

01173

4
201

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

*"ESTUDIO SOBRE LA FACTIBILIDAD DE EMPLEAR EL
MÉTODO DEL BARRENO CIEGO Y MEDIR ESFUERZOS
RESIDUALES EN SUPERFICIES CURVAS CON
EXTENSÓMETROS ELÉCTRICOS"*

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería **Mecánica**

Presenta:

Ing. Pablo Guel López

Asesor:

Dr. Luis Ferrer Argote

Ciudad Universitaria, 1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Con todo mi cariño, respeto y admiración a mis padres:

Margarito Guel Rico

Aurelia López Vázquez

de quienes aprendí que:

"..... Si entiendes el temor a Dios, inclinas tu corazón a la prudencia, estas atento a la sabiduría y la ciencia es grata a tu alma, entonces entenderas justicia, juicio, equidad y seguiras todo buen camino....."

A ellos mi más profundo agradecimiento.

A mi novia:

Claudia Vega Escalante

quién con cariño, amor y comprensión, me impulsa en la vida.

A mis hermanos:

de quienes aprendí y comparto muchas cosas.

Al Dr. Luis Ferrer Argote, gran amigo y profesor y de quien recibí todo el apoyo para presentar el examen de grado.

Al Profesor Alfredo Olivares, mi más sincero reconocimiento por su colaboración y disposición para el presente trabajo.

Al Ing. Jorge A. Medina Ortiz y al equipo de trabajo en Ingeniería mecánica del LAPEM de CFE por su valiosa cooperación en el trabajo.

A todos mis profesores, compañeros y amigos que me ayudaron en la elaboración de esta tesis, desde elaborar experimentos hasta los consejos de redacción.

Índice.

	Pag.
Símbolos	I
Introducción	III
I Antecedentes	
1.1 Esfuerzos Residuales(Concepto)	1
1.2 Medición de esfuerzos residuales	1
1.3 Alcances y limitaciones de los métodos para medir esfuerzos residuales	1
1.4 Método de taladrar un agujero ciego y medir las deformaciones (hole drilling method)	2
1.4.1 Principio y teoría del método	2
1.4.2 Análisis de esfuerzos residuales con roseta de extensómetros	5
1.4.3 Efecto de la profundidad del agujero	6
1.4.4 Determinación de los coeficientes A y B de calibración	7
1.4.5 Calibración experimental	8
1.4.6 Análisis numérico	9
1.4.7 Técnicas experimentales	9
II Alcances	
2.1 Metodología	14
III Experimentos	
3.1 Realización de los ensayos	16
3.2 Experimento 1	16
3.3 Experimento 2	20
3.4 Experimento 3	21
IV Análisis de resultados	
4.1 Experimento 1	23
4.2 Experimento 2	25
4.3 Experimento 3	31
V Conclusiones	40
Anexo 1	41
Bibliografía citada	52
Bibliografía de consulta	53

Símbolos.

a	Radio interior del tubo
b	Radio exterior del tubo
a, b	Coefficientes de calibración experimental
A, B	Coefficientes de calibración
D_0	Diámetro de barrenado
D	Distancia de colocación de los extensómetros con respecto al agujero
E	Módulo de elasticidad
P_i	Presión interna
r	Relación del radio del punto al radio del agujero
r	Dirección radial
R	Radio del punto P
R_0	Radio de agujero
t	Espesor de la probeta de calibración en agujero ciego.
Z	Profundidad de barrenado
w	Espesor de la probeta de calibración en agujero pasado.
α	Ángulo de colocación de los extensómetros
β	Ángulo de posición de los esfuerzos principales
β_x, β_y	Ángulo de posición de los esfuerzos principales
$\mu\epsilon$	Microdeformaciones
ν	Relación de Poisson
ϵ	Deformación
ϵ_r	deformaciones radial en el punto P
ϵ_θ	deformaciones tangencial en el punto P
ϵ_c	Deformación de calibración
θ	Dirección tangencial
σ	Esfuerzo normal
σ_x, σ_y	Esfuerzos principales en las direcciones "x" y "y"
σ_θ	Esfuerzo tangencial
σ_r	Esfuerzo radial
σ_λ	Esfuerzo de calibración

Esftoer1, Esftoer2

Esfcal1, Esfcal2

Esfuerzos calculado para un tubo sujeto a presión interna
Esfuerzos principales calculados con las ecuaciones constitutivas

Introducción

El presente trabajo es un estudio sobre la factibilidad de utilizar el método de barrenado ciego y medir esfuerzos residuales con extensómetros eléctricos (strain gages), sobre superficies curvas. La inquietud de medir esfuerzos residuales en superficies curvas nace de la necesidad de calcular los esfuerzos residuales en uniones soldadas de tubos, así como también de medir los esfuerzos residuales en ciertos tipos de engranes que han sido tratados térmicamente después de que todas las posibles causas de falla del engrane se eliminaron.

