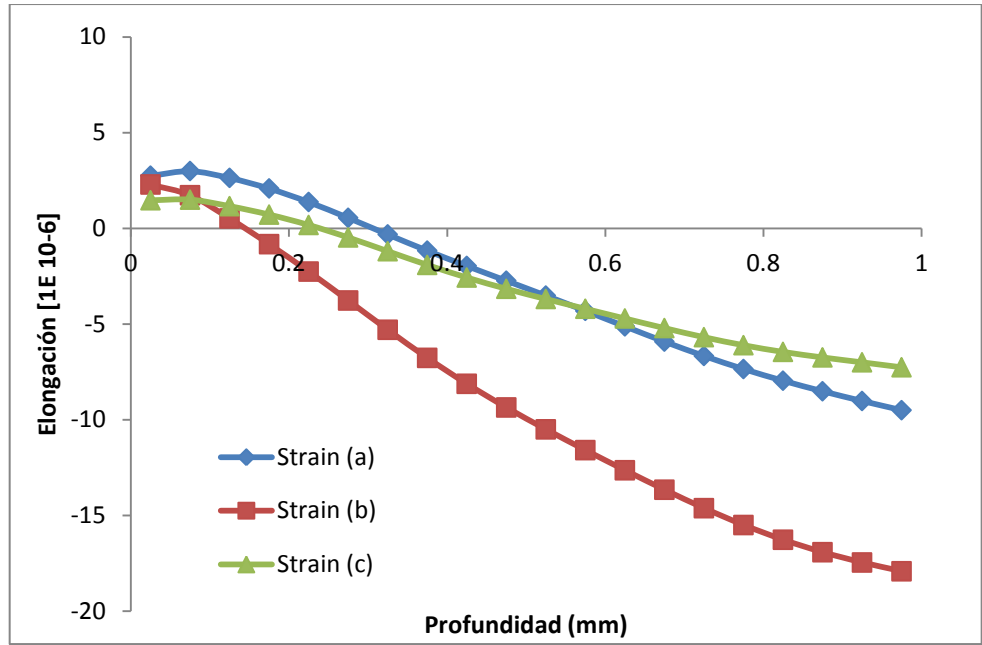


Figura VI.11 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #66)

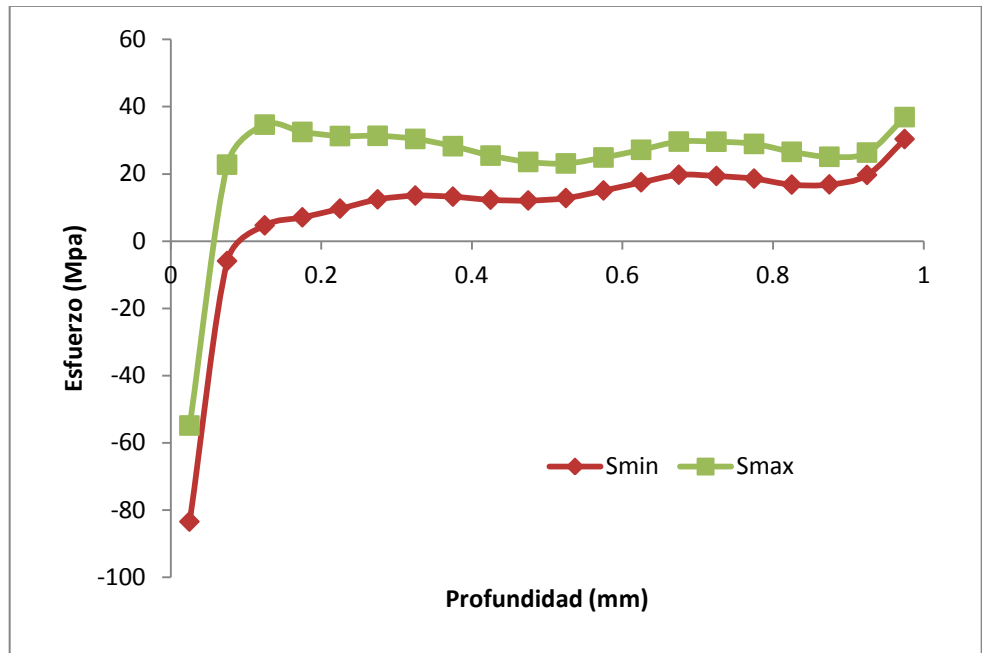


Figura VI.12 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #66)

Muestra #17 (Zona centro de Rollo) Nivelada Acero HSLA Grado 50

Prueba #58 Acero Grado 50 (Prueba lado operador)

Nota: Prueba con falla en el equipo, se detuvo varias ocasiones en una posición, con el taladro encendido lo que ocasiona picos y variaciones en los valores obtenidos de esfuerzos. (Gráfica de esfuerzos modificada)

VI.7 Datos obtenidos en prueba #58 Hole Drilling (M17)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.837	14.613	10.972	-31.09	-331.876	-31.694
0.075	3.604	21.158	20.329	-2.34	-149.071	-32.087
0.125	4.213	25.302	23.619	-38.061	-20.451	13.787
0.175	4.977	30.469	27.318	-37.511	-42.611	12.88
0.225	5.563	35.748	31.797	-28.025	-51.832	1.828
0.275	5.846	39.884	35.235	-28.97	-26.62	7.676
0.325	6.03	43.161	37.551	-40.115	-9.614	14.114
0.375	6.319	46.595	40.019	-36.625	-20.774	7.346
0.425	6.675	50.533	43.25	-27.857	-43.202	-3.734
0.475	6.901	54.359	46.524	-25.528	-45.442	-3.089
0.525	6.908	57.315	48.922	-28.309	-22.443	6.556
0.575	6.829	59.366	50.548	-30.478	-1.825	10.156
0.625	6.842	61.159	52.281	-3.901	-13.227	-2.639
0.675	6.91	63.216	54.46	-10.284	-39.511	-15.085
0.725	6.805	65.434	56.425	-25.679	-39.547	-0.526
0.775	6.498	67.644	57.947	-33.556	-29.54	24.585
0.825	6.395	70.456	60.471	-23.942	-101.308	-30.89
0.875	6.777	74.501	64.897	-16.349	-252.988	-143.083
0.925	6.975	78.226	68.084	-28.494	-152.463	-45.442
0.975	6.522	79.547	68.49	-53.742	142.856	187.402

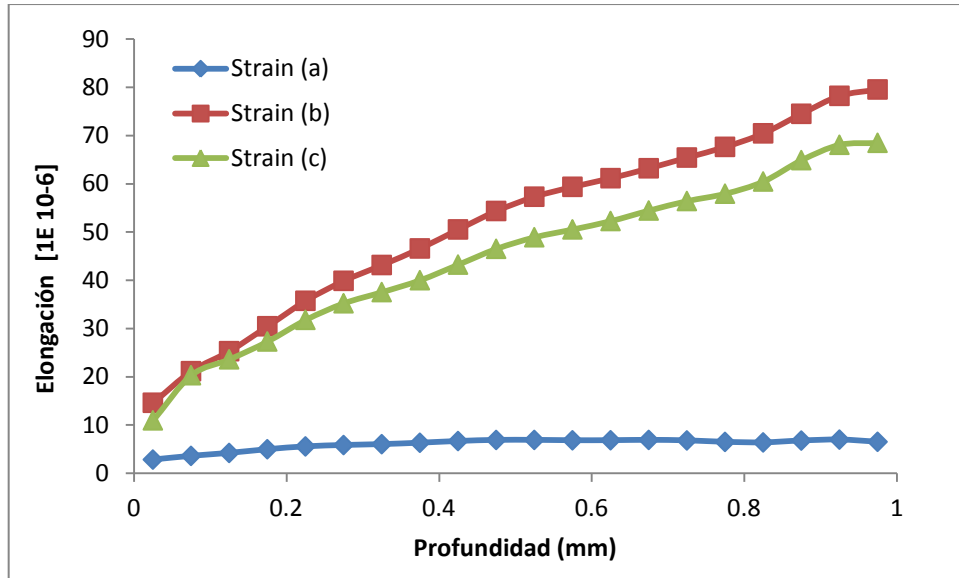


Figura VI.13 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #58)

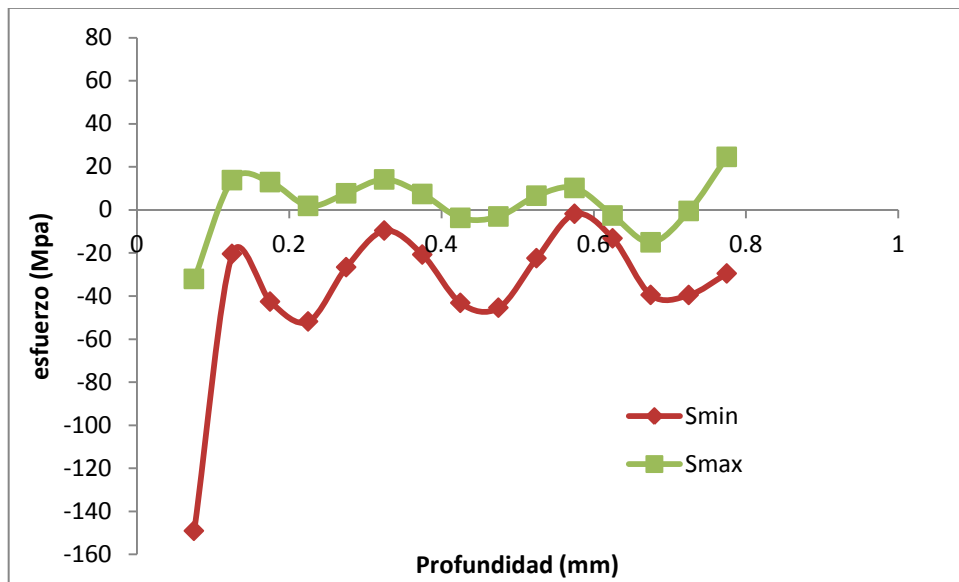


Figura VI.14 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #58)

Prueba #60 Acero Grado 50 (Prueba centro de hoja)