Durante la segunda guerra mundial se inició el estudio de las fallas más comunes en los elementos mecánicos, y se determinó que en los vehículos de transporte militar predominaban las fallas debidas a **Esfuerzos Residuales**.

Desde entonces se ha estudiado el comportamiento de las piezas mecánicas bajo la presencia de esfuerzos residuales, ya que dichos esfuerzos son de gran importancia en Ingeniería Mecánica; debido a su contribución en fallas de los elementos mecánicos. Los esfuerzos residuales en general pueden ser dañinos o benéficos, según sea su magnitud y distribución, particularmente cuando se trata de cargas de fatiga.

Debido a lo anterior surge la necesidad del estudio de los esfuerzos residuales en cuanto a su origen, así como también su cuantificación.

Los métodos de medición actuales son muy diversos. Algunos de ellos se encuentran aún en etapa de desarrollo y algunos otros han sufrido modificaciones debido al avance de la electrónica. Los más utilizados aplican la técnica de barrenado ciego o la trepanación combinados con extensometría resistiva, interferometría de Moiré, el método de holografía, etc.

Cada uno de éstos métodos tiene ventajas y desventajas en su aplicación y solo el método de barrenado ciego con extensometría resistiva se encuentra estandarizado en la norma ASTM E837-85[1].

Además el presente trabajo analiza la posibilidad de utilizar el método de barrenado descrito por la norma mencionada en superficies curvas bajo un estado de esfuerzos no homogéneo con respecto a la profundidad del barrenado. En caso de no ser posible se expondrán las limitantes y se darán recomendaciones.

I. Antecedentes

1.1 Esfuerzos Residuales(Concepto): También conocidos como esfuerzos propios, son esfuerzos imputables casi siempre a causas metalúrgicas y son originados por:

- a).- Deformación plástica
- b).- Fuentes térmicas
- c).- Acabados superficiales
- d).- Precargas mecánicas

1.2 Medición de los esfuerzos residuales. Sabemos que un estado de esfuerzos que se induce por la aplicación de cargas externas puede ser cuantificado (evaluado) mediante cálculo con fórmulas de los mecanismos o bien mediante mediciones utilizando métodos experimentales. Sin embargo, los esfuerzos residuales no pueden calcularse directamente con fórmulas, si no que es necesario, para poder medirlos, el uso de métodos experimentales.

Todos los métodos experimentales para medir esfuerzos residuales existentes se pueden clasificar, como se muestra en la tabla 1, en métodos destructivos, semidestructivos y no destructivos. Los métodos destructivos como su nombre lo indica destruyen la pieza analizada para poder evaluar los esfuerzos residuales. Por otra parte los métodos semidestructivos dañan una parte pequeña del material para evaluar los esfuerzos residuales y los no destructivos no dañan en absoluto la pieza analizada.

Método destructivos	Semidestructivo, método del barreno ciego con:	Métodos no destructivos
Disección o trepanado	extensómetros Lacas frágiles Moiré Holografía	Difracción de rayos x Difracción de neutrones

Tabla 1.- Clasificación general de los métodos experimentales para medir esfuerzos residuales.

1.3 Alcances y limitaciones de los métodos para medir esfuerzos residuales.

Los métodos descritos anteriormente establecen ventajas y desventajas en cada uno de ellos. Debe de aclararse de antemano que ya de por sí cada método experimental tiene ventajas y desventajas debido a su aplicación, tales como instalación, rangos de medición, ambientes de aplicación, etc..

Primeramente se establece la necesidad de utilizar los métodos semidestructivos y los no destructivos, debido principalmente a que la mayoría de las veces es indispensable conservar la pieza a ensayar.

Los métodos semidestructivos dañan las piezas mecánicas en una porción muy pequeña, que para fines prácticos no limitan el buen funcionamiento de las mismas.

Los métodos semidestructivos utilizan algún medio con el cual se logra la liberación de esfuerzos residuales de la pieza; en la mayoría de ellos este medio es un barrenado de un agujero pequeño y se diferencian entre sí por la forma de medición de las deformaciones.

Dentro de los métodos semidestructivos, el método de lacas frágiles no es recomendable en la práctica, puesto que solo proporciona información de las direcciones principales de los esfuerzos y nunca su magnitud; por lo que es necesario utilizar otro método para determinar la magnitud de dichos esfuerzos.

El método de taladrar un agujero y medir los esfuerzos residuales proporciona la magnitud y dirección de los esfuerzos principales y su principal desventaja es que solo es aplicable a superficies planas y algunas con un radio de curvatura grande. El método de interferometría de Moiré depende de la buena selección de la rejilla (o sea su sensibilidad) y comparado con el método de taladrar y medir las deformaciones con extensómetros es un poco más laborioso de instalar, además de que las lecturas obtenidas se encuentran en un rango más bajo de exactitud.

El método de interferometría holográfica se encuentra aún en desarrollo y es muy poco difundido. Su principal desventaja es que el equipo utilizado es costoso, además de que la instalación es tardada y tiene que ser necesariamente en un laboratorio.

Los métodos no destructivos son muy ventajosos en el sentido práctico porque no dañan la pieza a ensayar, sin embargo tanto en método de difracción de rayos X como el de difracción de neutrones son métodos con equipo muy caro comparado con los anteriores y especialmente el de difracción de neutrones tiene que ser realizado en laboratorios.

Debe mencionarse que los únicos métodos estandarizados en las normas americanas son el método de taladrar un agujero para medir las deformaciones con extensómetros eléctricos y el de difracción de rayos X.

1.4 Método de taladrar un agujero ciego y medir las deformaciones (hole drilling method)

1.4.1 Principio y teoría del método. - El principio de eliminar esfuerzos radiales taladrando un agujero sobre la superficie y así causar deformaciones superficiales para poder medir los esfuerzos residuales, fue propuesto por primera vez por Mathar[2] y subsecuentemente por Rendler y Vigness[3], quienes establecieron los parámetros básicos para reducirlo a una técnica práctica.

Cuando se taladra un agujero de diámetro pequeño ($D_0 = 2R_0$, como se muestra en la figura 1.1) en una región con esfuerzos residuales, se sabe que las magnitudes de las deformaciones resultantes son funciones de los esfuerzos principales σ_x y σ_y así como también de las relaciones geométricas entre el punto y el agujero y el punto con los ejes principales. Considerando primero que el esfuerzo principal σ_x ocasiona deformaciones en el punto de interés, entonces éstas se calculan mediante la solución propuesta por Kirsch en 1898 con:

$$\epsilon_r = -\sigma_x \left(\frac{1+\nu}{2E} \right) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} \cos 2\alpha \right] \quad (1a)$$

$$\epsilon_\theta = -\sigma_x \left(\frac{1+\nu}{2E} \right) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} \cos 2\alpha \right] \quad (1b)$$

Donde:

$\epsilon_r, \epsilon_\theta$ = Deformaciones radial y tangencial en el punto P

σ_x, σ_y = Esfuerzos principales

r = Relación del radio del punto P al radio de agujero = R/R_0

E, ν = Módulo de elasticidad y relación de Poisson del material

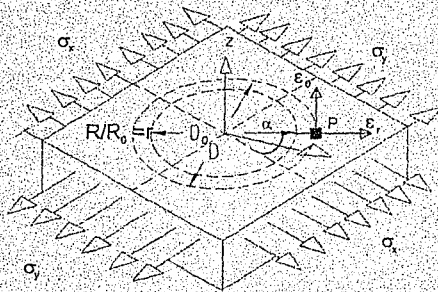


Figura 1.1 Taladrado de un agujero en una región para liberación de esfuerzos¹

Las deformaciones expresadas en las ecuaciones (1) se grafican en la figura 1.2 para ilustrar sus variaciones a lo largo de los ejes principales con respecto a la distancia del centro del agujero. De ahí se puede observar que conforme aumenta la distancia desde el agujero, las deformaciones disminuyen rápidamente. Lo anterior se utilizará para optimizar la distancia de colocación de los extensómetros para obtener lecturas prácticas.

¹Figura redibujada de la norma ASTM E837-85.

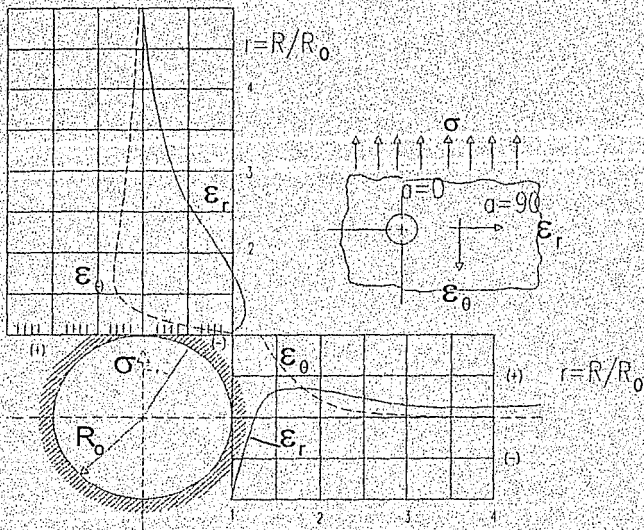


Figura 1.2 Variación de las lecturas de las deformaciones con respecto a los ejes²