VI.8 Datos obtenidos en prueba #60 Hole Drilling (M17)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.097	2.071	-1.44	-75.645	-65.274	22.36
0.075	3.856	1.835	-1.675	51.112	-13.41	8.601
0.125	4.265	1.534	-2.091	51.103	-1.905	9.476
0.175	4.85	1.417	-2.905	88.457	-0.405	11.063
0.225	5.466	1.264	-3.991	-86.506	-0.535	14.864
0.275	5.854	0.905	-5.235	-87.431	4.295	17.769
0.325	5.914	0.332	-6.608	-85.584	10.719	21.127
0.375	5.738	-0.345	-8.116	-78.165	15.029	25.057
0.425	5.504	-0.995	-9.749	-72.784	15.317	28.775
0.475	5.353	-1.538	-11.457	-71.803	12.784	30.947
0.525	5.313	-1.966	-13.169	-72.041	9.987	31.379
0.575	5.306	-2.338	-14.829	-72.078	9.614	31.584
0.625	5.217	-2.737	-16.428	-71.246	13.288	33.542
0.675	4.971	-3.226	-18.002	-69.73	20.837	39.108
0.725	4.572	-3.822	-19.611	-68.857	29.611	47.51
0.775	4.094	-4.493	-21.294	-69.839	38.266	58.427
0.825	3.628	-5.179	-23.031	-71.719	43.39	67.379
0.875	3.225	-5.826	-24.744	-73.025	45.291	72.395
0.925	2.872	-6.409	-26.319	-73.128	44.757	70.965
0.975	2.526	-6.931	-27.673	-71.463	50.428	70.971

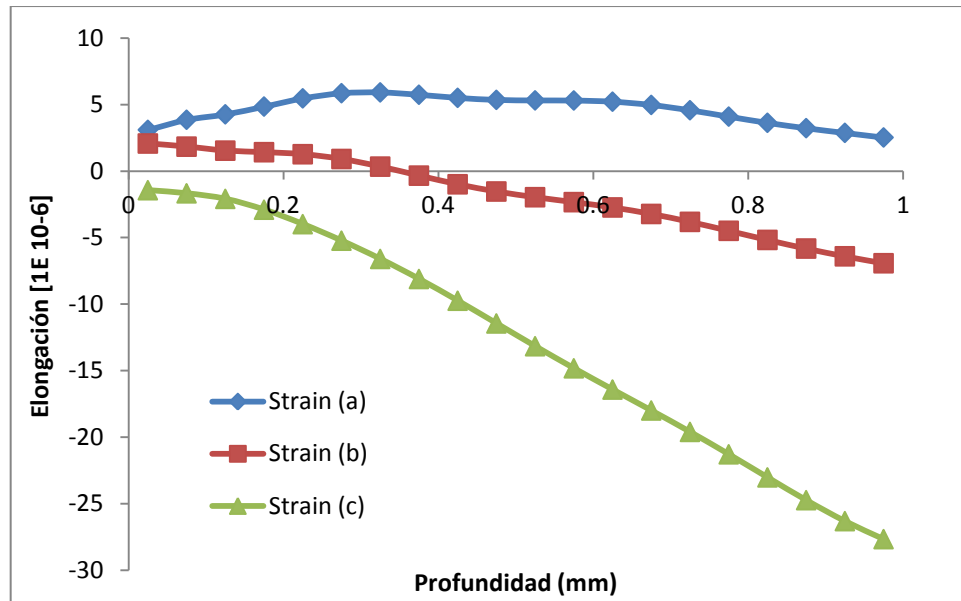


Figura VI.15 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #60)

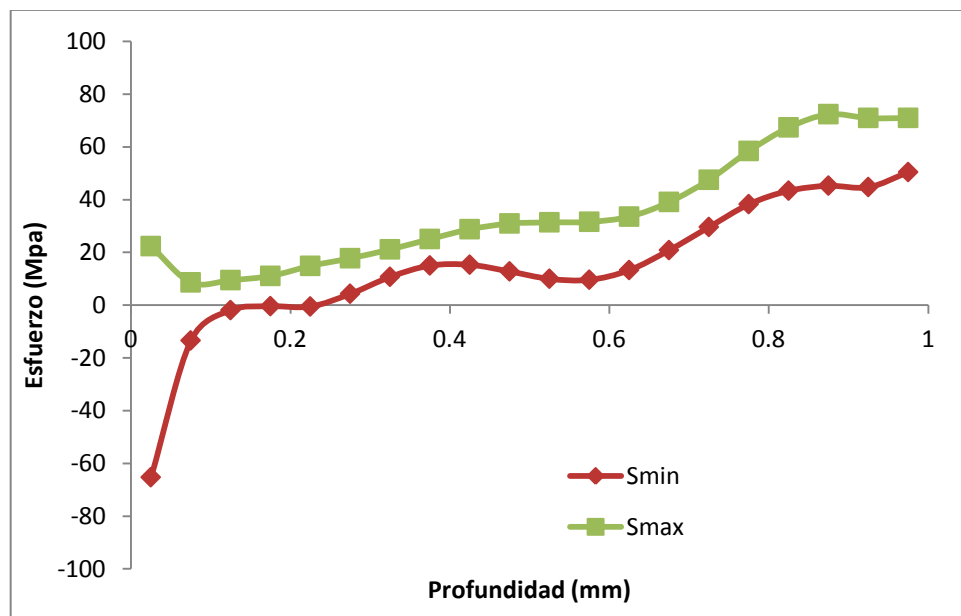


Figura VI.16 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #60)

Prueba #59 Acero Grado 50 (Prueba lado transmisión)

VI.9 Datos obtenidos en prueba #59 Hole Drilling (M17)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.066	0.762	0.081	-79.501	-23.036	-5.728
0.075	1.171	0.623	0.256	35.122	-5.598	4.314
0.125	0.87	0.229	0.458	23.599	-3.016	9.901
0.175	0.448	-0.319	0.463	26.032	1.139	11.26
0.225	0.023	-1.037	0.212	38.641	3.957	12.434
0.275	-0.377	-1.908	-0.215	48.142	4.116	14.047
0.325	-0.761	-2.865	-0.694	49.53	3.151	14.549
0.375	-1.155	-3.827	-1.14	47.15	2.572	13.881
0.425	-1.587	-4.74	-1.54	43.281	3.342	13.055
0.475	-2.078	-5.595	-1.932	38.78	5.749	13.103
0.525	-2.635	-6.415	-2.368	34.47	9.358	14.363
0.575	-3.239	-7.22	-2.87	32.352	13.141	16.401
0.625	-3.854	-8.006	-3.41	34.585	15.53	17.902
0.675	-4.432	-8.74	-3.926	37.032	15.446	17.788
0.725	-4.933	-9.381	-4.358	34.564	12.33	14.99
0.775	-5.348	-9.909	-4.681	29.304	8.513	11.488
0.825	-5.696	-10.346	-4.922	25.01	5.932	9.092
0.875	-6.023	-10.749	-5.146	24.905	8.337	11.392
0.925	-6.369	-11.171	-5.415	30.616	16.672	19.485
0.975	-6.744	-11.627	-5.744	39.415	30.32	32.753

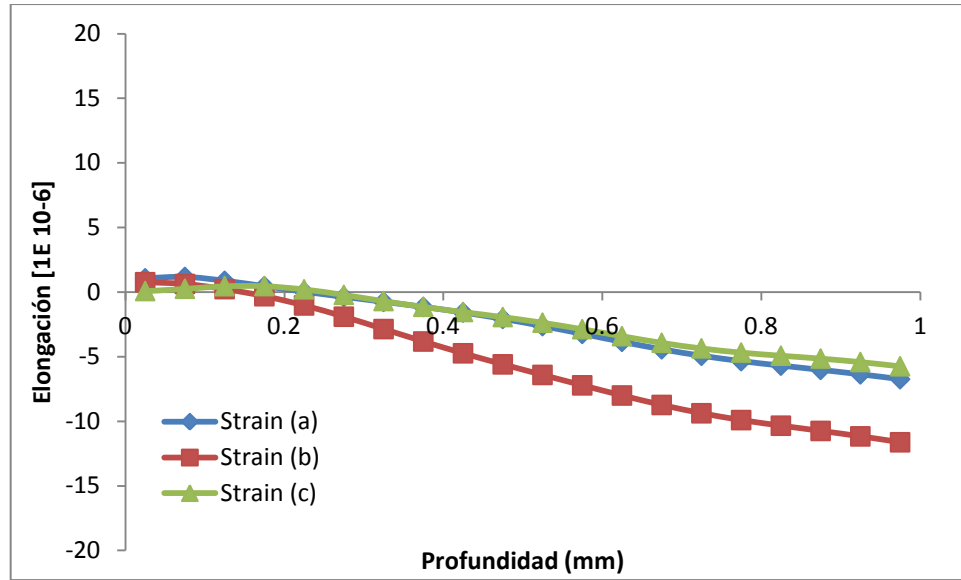


Figura VI.17 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #59)

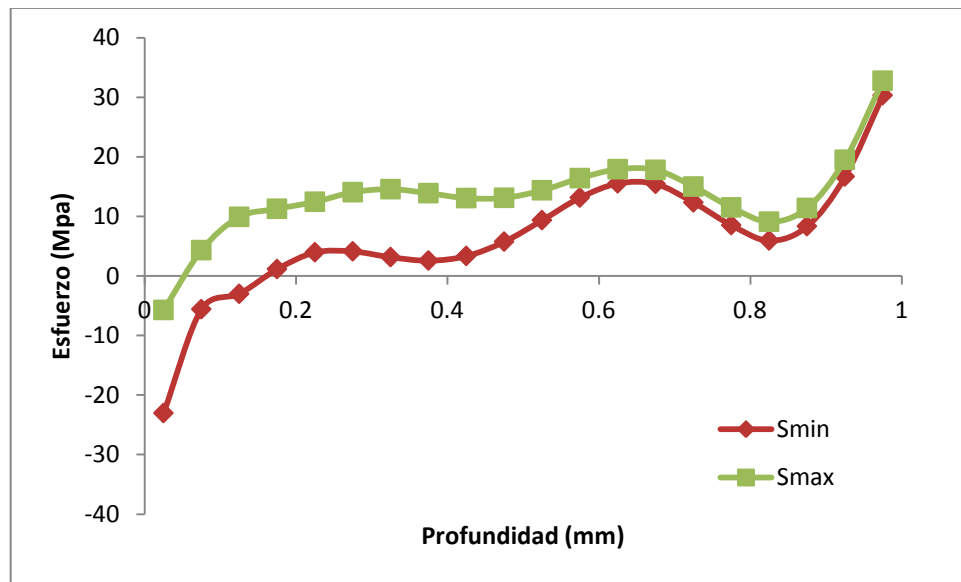


Figura VI.18 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #59)

Muestra #15 (Zona final de Rollo) Nivelada Acero HSLA Grado 50

Prueba #67 Acero Grado 50 (Prueba lado operador)