Se deduce de las ecuaciones (1) que las deformaciones relajadas radial y tangencial varían senoidalmente a lo largo del círculo de radio R , y pueden expresarse generalmente como:

$$\epsilon_r = \sigma_s (A + B \cos 2\alpha) \quad (2a)$$

$$\epsilon_\theta = \sigma_s (-A + C \cos 2\alpha) \quad (2b)$$

Donde:

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right]$$

² Gráfica redibujada de la ficha técnica "Residual Stress Measurement", de Measurements Group, Inc. Raleigh, North Carolina, 1993

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left[-\left(\frac{4}{1+\nu}\right) \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right]$$

Cuando el estado de esfuerzos es biaxial, y se presentan tanto σ_x como σ_y , entonces la deformación en la dirección radial será:

$$\epsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_y [A + B \cos 2(\alpha + 90^\circ)] \quad (3)$$

Los coeficientes A y B se calculan directamente para cualquier radio y material de las relaciones usadas en la ecuación (2). Debe de hacerse la aclaración de que estos valores de A y B son teóricos y no consideran el efecto del porcentaje de la deformación de los extensómetros a usar, por lo que más adelante se explicará como se determinan los coeficientes con la calibración debida.

Si A y B son negativos indica que el esfuerzo residual es a tensión (+) produciendo deformaciones relajadas de compresión (-). Lo anterior debido principalmente a que el método de taladrado relaja de esfuerzos la pieza y se obtienen lecturas inversas a las reales.

Para poder determinar los esfuerzos residuales principales así como sus direcciones con respecto a cualquier sistema de referencia es necesario tres mediciones independientes de deformación. Estas tres mediciones permitirán la solución de las tres incógnitas σ_x , σ_y y la dirección β . El procedimiento más común para medir las deformaciones es el uso de tres extensómetros eléctricos en forma de roseta alrededor del sitio en donde se taladra el agujero.

1.4.2 Análisis de esfuerzos residuales con extensómetros de roseta.

En la figura 1.3 se muestran tres extensómetros orientados radialmente con respecto al centro y a una distancia R de éste y localizados a los ángulos:

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= \beta \text{ (arbitrario)} \\ \alpha_2 &= \beta + 45^\circ \\ \alpha_1 &= \beta + 90^\circ \end{aligned}$$

Sustituyendo estos tres ángulos en las ecuaciones (3) y resolviendo tres ecuaciones simultáneas en σ_x , σ_y , β y medimos las deformaciones ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 da como resultado:

$$\sigma_x = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (4a)$$

$$\sigma_y = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_1)^2} \quad (4b)$$

$$\tan 2\beta = \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_1} \quad (4c)$$

Donde A y B se determinan por calibración experimental.

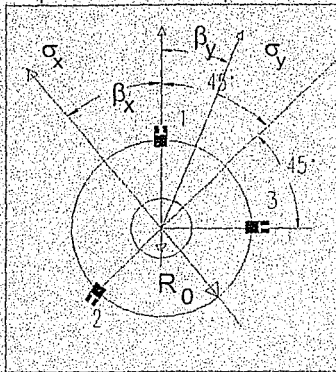


Figura 1.3: Disposición de los extensómetros con respecto al agujero³

Las ecuaciones anteriores definen los esfuerzos principales σ_x y σ_y . Note que el ángulo β está referido al extensómetro 1 (figura 1.3) y es positivo en dirección del giro de las manecillas del reloj, y además:

$$\begin{aligned} \beta &= \beta_x \text{ si } (\epsilon_1 + \epsilon_3)/2 < \epsilon_1 \\ \beta &= \beta_y \text{ si } (\epsilon_1 + \epsilon_3)/2 < \epsilon_1 \\ \beta &= 45^\circ \text{ si } \epsilon_1 = \epsilon_3 \end{aligned}$$

1.4.3 Efecto de la profundidad del agujero. - La figura 1.4 muestra el resultado de algunas investigaciones[2],[3],[5],[6],[7],[8], en las que se muestra el incremento de deformación medida cuando la profundidad del agujero incrementa. Las deformaciones resultantes en la vecindad inmediata del agujero tienden a un valor asintótico cuando la profundidad alcanza un valor entre 1.0 y 1.2 veces el diámetro del agujero. Estas gráficas se obtuvieron en casos controlados cuidadosamente donde el esfuerzo fue uniaxial y no variaba con la profundidad. Como se puede observar las formas de estas gráficas son similares para deformación contra profundidad del agujero. Es claro que la deformación leída depende del diámetro D, del diámetro D_0 y de la profundidad Z, por lo que es

³ Figura redibujada de la norma ASTM.E837-85[1]

necesario calibración especial para determinar las constantes A y B, ya que estas son función de la posición de los extensómetros.

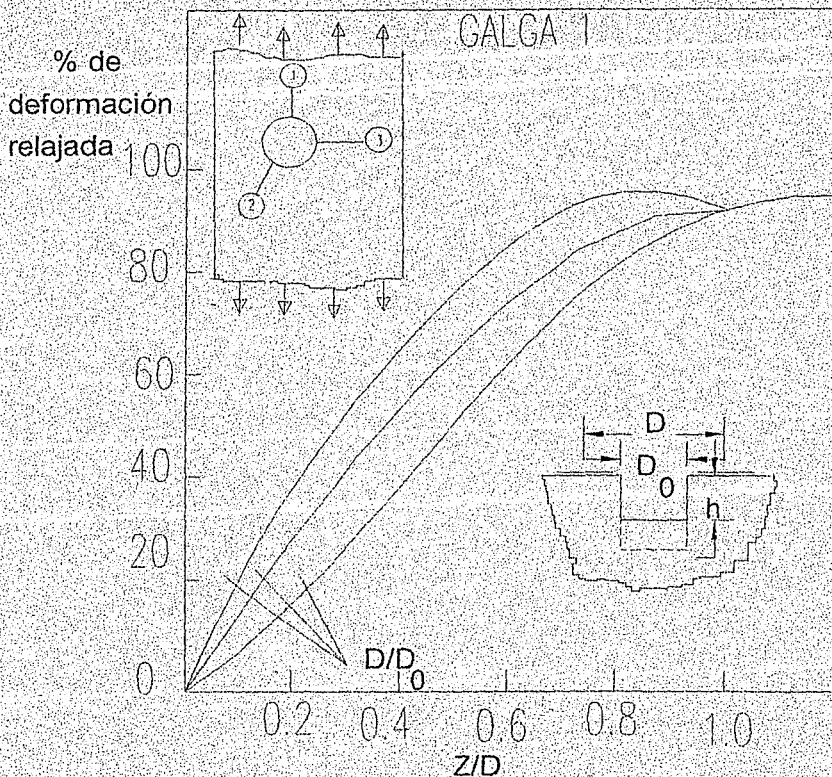


Figura 1.4 Resultado de algunas investigaciones del efecto de la profundidad¹.

La norma ASTM E837¹ establece que la profundidad del agujero se puede incrementar en pasos pequeños para medir la deformación en cada incremento (ΔZ) y de esta forma poder graficar las deformaciones contra la relación (Z/D_0).

1.4.4 Determinación de los coeficientes A y B de calibración.

La solución de Kirsch define A y B con las relaciones de la ecuación (2), pero es importante recordar que la solución teórica esta restringida a:

¹ Gráfica tomada de la ficha técnica "Residual Stress Measurement", de Measurements Group, Inc., Raleigh, North Carolina, 1993.

- * Agujeros pequeños circulares en láminas de espesor delgado
- * Esfuerzos (deformaciones) en un punto y no prevén el efecto del porcentaje de deformación del extensómetro en un área finita.
- * El esfuerzo es constante a través del espesor de la placa.

En la mayoría de las veces el método de taladrado se utiliza en secciones delgadas. Se ha demostrado que las ecuaciones (4) también describen el campo de esfuerzos alrededor de un agujero ciego, y por lo tanto los coeficientes A y B se pueden determinar por calibración experimental. Mediante esta calibración se toma en cuenta automáticamente las propiedades mecánicas del material, la geometría de la roseta, la profundidad del agujero, el diámetro y el porcentaje de deformación de los extensómetros.

1.4.5 Calibración experimental. - La calibración para encontrar A y B se lleva a efecto instalando una roseta para medir esfuerzos residuales sobre un espécimen cargado uniaxialmente en tensión del mismo material que la pieza a analizar.