VI.10 Datos obtenidos en prueba #67 Hole Drilling (M15)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.735	2.85	1.05	-51.617	-71.069	-12.376
0.075	2.606	4.721	1.904	-43.388	-30.606	-2.202
0.125	3.671	6.37	2.635	-52.937	-23.025	-7.137
0.175	4.686	7.778	3.174	-60.972	-16.491	-4.694
0.225	5.404	8.899	3.519	-57.116	-8.482	0.965
0.275	5.838	9.794	3.723	-49.249	-2.989	5.493
0.325	6.156	10.574	3.86	-47.29	-1.684	6.416
0.375	6.51	11.321	3.978	-52.545	-3.162	4.22
0.425	6.953	12.059	4.095	-61.101	-5.661	1.426
0.475	7.434	12.767	4.194	-65.497	-6.967	0.431
0.525	7.847	13.411	4.244	-62.336	-5.682	2.166
0.575	8.103	13.969	4.221	-53.842	-2.046	7.298
0.625	8.174	14.441	4.118	-46.783	2.226	14.413
0.675	8.098	14.841	3.952	-43.614	5.598	20.538
0.725	7.959	15.189	3.756	-43.185	6.641	22.324
0.775	7.848	15.495	3.571	-45.065	5.611	19.168
0.825	7.82	15.762	3.423	-50.354	1.877	11.225
0.875	7.871	15.989	3.32	-62.551	-2.246	3.313
0.925	7.949	16.177	3.24	-75.646	-3.053	0.887
0.975	7.975	16.326	3.149	-61.195	6.789	10.546

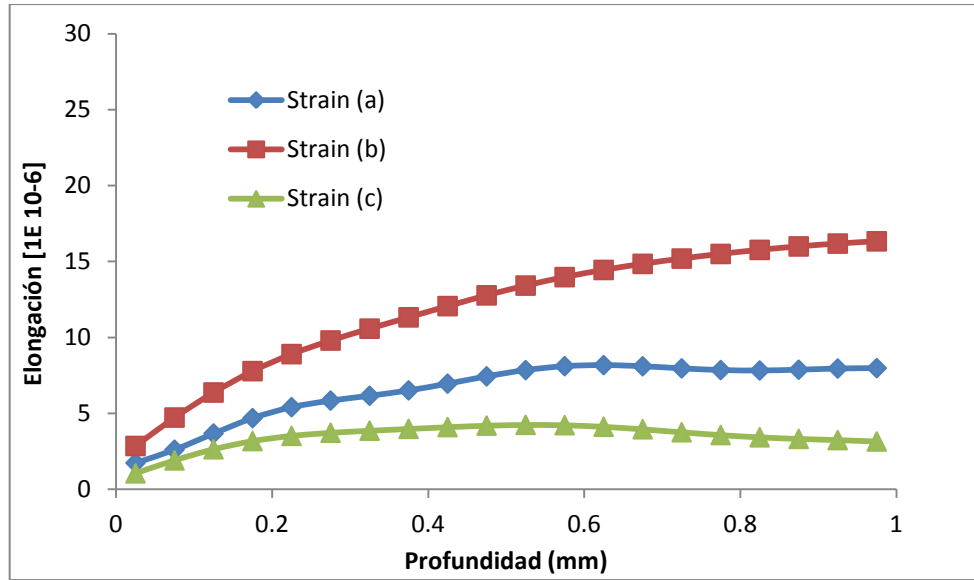


Figura VI.19 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #67)

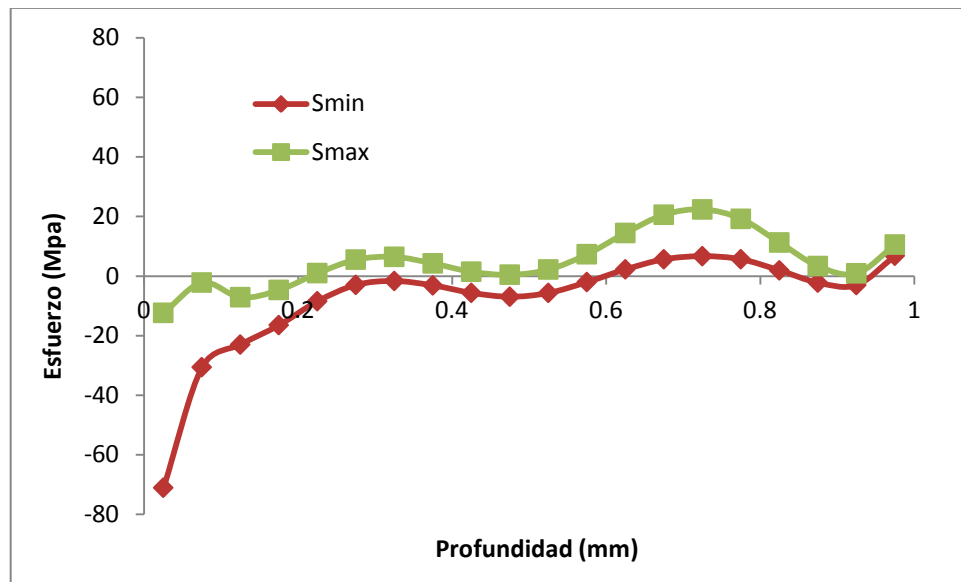


Figura VI.20 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #67)

Prueba #68 Acero Grado 50 (Prueba centro de hoja)

VI.11 Datos obtenidos en prueba #68 Hole Drilling (M15)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.354	3.369	2.11	-67.172	-100.483	-65.187
0.075	4.511	4.162	2.595	76.314	-12.974	-3.077
0.125	5.809	5.015	3.557	49.026	-22.843	-10.569
0.175	7.202	6.028	4.741	44.253	-25.118	-15.113
0.225	8.308	6.85	5.64	45.718	-14.083	-8.654
0.275	9.002	7.327	6.138	48.019	-1.908	0.978
0.325	9.398	7.527	6.414	38.812	3.212	6.741
0.375	9.654	7.581	6.673	33.062	1.629	8.095
0.425	9.852	7.564	6.978	31.679	-1.708	7.344
0.475	9.968	7.463	7.234	31.978	-0.942	8.545
0.525	9.922	7.214	7.294	33.559	5.809	13.543
0.575	9.663	6.772	7.078	37.042	17.137	22.364
0.625	9.207	6.155	6.634	39.863	27.26	31.145
0.675	8.648	5.447	6.118	35.882	30.673	35.521
0.725	8.114	4.768	5.703	31.661	23.433	31.312
0.775	7.706	4.213	5.486	30.289	10.343	21.362
0.825	7.452	3.813	5.436	30.857	-2.936	8.929
0.875	7.299	3.519	5.431	33.69	-5.619	3.873
0.925	7.142	3.231	5.338	40.687	7.952	13.894
0.975	6.888	2.856	5.111	44.582	38.16	42.981

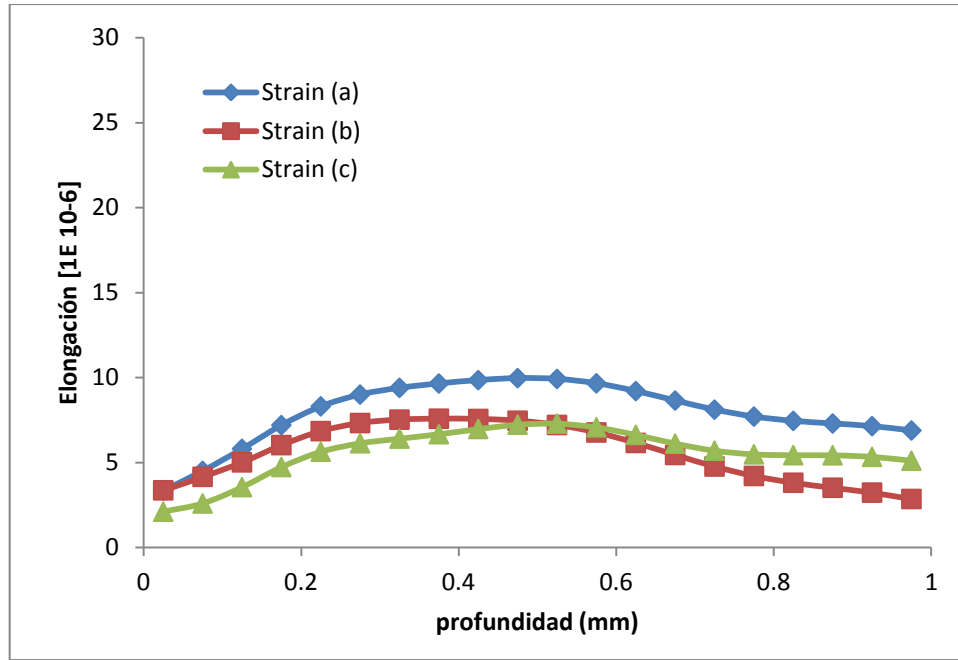


Figura VI.21 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #68)

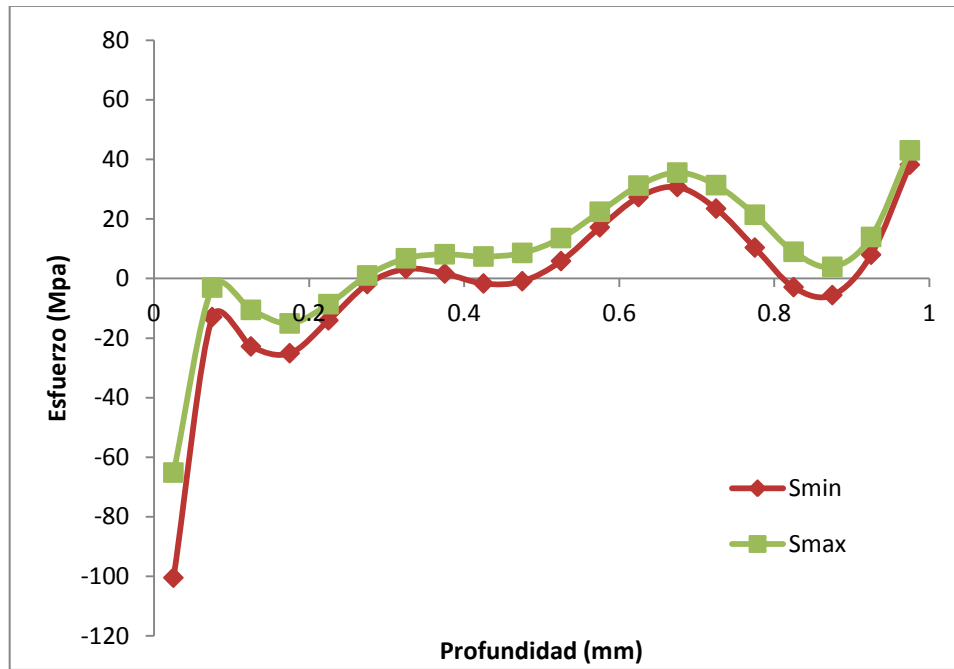


Figura VI.22 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #68)

Prueba #69 Acero Grado 50 (Prueba lado transmisión)

VI.13 Datos obtenidos en prueba #69 Hole Drilling (M15)