Dicha roseta debe estar alineada paralelamente a la dirección de la carga. Se debe tener cuidado para que los esfuerzos en flexión sean mínimos. Se sugiere que el espesor de la probeta de calibración (w) sea igual, o más grande que diez veces el diámetro del agujero (10D₀). También la longitud entre asientos del espécimen debe exceder cinco veces el espesor (5w). Cuando se determina A y B para aplicaciones con agujero ciego, el espesor de la profundidad (t) deberá ser menor de cinco veces el diámetro (5D₀). El esfuerzo de tensión (σ_C) de calibración no debe exceder la mitad del límite de proporcionalidad del material y con la carga aplicada antes y después del taladrado se miden las deformaciones (ε_A, ε_D). La deformación de calibración ε_C se define como:

$$\epsilon_c = (\epsilon_d - \epsilon_a)$$

El procedimiento de calibración se efectúa normalmente incrementando la carga y graficando σ_C contra ε_C, como se ilustra en la figura 1.5. Los valores de calibración se calculan de:

$$A = \frac{\epsilon_{c1} + \epsilon_{c2}}{2\sigma_c}$$

$$B = \frac{\epsilon_{c3} - \epsilon_{c1}}{2\sigma_c}$$

Por ejemplo, en la figura 1.5 se muestran los valores de ε_{C1}, ε_{C3} = +39 y -90 με (microdeformaciones) respectivamente para un acero inoxidable 304, cuando σ_C es 69 Mpa (10 000 psi) entonces,

$$A = -0.36 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$$

$$B = -0.94 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$$

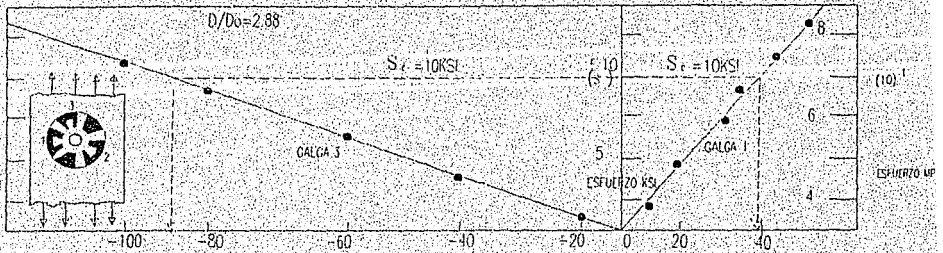


Figura 1.5 Gráfica de esfuerzo contra deformación para determinar los coeficientes de calibración³.

1.4.6 Análisis numérico.- La calibración es un método confiable, más sin embargo requiere de tiempo adicional, experiencia y esfuerzo, por lo que Schajer[4],[9],[10] redefinió los coeficientes A y B como:

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \times a \quad (5)$$

$$B = -\frac{1}{2E} \times b \quad (5b)$$

En donde los coeficientes a y b se establecieron mediante un programa con computadora utilizando análisis numérico. El programa considera la geometría del extensómetro en la rejilla además de la sensibilidad al cableado (de baja resistencia). Dichos coeficientes son independientes de las propiedades mecánicas, aunque se ha comprobado que b es ligeramente dependiente de ν . La figura 1.6 muestra una gráfica para poder determinar a y b sabiendo la relación D/D_0 para dos tipos de arreglos de rosetas.

1.4.7 Técnicas experimentales.

Como en todos los métodos experimentales, las propiedades del material, la instrumentación, así como los procedimientos son esenciales para la exactitud de los resultados, de igual manera en el método de taladrar y medir esfuerzos residuales con extensómetros la exactitud de las mediciones dependen de:

- a) -De la selección e instalación de los extensómetros
- b) -De los instrumentos de medición
- c) -Del alineamiento adecuado del extensómetro
- d) -De los resultados de los ensayos de las propiedades mecánicas

³ Figura redibujada de la publicación de Schajer[4].

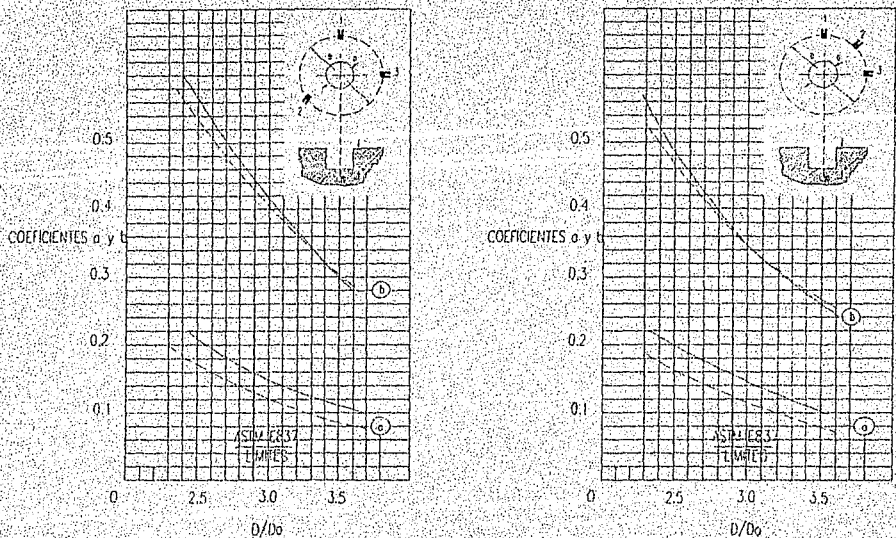


Figura 1.6 Gráficas para determinar los coeficientes a y b graficados contra D/D_0 ⁶.

A).- Selección e instalación de los extensómetros

Instalar tres extensómetros individuales de tal forma que queden orientados y ubicados a distancias correctas no es fácil. Por lo que se han diseñado y desarrollado diferentes configuraciones de rosetas para medir esfuerzos residuales, como por ejemplo la mostrada en la figura 1.7, de forma que queden integrados los tres extensómetros en cada roseta y al mismo tiempo proveer marcas para el centrado del taladrado.

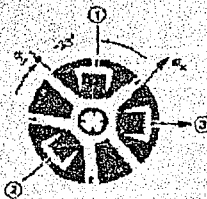


Figura 1.7 Roseta tipo "RE" para medir esfuerzos residuales

⁶ Gráficas redibujadas de la ficha técnica "ResidualStress Measurement", de Measurements Group, Inc, Raleigh, North Carolina, 1993.

Todas las configuraciones son disponibles para diferentes compensaciones de temperatura. El diseño "RE" es disponible en diferentes tamaños (031RE, 062RE, 125RE). Las configuraciones RK y UM tienen 1.58 mm. (1/16 in) de longitud de la galga y están completamente encapsuladas.

Debido a que las mediciones de esfuerzos residuales normalmente son a temperatura ambiente, el adhesivo a usar para pegar las rosetas es generalmente M-Bond 200.

La preparación de la superficie debe ser cuidadosa. Además se debe seguir la metodología correcta tanto para el pegado de la roseta como para la instrumentación.

B) - Instrumentos de medición.

El instrumento más usado para medir las deformaciones relajadas es un indicador de deformaciones de precisión operado con baterías con una unidad de balance e interruptores. Los modelos usados comúnmente son P-3500 para el indicador y el SB-10 para el balance, de la marca Vishay.

C) - Alineamiento de la roseta.

El taladrado requiere de las siguientes consideraciones:

- * Alineamiento del agujero.- De las consideraciones analíticas es obvio que el agujero debe ser posicionado en el centro de la roseta.
- * Forma del agujero.- Idealmente el agujero debe ser cilíndrico, con un diámetro uniforme y con un plano en el fondo.
- * Técnica de maquinado.- El maquinado debe de realizarse de forma que los esfuerzos residuales inducidos se minimicen al remover el material.

Si las anteriores consideraciones se satisfacen, entonces las deformaciones relajadas se pueden sustituir en las ecuaciones (4) y con ellas se determinan los esfuerzos residuales.

Alineamiento.- Recientemente se ha demostrado que el alineamiento de la roseta tiene mucha influencia en la exactitud de las mediciones[6] y por ende en el error del cálculo. En la práctica se requiere que el error de desalineamiento no exceda 0.025 mm. (0.001 in). Por lo que el método provee una guía para el taladrado, la cual incluye un microscopio para un alineamiento manual con cuatro pernos y el vástago para el taladrado.

Forma de agujero y maquinado.- Existen diversas formas de taladrar el agujero y todas ellas han sido estudiadas[1],[2],[3],[6]. De estos estudios se sabe con certeza que tienen efecto en la exactitud del método, el tamaño del agujero así como la forma y el proceso de maquinado. El maquinado puede ser con un cortador de dedo manual (end mill) o bien a alta velocidad. Se exige que el

cortador sea rígido y que el proceso de cortado sea en línea recta. Los cortadores de dedo son recomendables en materiales maquinables como aluminio, aceros, etc.

La figura 1.8 muestra un esquema del dispositivo de maquinado más usado (mod. RS-200 de la marca Vishay) con el taladro montado con el cortador. Debe de aclararse que el taladrado puede efectuarse manualmente o con un motor eléctrico.

Se puede utilizar también una turbina de aire a altas velocidades junto con cortadores de carburo para cortar como lo demostró Flaman[7],[8]. Este proceso presenta grandes ventajas con respecto al cortador de dedo entre las que se encuentran: adecuada forma del agujero y adaptabilidad para incrementar el taladrado. Sin embargo los cortadores de carburo no son efectivos en vidrios, la mayoría de cerámicos, metales duros, etc. Existe la posibilidad en un futuro el uso de diamantes como cortadores, pero esto requiere de investigación.