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.727	1.978	1.419	-55.407	-59.01	-41.006
0.075	2.728	3.213	2.8	2.447	-30.134	-21.912
0.125	3.418	4.3	4.342	5.522	-27.72	-12.149
0.175	3.959	5.194	5.723	8.128	-20.562	-7.213
0.225	4.393	5.744	6.653	22.915	-9.461	-1.888
0.275	4.747	5.931	7.08	54.403	-1.973	5.792
0.325	5.056	5.861	7.139	65.98	0.56	11.969
0.375	5.355	5.677	7.019	69.045	0.754	13.625
0.425	5.656	5.475	6.854	69.727	-0.175	12.286
0.475	5.949	5.268	6.676	69.457	-0.784	11.023
0.525	6.208	5.01	6.442	69.089	-0.151	12.124
0.575	6.415	4.645	6.096	68.874	2.12	16.264
0.625	6.573	4.164	5.631	68.519	4.721	21.458
0.675	6.706	3.614	5.111	67.37	5.473	24.122
0.725	6.842	3.078	4.64	65	2.424	21.198
0.775	6.992	2.623	4.302	60.863	-2.44	14.59
0.825	7.131	2.259	4.102	54.982	-6.888	7.593
0.875	7.211	1.93	3.954	49.998	-3.474	8.89
0.925	7.19	1.551	3.732	51.529	12.642	23.711
0.975	7.072	1.074	3.351	61.519	41.894	53.928

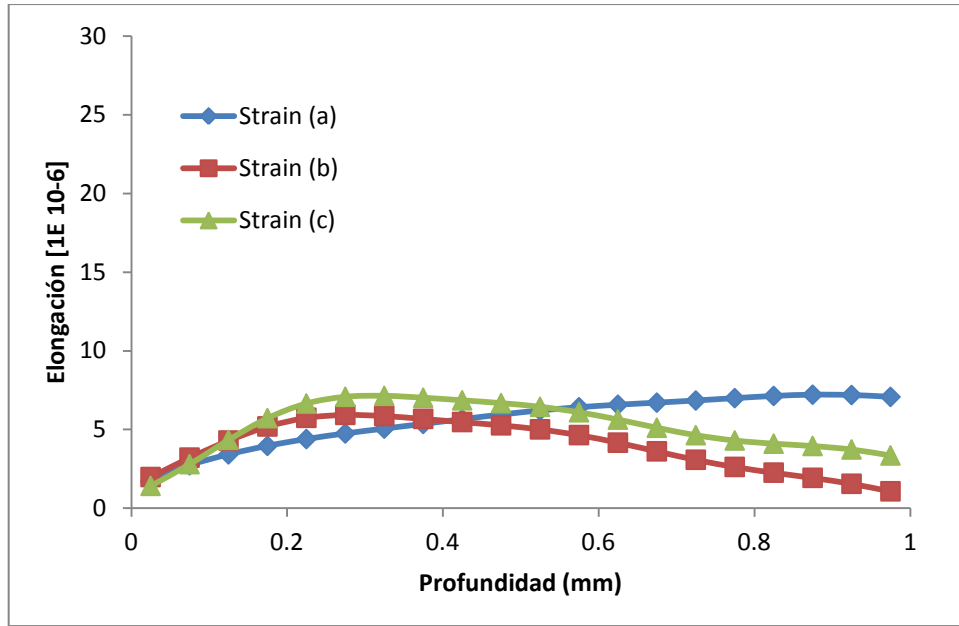


Figura VI.25 Gráfica de elongación relevada vs profundidad de orificio (Prueba #69)

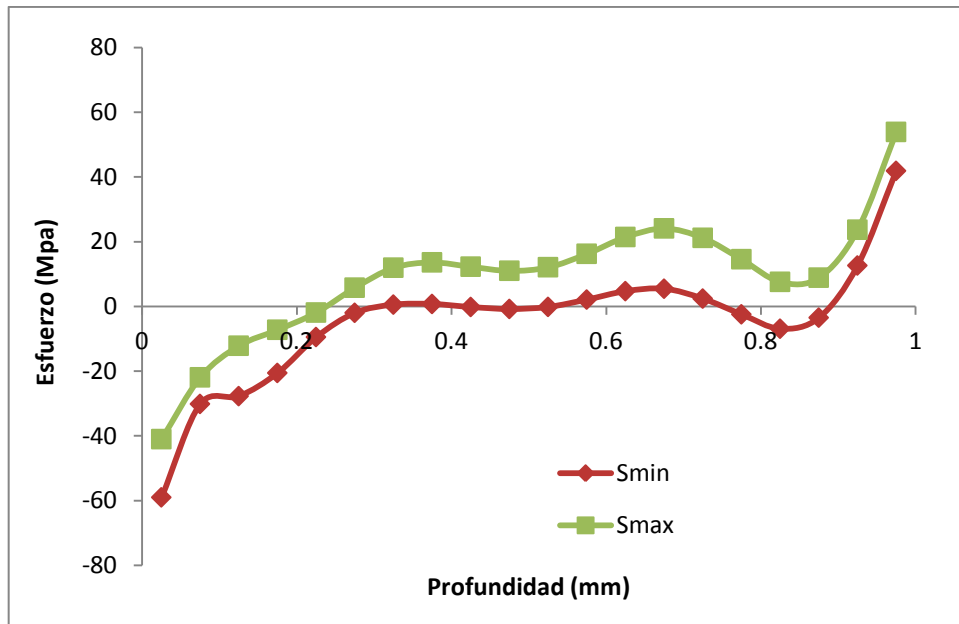


Figura VI.26 Gráfica de Esfuerzos principales vs profundidad de orificio (Prueba #69)

Anexo VII

Tablas de resultados en pruebas realizadas en muestras con temple mecánico y muestras niveladas.

VII.1 Tablas de resultados para las muestras con proceso de temple mecánico.

Tabla VII.1 Resultados obtenidos en posición 1, muestra con temple mecánico, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.751	3.125	5.071	17.067	-132.835	-82.39
0.075	2.878	2.819	5.513	46.277	4.485	20.089
0.125	3.001	1.64	5.164	56.854	1.997	32.924
0.175	3.289	0.182	4.725	56.083	-6.594	30.597
0.225	3.558	-1.442	4.196	55.367	-7.763	29.022
0.275	3.757	-3.172	3.579	54.989	-6.372	28.323
0.325	3.931	-4.938	2.931	54.595	-6.598	26.769
0.375	4.101	-6.703	2.287	54.207	-7.13	25.567
0.425	4.23	-8.472	1.625	53.855	-6.397	25.529
0.475	4.265	-10.269	0.898	53.625	-3.247	27.778
0.525	4.192	-12.11	0.087	53.542	0.124	30.767
0.575	4.056	-13.991	-0.779	53.385	2.073	34.168
0.625	3.941	-15.886	-1.636	53.059	-0.614	35.334
0.675	3.917	-17.772	-2.426	52.649	-6.667	35.402
0.725	3.994	-19.639	-3.137	52.336	-14.638	33.856
0.775	4.117	-21.485	-3.81	52.26	-16.926	36.01
0.825	4.201	-23.295	-4.506	52.528	-11.196	41.964
0.875	4.185	-25.026	-5.259	53.186	2.83	51.473
0.925	4.083	-26.596	-6.031	54.434	16.697	57.047
0.975	3.985	-27.915	-6.718	56.024	22.327	53.822

Tabla VII.2 resultados obtenidos en posición 2, muestra con temple mecánico, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.172	3.348	2.807	-58.499	-87.538	-73.37
0.075	4.715	3.883	3.888	51.85	-32.032	-4.226
0.125	5.515	3.607	4.587	44.909	-17.618	12.119
0.175	5.79	2.88	4.936	42.206	-6.659	19.394
0.225	5.645	1.707	4.857	42.698	2.237	26.244
0.275	5.202	0.143	4.459	43.489	6.842	31.637
0.325	4.588	-1.672	3.951	42.819	6.513	33.675
0.375	3.909	-3.581	3.488	41.406	3.74	32.98
0.425	3.226	-5.471	3.095	40.549	1.528	31.065
0.475	2.569	-7.301	2.687	41.298	2.115	29.959
0.525	1.934	-9.09	2.151	44.208	5.554	30.795
0.575	1.299	-10.888	1.422	48.442	11.045	34.852
0.625	0.627	-12.741	0.528	50.992	16.32	40.817
0.675	-0.125	-14.666	-0.431	49.581	20.623	47.473
0.725	-0.991	-16.638	-1.339	45.111	22.422	52.298
0.775	-1.978	-18.598	-2.124	39.696	25.21	57.684
0.825	-3.054	-20.464	-2.788	34.908	28.587	61.288
0.875	-4.144	-22.162	-3.388	31.505	35.444	64.391
0.925	-5.151	-23.652	-3.985	30.774	42.633	64.558
0.975	-5.992	-24.941	-4.585	36.638	51.81	67.821

Tabla VII.3 resultados obtenidos en posición 3, muestra con temple mecánico, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	-0.951	-0.571	-1.436	-55.641	20.589	44.349
0.075	-1.415	-1.793	-1.76	41.697	-11.182	19.294
0.125	-2.144	-3.281	-2.464	43.769	0.401	23.298
0.175	-2.936	-4.784	-3.373	47.557	5.98	21.967
0.225	-3.586	-6.171	-4.214	49.772	3.2	17.508
0.275	-4.093	-7.453	-4.979	51.706	0.612	14.337
0.325	-4.577	-8.748	-5.838	55.831	2.642	15.699
0.375	-5.155	-10.195	-6.961	61.358	8.291	21.757
0.425	-5.868	-11.872	-8.4	65.164	14.962	30.35
0.475	-6.681	-13.743	-10.081	66.372	20.059	37.843
0.525	-7.52	-15.677	-11.852	66.721	22.688	41.644
0.575	-8.315	-17.507	-13.562	67.75	22.813	40.544
0.625	-9.038	-19.109	-15.11	70.823	22.214	36.398
0.675	-9.704	-20.462	-16.476	76.984	22.512	32.509
0.725	-10.356	-21.639	-17.698	83.778	24.666	31.644
0.775	-11.034	-22.762	-18.842	80.149	30.32	35.871
0.825	-11.75	-23.923	-19.959	65.267	37.229	44.274
0.875	-12.478	-25.133	-21.066	58.919	43.856	54.641
0.925	-13.166	-26.322	-22.141	59.406	47.743	61.214
0.975	-13.761	-27.407	-23.147	63.839	51.744	65.734

Tabla VII.4 resultados obtenidos en posición 4, muestra con temple mecánico, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	0.4	0.921	0.506	-41.753	-21.542	-4.091
0.075	-0.535	-0.712	-0.091	40.158	6.163	38.696
0.125	-1.613	-2.626	-0.888	41.511	7.248	37.152
0.175	-2.56	-4.382	-1.61	42.262	4.428	28.24
0.225	-3.496	-6.174	-2.319	42.287	3.043	26.083
0.275	-4.608	-8.238	-3.164	41.871	5.67	30.868
0.325	-5.986	-10.638	-4.245	41.627	11.621	38.366
0.375	-7.581	-13.262	-5.559	41.895	18.384	44.365
0.425	-9.247	-15.915	-7.006	42.825	23.018	46.227
0.475	-10.826	-18.415	-8.442	44.238	23.715	43.772
0.525	-12.222	-20.661	-9.747	45.271	20.8	38.492
0.575	-13.436	-22.65	-10.871	44.715	17.014	33.461
0.625	-14.552	-24.451	-11.852	42.397	16.072	31.756
0.675	-15.674	-26.159	-12.783	39.283	21.239	35.989
0.725	-16.866	-27.837	-13.754	36.734	31.235	44.315
0.775	-18.109	-29.493	-14.797	36.412	43.606	54.641
0.825	-19.315	-31.079	-15.859	39.557	50.588	60.575
0.875	-20.388	-32.53	-16.835	42.85	47.692	58.684
0.925	-21.297	-33.806	-17.644	41.96	36.993	50.162
0.975	-22.107	-34.922	-18.296	36.628	37.338	50.879

VII.2 Tablas de resultados para las muestras con proceso de temple mecánico.

Tabla VII.5 resultados obtenidos en posición 5, muestra con temple mecánico, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.182	2.128	3.227	23.909	-92.483	-63.197
0.075	2.013	1.665	3.432	37.376	6.602	20.718
0.125	1.107	0.452	2.463	64.811	31.013	37.143
0.175	0.031	-0.909	1.256	73.601	30.384	35.305
0.225	-1.061	-2.283	0.164	52.267	24.395	29.389
0.275	-2.137	-3.66	-0.768	40.141	18.314	26.146
0.325	-3.185	-5.038	-1.613	38.331	14.732	24.37
0.375	-4.199	-6.402	-2.45	40.009	14.297	23.799
0.425	-5.191	-7.743	-3.325	43.061	15.881	24.114
0.475	-6.186	-9.065	-4.256	46.016	19.001	25.774
0.525	-7.212	-10.386	-5.245	47.662	22.7	28.258
0.575	-8.285	-11.721	-6.289	47.87	27.54	32.387
0.625	-9.392	-13.072	-7.379	48.306	31.933	36.62
0.675	-10.499	-14.42	-8.488	49.715	36.097	41.211
0.725	-11.56	-15.732	-9.565	49.843	36.869	42.927
0.775	-12.547	-16.969	-10.551	46.624	36.328	43.688
0.825	-13.456	-18.109	-11.397	40.273	33.36	42.315
0.875	-14.311	-19.149	-12.101	32.866	31.986	42.638
0.925	-15.151	-20.112	-12.716	26.272	36.246	47.5
0.975	-15.998	-21.028	-13.333	20.558	58.631	67.574

Tabla VII.6 resultados obtenidos en posición 1, muestra con nivelado de precisión, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	6.264	6.227	5.791	-69.902	-164.017	-153.352
0.075	7.19	6.118	5.937	58.798	3.59	27.838
0.125	7.131	4.635	4.507	65.986	25.934	53.343
0.175	7.167	3.137	2.969	68.294	17.924	43.859
0.225	7.345	1.769	1.584	67.669	9.982	33.545
0.275	7.509	0.415	0.206	67.899	8.602	29.918
0.325	7.547	-0.995	-1.315	70.71	11.205	30.416
0.375	7.423	-2.456	-3.006	75.348	15.797	33.049
0.425	7.158	-3.92	-4.8	80.095	19.456	34.935
0.475	6.802	-5.345	-6.6	83.205	21.825	35.884
0.525	6.42	-6.708	-8.34	83.906	21.597	34.852
0.575	6.065	-8.009	-10.003	82.438	21.023	34.661
0.625	5.765	-9.261	-11.601	80.405	19.416	34.529
0.675	5.51	-10.486	-13.155	78.623	19.972	37.037
0.725	5.257	-11.704	-14.674	77.007	21.043	39.31
0.775	4.948	-12.934	-16.157	75.172	27.52	45.621
0.825	4.541	-14.181	-17.601	73.09	36.694	53.468
0.875	4.036	-15.432	-19.007	71.842	48.638	63.911
0.925	3.488	-16.65	-20.376	73.198	58.296	72.929
0.975	2.984	-17.783	-21.69	77.297	71.114	86.716

Tabla VII.7 resultados obtenidos en posición 2, muestra con nivelado de precisión, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	5.651	7.312	3.57	-55.534	-160.561	-67.082
0.075	6.394	7.452	3.582	53.782	1.875	22.202
0.125	6.722	7.19	3.293	51.867	6.988	23.443
0.175	7.079	7.141	3.03	58.385	6.054	14.609
0.225	7.113	6.819	2.559	54.659	10.231	17.088
0.275	6.698	6.087	1.799	46.092	16.791	23.419
0.325	5.972	5.15	0.838	39.7	21.609	25.98
0.375	5.13	4.228	-0.206	19.787	23.997	24.92
0.425	4.29	3.385	-1.263	-45.07	22.472	24.501
0.475	3.465	2.555	-2.312	-53.034	22.22	24.147
0.525	2.628	1.655	-3.341	55.716	23.037	23.772
0.575	1.759	0.673	-4.327	39.243	22.891	26.536
0.625	0.865	-0.34	-5.248	33.955	22.8	28.201
0.675	-0.037	-1.328	-6.109	28.449	24.606	29.948
0.725	-0.945	-2.289	-6.955	23.978	27.201	31.554
0.775	-1.871	-3.275	-7.844	28.67	34.61	38.193
0.825	-2.816	-4.337	-8.806	42.649	42.962	47.762
0.875	-3.75	-5.455	-9.806	49.114	50.051	57.348
0.925	-4.612	-6.521	-10.753	50.379	50.63	58.901
0.975	-5.352	-7.411	-11.562	48.562	51.838	57.357

Tabla VII.8 resultados obtenidos en posición 3, muestra con nivelado de precisión, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.98	1.99	1.025	-67.215	-56.09	-30.4
0.075	2.215	1.754	1.257	41.228	-7.918	11.147
0.125	2.082	0.859	1.063	44.018	-1.313	22.651
0.175	1.636	-0.411	0.437	46.965	7.571	28.131
0.225	0.869	-1.967	-0.484	46.527	14.332	31.955
0.275	-0.086	-3.666	-1.489	43.728	16.125	32.618
0.325	-1.079	-5.351	-2.445	41.468	14.636	30.25
0.375	-2.05	-6.926	-3.347	40.282	14.075	27.118
0.425	-3.026	-8.365	-4.259	38.76	17.162	25.389
0.475	-4.063	-9.682	-5.23	26.548	23.138	25.84
0.525	-5.171	-10.887	-6.235	-26.034	26.03	29.681
0.575	-6.292	-11.973	-7.183	-27.692	25.549	31.955
0.625	-7.336	-12.924	-7.971	-19.917	21.786	28.768
0.675	-8.24	-13.749	-8.555	-4.825	15.93	22.696
0.725	-9.006	-14.491	-8.983	10.663	10.1	17.67
0.775	-9.711	-15.22	-9.373	19.284	12.377	20.583
0.825	-10.455	-15.999	-9.85	21.332	24.832	31.985
0.875	-11.297	-16.848	-10.466	14.257	45.776	50.765
0.925	-12.211	-17.724	-11.165	-1.284	62.914	67.529
0.975	-13.093	-18.545	-11.809	-1.817	69.144	75.394

Tabla VII.9 resultados obtenidos en posición 4, muestra con nivelado de precisión, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	5.556	7.455	3.418	54.903	-171.518	-63.455
0.075	6.61	7.849	3.843	50.322	-9.515	16.245
0.125	7.255	7.167	3.439	54.01	-2.621	32.231
0.175	8.059	6.558	2.766	62.122	-2.595	25.821
0.225	8.701	5.758	1.835	64.479	0.899	26.246
0.275	8.959	4.464	0.59	61.102	6.9	32.87
0.325	8.859	2.68	-0.94	58.031	11.43	39.633
0.375	8.537	0.614	-2.646	57.005	14.41	43.386
0.425	8.099	-1.505	-4.403	57.263	16.362	43.27
0.475	7.586	-3.548	-6.117	57.574	18.381	41.692
0.525	7.009	-5.497	-7.753	56.961	19.781	40.181
0.575	6.392	-7.396	-9.323	56.18	21.258	41.082
0.625	5.787	-9.274	-10.87	56.931	21.753	43.182
0.675	5.249	-11.112	-12.431	60.064	23.01	46.571
0.725	4.79	-12.849	-14.019	65.109	24.267	48.275
0.775	4.365	-14.424	-15.612	72.08	30.483	52.254
0.825	3.899	-15.82	-17.159	80.446	38.896	56.505
0.875	3.346	-17.08	-18.6	87.272	49.072	61.963
0.925	2.738	-18.272	-19.884	78.653	55.273	64.1
0.975	2.171	-19.441	-20.989	56.912	57.659	71.262

Tabla VII.10 resultados obtenidos en posición 4, muestra con nivelado de precisión, espesor 7.94 mm

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	5.998	7.039	1.888	-61.789	-172.477	-40.924
0.075	6.855	6.664	1.706	49.867	-8.751	30.577
0.125	7.33	5.67	1.261	48.362	-5.555	34.299
0.175	7.874	4.852	0.667	53.761	-2.463	25.078
0.225	8.209	3.808	-0.178	55.561	2.088	26.457
0.275	8.263	2.355	-1.258	53.809	5.474	31.92
0.325	8.149	0.613	-2.49	53.167	6.357	34.91
0.375	7.978	-1.227	-3.801	53.991	6.81	35.237
0.425	7.773	-3.058	-5.16	55.548	8.194	34.567
0.475	7.493	-4.875	-6.552	56.508	11.216	35.415
0.525	7.1	-6.716	-7.963	55.747	14.347	37.507
0.575	6.599	-8.599	-9.362	53.904	17.321	40.949
0.625	6.034	-10.496	-10.717	52.331	18.617	43.475
0.675	5.455	-12.356	-12.018	52.035	20.145	45.712
0.725	4.881	-14.135	-13.275	52.928	21.69	46.449
0.775	4.295	-15.82	-14.517	54.653	28.234	50.755
0.825	3.666	-17.426	-15.758	56.144	37.428	57.408
0.875	2.989	-18.965	-16.981	56.41	48.057	66.245
0.925	2.305	-20.429	-18.133	54.185	53.239	71.685
0.975	1.69	-21.779	-19.148	51.174	55.922	76.786

Anexo VIII

Tablas de resultados obtenidos en material que fue procesado con ambas tecnologías (Temple mecánico y Nivelado de precisión)

VIII.1 Tablas de resultados para la muestra con ambos procesos

Tabla VIII.1 Resultados obtenidos en lado operador, muestra procesada con ambas tecnologías. (Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 10.

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β [°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.293	3.087	2.201	-74.039	-89.129	-65.441
0.075	3.825	3.311	2.337	62.561	1.936	8.682
0.125	3.577	2.981	2.197	23.84	12.496	19.509
0.175	3.263	2.742	2.28	12.837	5.583	14.737
0.225	2.997	2.549	2.518	15.473	0.296	10.421
0.275	2.688	2.204	2.71	23.48	0.099	11.237
0.325	2.236	1.588	2.711	30.231	3.173	15.654
0.375	1.605	0.718	2.484	33.43	8.265	21.102
0.425	0.821	-0.292	2.07	33.344	13.517	24.681
0.475	-0.051	-1.302	1.545	28.943	18.17	25.857
0.525	-0.942	-2.205	0.97	11.518	20.846	24.836
0.575	-1.798	-2.962	0.373	-25.117	21.088	25.395
0.625	-2.593	-3.596	-0.254	-40.771	20.225	27.23
0.675	-3.326	-4.175	-0.944	-49.904	22.008	30.595
0.725	-4.009	-4.774	-1.726	-60.206	25.432	34.405
0.775	-4.656	-5.448	-2.612	-73.247	32.041	41.332
0.825	-5.272	-6.216	-3.585	-86.484	38.424	49.16
0.875	-5.847	-7.054	-4.603	83.944	43.888	57.25
0.925	-6.359	-7.918	-5.617	77.815	45.879	62.212
0.975	-6.78	-8.764	-6.586	74.499	51.045	70.337

Tabla VIII.2 Resultados obtenidos en centro de muestra, procesada con ambas tecnologías. (Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 10.

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	-1.157	-2.269	-1.53	50.707	22.133	59.808
0.075	-1.065	-2.897	-1.643	49.413	-16	1.711
0.125	-1.068	-3.539	-1.415	37.417	-18.476	1.949
0.175	-1.471	-4.393	-1.118	28.414	-13.182	9.59
0.225	-2.164	-5.325	-0.793	22.043	-8.855	13.757
0.275	-2.973	-6.24	-0.446	18.61	-6.902	14.312
0.325	-3.811	-7.136	-0.1	17.993	-5.734	14.18
0.375	-4.685	-8.049	0.216	18.374	-4.366	14.971
0.425	-5.624	-8.994	0.486	17.912	-2.143	17.133
0.475	-6.627	-9.941	0.716	16.102	0.083	19.242
0.525	-7.647	-10.835	0.926	13.33	1.737	20.217
0.575	-8.614	-11.622	1.14	10.513	1.567	18.814
0.625	-9.481	-12.276	1.372	8.034	0.463	16.138
0.675	-10.246	-12.815	1.619	6.316	-0.933	13.597
0.725	-10.954	-13.281	1.865	5.01	-0.604	13.659
0.775	-11.66	-13.722	2.087	3.714	2.252	17.338
0.825	-12.397	-14.163	2.265	1.965	7.351	23.649
0.875	-13.146	-14.589	2.39	-0.941	13.161	29.93
0.925	-13.845	-14.951	2.466	-7.335	16.599	32.374
0.975	-14.43	-15.187	2.502	-21.162	15.538	30.782

Tabla VIII.3 Resultados obtenidos en lado transmisión, muestra procesada con ambas tecnologías. (Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 10.

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.618	2.68	1.155	-66.329	-76.784	-34.974
0.075	2.833	2.289	1.181	44.232	-4.492	18.157
0.125	2.808	1.789	1.296	36.703	-3.734	16.422
0.175	2.95	1.382	1.415	41.808	-5.947	10.262
0.225	3.135	0.816	1.33	49.657	-5.188	12
0.275	3.233	0.052	1.031	52.657	-1.982	15.704
0.325	3.217	-0.757	0.643	52.76	1.326	16.011
0.375	3.13	-1.462	0.282	51.244	3.628	13.274
0.425	3.015	-2.03	-0.031	49.932	4.867	10.133
0.475	2.884	-2.541	-0.362	55.889	6.298	9.857
0.525	2.722	-3.108	-0.801	64.87	8.323	13.343
0.575	2.516	-3.793	-1.393	67.684	11.633	19.686
0.625	2.271	-4.571	-2.107	69.106	14.8	25.151
0.675	2.016	-5.347	-2.853	71.169	16.674	27.216
0.725	1.79	-6.018	-3.53	75.376	15.004	23.668
0.775	1.619	-6.533	-4.087	83.647	11.802	18.192
0.825	1.502	-6.923	-4.549	-88.1	8.492	14.179
0.875	1.413	-7.278	-4.999	-89.909	10.082	17.204
0.925	1.321	-7.696	-5.526	82.758	18.849	29.717
0.975	1.202	-8.221	-6.162	77.523	37.19	53.022

Tabla VIII.4 Resultados obtenidos en lado operador, muestra procesada con ambas tecnologías. (Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 3/16.

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.534	4.227	2.511	-56.513	-114.883	-64.175
0.075	3.571	3.825	2.508	42.229	4.967	26.624
0.125	2.754	3.093	2.679	20.712	7.224	32.563
0.175	1.844	2.469	2.887	13.74	5.962	26.35
0.225	0.891	1.704	2.893	17.019	8.673	24.566
0.275	-0.232	0.649	2.688	22.582	11.942	28.112
0.325	-1.593	-0.667	2.336	23.075	14.917	32.857
0.375	-3.152	-2.115	1.883	19.999	18.305	36.363
0.425	-4.798	-3.537	1.381	14.397	20.712	37.033
0.475	-6.41	-4.821	0.896	7.601	20.926	35.451
0.525	-7.907	-5.945	0.478	3.78	18.535	32.033
0.575	-9.264	-6.979	0.118	6.989	16.744	29.427
0.625	-10.505	-8.03	-0.249	16.99	16.851	29.443
0.675	-11.68	-9.162	-0.689	26.731	20.55	34.446
0.725	-12.829	-10.339	-1.203	30.171	25.364	39.569
0.775	-13.965	-11.445	-1.721	23.895	31.234	43.313
0.825	-15.065	-12.371	-2.151	6.62	31.43	42.896
0.875	-16.083	-13.107	-2.481	-5.079	28.053	41.386
0.925	-16.969	-13.769	-2.81	-4.009	30.758	40.677
0.975	-17.696	-14.495	-3.279	46.768	49.873	55.801

Tabla VIII.5 Resultados obtenidos en centro de muestra , procesada con ambas tecnologías. (Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 3/16.

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.575	3.604	2.021	-50.99	-96.141	-43.19
0.075	2.312	3.176	2.12	33.855	4.178	25.746
0.125	1.074	2.066	1.653	21.31	22.264	40.912
0.175	-0.205	1.216	1.293	5.225	17.523	31.932
0.225	-1.324	0.579	1.114	1.707	10.079	22.977
0.275	-2.425	-0.13	0.94	8.518	8.98	21.104
0.325	-3.694	-1.09	0.618	14.729	12.666	25.73
0.375	-5.198	-2.287	0.127	14.884	18.221	32.506
0.425	-6.869	-3.561	-0.435	9.728	21.659	36.593
0.475	-8.559	-4.719	-0.938	1.785	20.894	36.575
0.525	-10.13	-5.634	-1.296	-5.689	15.763	32.535
0.575	-11.517	-6.305	-1.502	-10.338	10.211	27.569
0.625	-12.742	-6.843	-1.625	-10.719	7.481	23.809
0.675	-13.878	-7.412	-1.762	-4.802	11.007	25.053
0.725	-15.002	-8.135	-1.987	8.433	17.891	31.043
0.775	-16.148	-9.038	-2.318	20.072	26.823	42.285
0.825	-17.293	-10.032	-2.709	24.174	33.618	51.312
0.875	-18.384	-10.97	-3.082	21.26	36.496	53.441
0.925	-19.38	-11.736	-3.373	10.888	33.024	48.083
0.975	-20.277	-12.327	-3.574	-0.463	32.989	48.684

Tabla VIII.6 Resultados obtenidos en lado transmisión, muestra procesada con ambas tecnologías. (Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 3/16.

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.125	5.086	1.866	-51.835	-121.319	-21.52
0.075	3.499	6.824	1.812	-47.833	-11.771	29.218
0.125	3.606	8.044	1.408	-50.084	-0.767	27.675
0.175	3.672	9.075	0.929	-51.831	0.69	22.644
0.225	3.519	9.759	0.37	-50.241	6.074	20.606
0.275	3.123	10.071	-0.267	-45.323	12.063	19.941
0.325	2.619	10.154	-0.948	-41.687	14.341	18.682
0.375	2.156	10.18	-1.642	-51.887	13.197	17.064
0.425	1.799	10.241	-2.35	-61.338	10.244	16.454
0.475	1.515	10.324	-3.101	-63.98	8.805	17.899
0.525	1.22	10.349	-3.929	-65.25	10.384	20.965
0.575	0.845	10.246	-4.846	-66.297	15.341	25.915
0.625	0.37	9.998	-5.836	-67.285	21.128	30.83
0.675	-0.173	9.66	-6.854	-66.399	25.943	35.316
0.725	-0.726	9.323	-7.845	-62.533	26.545	37.135
0.775	-1.243	9.072	-8.77	-57.749	25.04	38.911
0.825	-1.71	8.939	-9.614	-54.253	21.991	40.378
0.875	-2.146	8.889	-10.396	-52.341	22.135	44.53
0.925	-2.585	8.844	-11.155	-51.902	28.631	52.113
0.975	-3.044	8.735	-11.926	-53.394	48.497	69.624

Tabla VIII.7 Resultados obtenidos en lado operador, muestra procesada con ambas tecnologías.
(Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 8.

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	1.117	1.137	-0.306	-67.099	-31.956	7.799
0.075	1.641	0.715	-0.272	49.754	-20.313	9.293
0.125	1.572	0.346	-0.091	29.864	-6.954	9.464
0.175	1.391	-0.059	0.041	27.038	-3.686	9.45
0.225	1.342	-0.751	0.043	42.008	-7.503	11.853
0.275	1.411	-1.712	-0.049	46.944	-12.085	14.975
0.325	1.445	-2.782	-0.177	46.697	-11.446	15.957
0.375	1.293	-3.84	-0.328	43.13	-5.535	16.311
0.425	0.887	-4.881	-0.538	36.329	2.44	18.402
0.475	0.26	-5.974	-0.849	30.699	9.143	22.823
0.525	-0.489	-7.17	-1.258	31.816	12.76	27.452
0.575	-1.249	-8.443	-1.71	35.82	12.447	30.09
0.625	-1.94	-9.692	-2.12	37.829	9.183	29.063
0.675	-2.542	-10.795	-2.428	36.635	5.887	24.625
0.725	-3.085	-11.686	-2.637	30.878	5.181	19.262
0.775	-3.628	-12.394	-2.812	16.281	9.95	19.225
0.825	-4.228	-13.026	-3.043	-1.141	19.38	27.486
0.875	-4.909	-13.709	-3.381	-1.705	34.386	42.076
0.925	-5.655	-14.506	-3.799	16.592	48.049	57.343
0.975	-6.416	-15.378	-4.211	26.409	56.205	71.997

Tabla VIII.8 Resultados obtenidos en centro de muestra, procesada con ambas tecnologías. (Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 8.

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	2.067	1.844	1.201	-77.052	-58.062	-39.292
0.075	2.281	0.702	1.218	45.712	-17.557	28.842
0.125	2.162	-0.306	1.396	38.259	-9.818	21.47
0.175	2.006	-1.185	1.656	35.398	-8.624	15.647
0.225	1.74	-2.319	1.807	37.579	-7.893	18.854
0.275	1.316	-3.698	1.871	37.724	-6.62	22.597
0.325	0.778	-5.071	1.976	34.819	-5.634	21.538
0.375	0.209	-6.242	2.197	29.665	-5.391	17.223
0.425	-0.334	-7.195	2.507	24.859	-5.745	13.045
0.475	-0.836	-8.039	2.827	24.218	-5.53	11.436
0.525	-1.32	-8.875	3.098	26.805	-4.75	12.111
0.575	-1.813	-9.712	3.327	27.918	-3.495	13.803
0.625	-2.322	-10.476	3.563	24.378	-2.873	13.671
0.675	-2.835	-11.086	3.848	15.899	-3.185	12.009
0.725	-3.334	-11.536	4.172	6.642	-4.543	10.037
0.775	-3.815	-11.912	4.467	3.202	-2.666	11.085
0.825	-4.301	-12.338	4.659	9.127	4.357	16.66
0.875	-4.831	-12.881	4.716	19.227	15.455	28.476
0.925	-5.435	-13.506	4.69	20.546	26.31	41.687
0.975	-6.103	-14.094	4.677	10.888	34.347	52.131

Tabla VIII.9 Resultados obtenidos en lado transmisión, muestra procesada con ambas tecnologías. (Temple mecánico y Nivelado de precisión) Calibre 8

Depth [mm]	Strain (a) [1E 10-6]	Strain (b) [1E 10-6]	Strain (c) [1E 10-6]	β[°]	Smin Mpa	Smax Mpa
0.025	3.377	2.916	1.757	-78.352	-99.328	-62.885
0.075	3.872	3.171	2.295	32.551	-7.006	6.195
0.125	3.998	3.309	2.863	17.246	-4.133	9.624
0.175	4.117	3.52	3.487	12.405	-5.665	5.859
0.225	4.095	3.604	4.018	12.889	-3.283	7.637
0.275	3.849	3.489	4.403	12.837	0.825	12.127
0.325	3.415	3.24	4.676	10.288	3.73	15.226
0.375	2.872	2.939	4.88	6.648	5.26	16.56
0.425	2.279	2.621	5.034	3.948	6.075	16.799
0.475	1.653	2.264	5.12	3.813	7.786	17.728
0.525	0.98	1.825	5.11	6.43	10.566	19.823
0.575	0.244	1.279	4.986	10.279	15.036	23.945
0.625	-0.554	0.637	4.755	13.055	19.904	28.617
0.675	-1.393	-0.064	4.437	13.676	25.023	33.302
0.725	-2.236	-0.783	4.059	12.861	28.514	35.833
0.775	-3.049	-1.49	3.638	12.655	32.806	38.633
0.825	-3.81	-2.183	3.174	18.531	36.975	40.976
0.875	-4.51	-2.878	2.656	42.928	42.931	46.145
0.925	-5.151	-3.589	2.07	62.643	49.789	55.565
0.975	-5.737	-4.323	1.414	69.446	66.218	75.752

Anexo IX

Resultados de Ensayos de Tensión

Tabla IX.1 Datos obtenidos de los ensayos de tensión en probetas obtenidas del material nivelado

# de muestra	Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Long. Calibrada (in)	So (Mpa)	Smax (Mpa)	Srupt (Mpa)	% Elongación
6	A	9.68	12.86	2	401	490	284	38%
7	A	9.68	12.86	2	387	468	271	42%
8	A	9.68	12.86	2	388	467	253	38%
9	A	12.84	12.86	2	338	424	250	30%
10	A	12.84	12.86	2	342	427	NA	29%
	B	12.84	12.86	2	351	438	253	42%
11	A	12.84	12.86	2	373	458	267	41%
	B	12.84	12.86	2	369	451	265	
13	A	9.68	12.86	2	406	491	292	35%
14	A	7.98	12.86	2	397	481	269	38%
15	A	7.98	12.86	2	390	469	285	31%
16	A	7.98	12.86	2	399	473	281	35%
17	A	7.98	12.86	2	398	472	283	34%

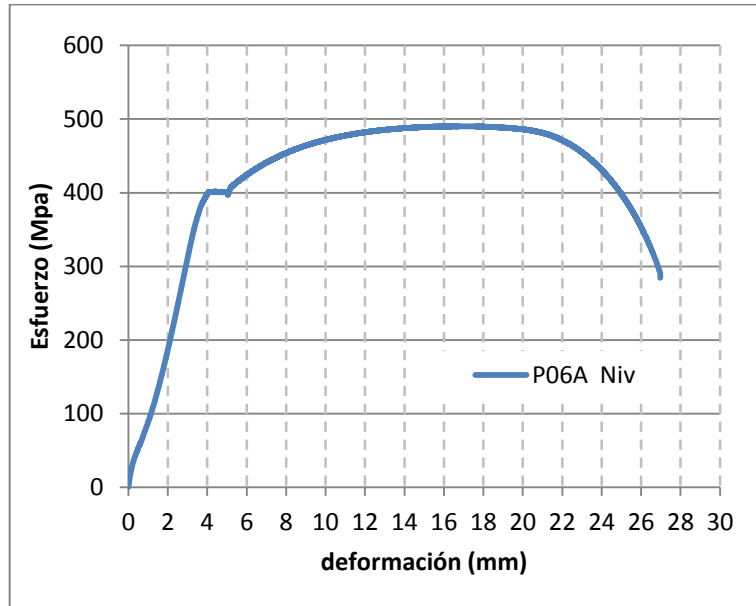


Figura XI.1 Gráfica esfuerzo vs deformación ensayo probeta 06A nivelada

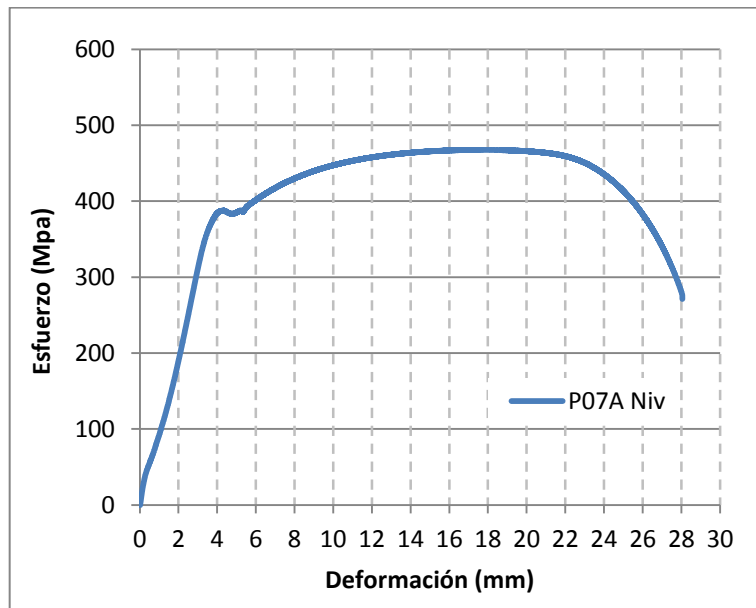


Figura XI.2 Gráfica esfuerzo vs deformación ensayo probeta 07A nivelada

Tabla IX.2 Datos obtenidos de los ensayos de tensión, en probetas obtenidas de material con temple mecánico

# de Muestra	Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Long. Calibrada (mm)	So (Mpa)	Smax Mpa	Srupt Mpa	% Elongación
1	A	12.8	12.77	60	402.16	596.11	338.58	18.91
	B	12.8	12.77	60	407.53	582.56	330.57	18.56
2	A	7.82	12.77	60	474.50	624.97	369.02	14.48
	B	7.84	12.77	60	467.50	618.35	358.45	13.88
3	A	12.7	12.77	60	447.77	592.77	331.74	15.53
	B	12.7	12.77	60	441.34	595.67	291.86	15.36
4	A	8.61	12.77	60	424.95	597.03	284.99	18.53
	B	8.67	12.77	60	433.27	601.83	279.50	18.93
5	A	8.19	12.77	60	437.94	601.35	301.02	16.49
	B	8.12	12.77	60	468.44	610.06	274.15	16.25
	C	8.12	12.77	60	461.65	605.18	290.24	15.84

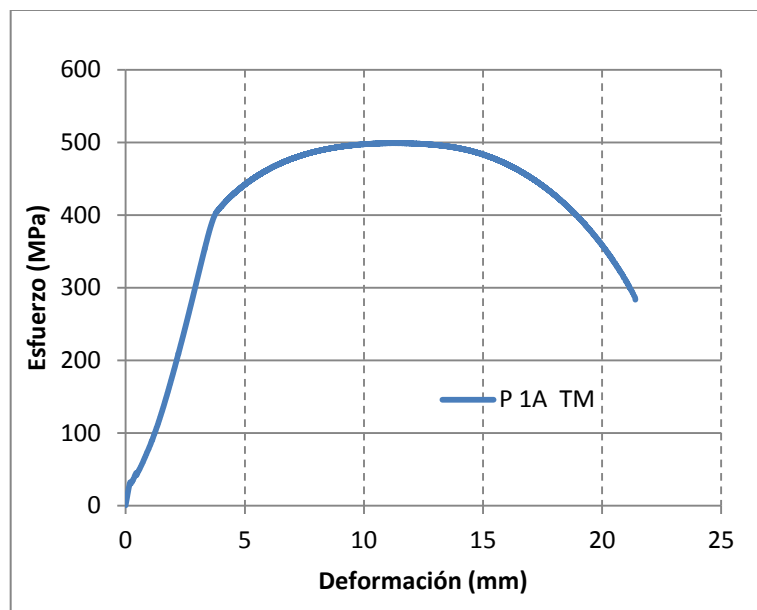


Figura XI.3 Gráfica esfuerzo vs deformación ensayo probeta 01A con Temple mecánico

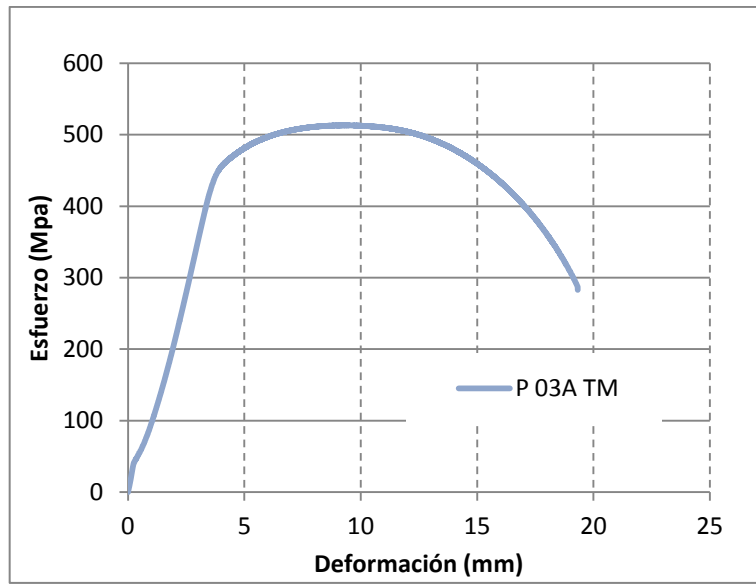


Figura XI. Gráfica esfuerzo vs deformación ensayo probeta 03A con Temple mecánico

Anexo X

Galgas extensiométricas

Consideraciones para realizar una prueba de esfuerzos residuales por el método de Hole Drilling.

X.1 Introducción

En esta sección se mencionan aspectos importantes los cuales deben tomarse en cuenta para llevar a cabo una medición de esfuerzos residuales por el método de Hole Drilling utilizando el equipo RESTAN MTS 3000, cabe destacar que solo se mencionan los pasos más importantes, otros pasos no se describirán en forma detallada, para ver los pasos e información a manera detallada ver el manual de operación del equipo [7]

X.2 Manejo de la galga extensiométricas.

Lo primero que hay que realizar previo a sacar la roseta del empaque es preparar la superficie donde se pondrá para su manipulación antes de colocarla en la zona de la prueba. Se utiliza un vidrio como el que se ve en la figura X.1 el cual debe ser neutralizado y limpiado con una toalla blanca y el solvente. De preferencia con los materiales que suministró el proveedor de las rosetas ya que no dejan residuos.

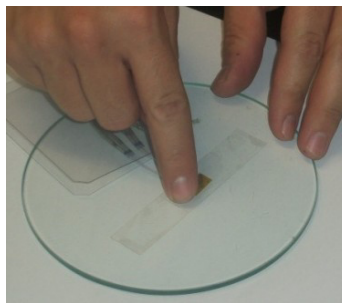


Figura X.1 Vidrio de apoyo para colocar galga extensométrica

Después de realizarse la limpieza del vidrio, y dependiendo del tipo de roseta que se va a colocar va a cambiar un poco la forma en que se extrae de su empaque, para el caso de la roseta tipo B la cual ya viene con sus terminales de conexión soldadas únicamente hay que retirarla de su empaque sujetándola firmemente de los cables cuidando no tocar con la mano la roseta, llevarla al vidrio previamente limpiado y colocarle una cinta tipo scotch sobre la roseta, como se muestra en la figura X.1, existe también una cinta especial con la cual se tiene mejor manejo la cual se puede adquirir junto con las rosetas, sin embargo no es indispensable hacerlo con la cinta especial.

Es de buena práctica identificar los cables que corresponden a cada uno de las tres galgas extensiométricas que contiene la roseta ya sea con letras (A,B,C) o con numeración (1,2,3) verificando el sentido de numeración que viene de fabricación, esto con el propósito de facilitar la conexión de los cables del sensor al equipo que recolectara los datos (spyder 8).

Una vez que se tiene la roseta colocada en el vidrio e identificada, lista para trasladar a la superficie de la prueba, hay que preparar la superficie a donde será adherida.

X.2.1 Preparación de la superficie.-

Para comenzar es importante localizar las zonas dentro de la muestra donde se quiere conocer el perfil de esfuerzos residuales, una vez seleccionadas las ubicaciones es de buena práctica marcar los ejes de referencia los cuales se utilizaran como guía para colocar las galgas extensométricas en la posición y dirección correcta respecto a la muestra. Una vez ubicadas las zonas donde se realizarán las pruebas, se continuará preparando la superficie, para poder adherir de manera correcta las galgas extensométricas, ya que si no se hace de manera adecuada se puede tener problema con la adhesión de las mismas al material donde se realizara la

prueba. Para esto primeramente se corta un trozo de una lija de grano grueso (180) con el cual se empieza a pulir la zona en seco, después de esto se continua haciendo lijados más finos, utilizando lija 220, y 320. El acabado superficial necesario para colocar las galgas extensiométricas es a criterio personal, pero se recomienda tener la zona libre de óxidos e imperfecciones a simple vista.

Después de tener la zona ubicada con sus marcas de referencia y con una superficie libre de óxidos, se prosigue con la limpieza de la superficie para retirar polvos y desechos del pulido, para esto se cuenta con toallas blancas y el limpiador suministrado por el fabricante del equipo (ver figuras X.2(a) y X.2 (b)). Pasar varias veces la toalla con solvente limpiador hasta que se observe que al pasar la toalla blanca sobre la superficie pulida ya no recoge suciedad, esto se debe hacer cuidando que no pase la misma superficie de la toalla varias veces, ya que se puede dejar suciedad sobre la superficie.



Figura X.2(a).-Toallas Limpiadoras

Figura X.2 (b).- Spray utilizado para limpieza de Vidrio y zona de prueba.

Ya que se tiene una superficie lijada, limpia, las zonas están listas para traer las galgas extensiométricas y adherirlas a la muestra en las posiciones de los puntos de muestreo.

X.2.2 Adhesión de las galgas extensiométricas.-

Una vez que se tienen las galgas extensométricas listas para ser adheridas al material previamente limpiado, se procede a realizar los siguientes pasos:

1.- Despegar la cinta de la superficie de apoyo (vidrio) de manera cuidadosa, despegándola lentamente y con un ángulo de 45° (figura X.3) para extraer las galgas extensométricas con la cinta.

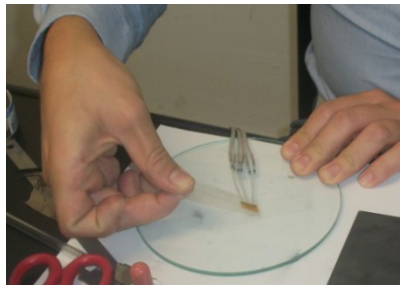


Figura X.3 Paso1

2.- Colocar la cinta portadora de las galgas extensométricas en el área de medición. (Figura X.4)

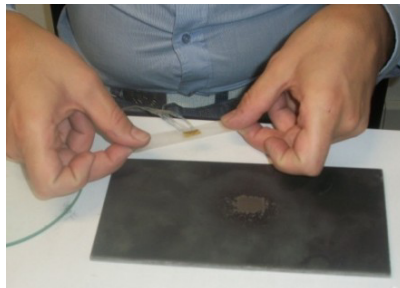


Figura X.4 Paso2

3.- Despegar parcialmente la cinta hasta liberar las galgas, para poder colocar una gota de adhesivo sobre la cinta, en el pliegue entre el material y la cinta, por debajo de la galga extensométrica ó aplicar directamente. (Figura X.5)

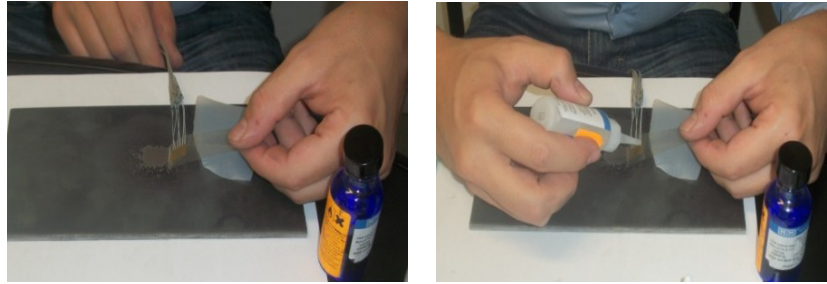


Figura X.5 Colocación del adhesivo a las galgas

4.- Inmediatamente después de colocar el pegamento pegar la cinta presionando con un cuadro de teflón para que el pegamento que exceda de la cinta no se pegue en el dedo que presiona.



Figura X.6 Proceso de adhesión de las galgas

5.- Colocar un trozo de cinta sobre las terminales con el propósito de mantenerlas fijas y proteger la unión de las terminales con el medidor de deformación.

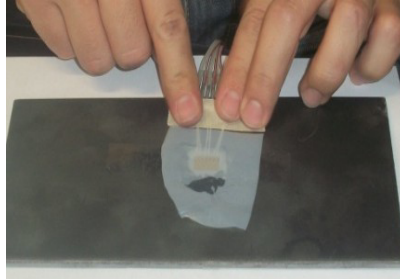


Figura X.7 sujeción de terminales

6.- Preparar resina para colocar sobre las terminales en lugar de la cinta colocada en el paso anterior.



Figura X.8 Preparación Resina

7.- Con un palillo de madera, colocar la resina sobre las terminales entre la cinta del medidor y la cinta colocada en los cables de las terminales.

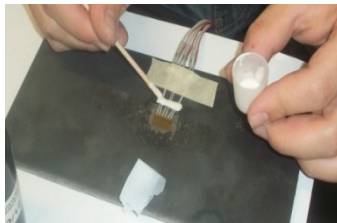


Figura X.9 Colocación de Resina sobre terminales

8.- Después separar la cinta con cuidado, estirando hacia atrás y de manera esquinada a las galgas, observando que no exista desprendimiento de las galgas de la superficie del material de prueba. (Figura X.10)

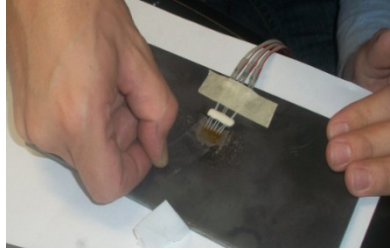


Figura X.10 Desprendimiento de Cinta

Nota: si no se va a proseguir con la medición, se puede dejar la cinta, ya que sirve para proteger las galgas.

9.- Revisar que no se haya despegado la roseta con las galgas de la superficie de la placa. (Figura X.11)

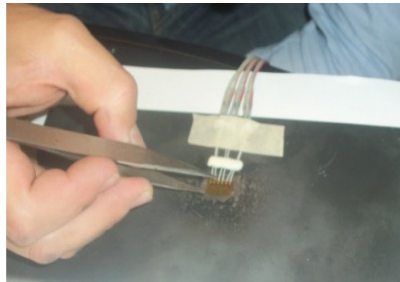


Figura X.11 Revisión de adhesión de la roseta

Una vez adheridas la galgas extensiométricas a la superficie de prueba, es necesario realizar las conexiones del equipo, así como el posicionamiento y centrado del dispositivo mecánico/óptico utilizado para alinear y perforar.