Propiedades mecánicas. - De las ecuaciones 4 y 5 es claro que la exactitud en la determinación de los esfuerzos residuales se encuentra limitada a la exactitud en las constantes elásticas E y ν . Las propiedades mecánicas proveen de una incertidumbre de 2% en la exactitud de los resultados finales.

Cuando la concentración de esfuerzos alrededor del agujero se encuentra muy cerca al límite elástico del material, existe una incertidumbre en el cálculo de los esfuerzos residuales. Se considera que el efecto mencionado es despreciable cuando los esfuerzos residuales son menores al 70% del límite elástico del material.

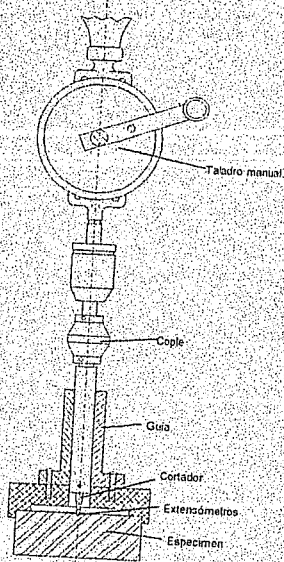


Figura 1.8 Dispositivo de centrado y alineamiento de la roseta, así como también del barrenado⁷.

⁷Esquema del dispositivo RS-200, de la marca Vishay.

II.- Alcances.

El objetivo del presente trabajo es estudiar la factibilidad de aplicar el método de taladrar un agujero y medir esfuerzos residuales a superficies curvas bajo una distribución homogénea y no homogénea con respecto a la profundidad, por lo que a continuación se establece la metodología para el estudio.

2.1 Metodología.

Para validar el método de barrenado en superficies curvas se realizan experimentos con los cuales se comparan un estado de esfuerzos conocido por medios teóricos contra un estado de esfuerzos medido mediante la norma ASTM E837-85. Por medio de un método inverso, que consiste en la aplicación de cargas conocidas que provocan un estado de esfuerzos, el cual se puede calcular y por lo tanto comparar con los resultados experimentales.

Debido a que el análisis se debe realizar para superficies curvas, se diseñan varios tubos de acero con constantes elásticas conocidas, a los cuales se les aplica presión mediante una máquina universal en compresión y posteriormente se le aplica únicamente presión interna con un sistema hidráulico, simulando en los dos casos los esfuerzos residuales con distribución homogénea y no homogénea respectivamente. Con la finalidad de que el estado de esfuerzos sea uniforme en el centro de la longitud del tubo, se establece como requisito que dicha longitud sea por lo menos 10 veces el diámetro del tubo.

Cuando se aplica compresión al tubo se obtienen lecturas de los extensómetros instalados previamente al mismo y con ellas se calcula el esfuerzo analizado. Al mismo tiempo se efectúan lecturas en la roseta que previamente se le aplicó el proceso de barrenado descrito por la norma ASTM E837-89 y se comparan los resultados obtenidos en ambos casos. Con el proceso anterior se comprobará si es aplicable el método de barrenado en superficies curvas en una distribución de esfuerzos homogénea. En caso de no serlo se buscará en cuanto sea posible los rangos de aplicación o bien las limitantes prácticas.

Posteriormente se realizarán ensayos bajo una distribución de esfuerzos no homogénea, aplicando presión interna. Para este problema se conoce la solución teórica cuando no se taladra ningún agujero, y esta dada por:

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_i}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (.6a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 P_i}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (.6b)$$

Donde:

σ_{θ} es el esfuerzo tangencial

σ_r es el esfuerzo radial

a es el radio interno del tubo

b es el radio externo del tubo

P_i es la presión aplicada

r es el punto en donde se efectúa el cálculo ($a < r < b$)

se compararán estos resultados con los resultados obtenidos al aplicar el método de barrenó ciego descrito en el primer apartado.

El estado de esfuerzos real en el centro del tubo se calcula con el esfuerzo tangencial y el esfuerzo axial, puesto que se sabe que en ese punto son esfuerzos combinados. El esfuerzo radial es cero en la superficie del tubo como lo demuestra la ecuación 6 (con $r = b$). Al mismo tiempo se monta una roseta en el centro del tubo y empleando el método de taladrar un agujero ya descrito en secciones anteriores se miden los esfuerzos y se comparan en cada caso con los teóricos. Obviamente si coinciden dichos esfuerzos con los teóricamente aplicados se concluirá que el método tal y como lo describe la norma es aplicable. En caso de no serlo se tratará de ampliarlo buscando una compensación que dependerá del diámetro de curvatura para determinados intervalos o bien se darán las limitaciones prácticas.

El estudio deberá atender los siguientes requisitos:

- a) - El método en cuanto a su aplicación debe cumplir la norma ASTM E837-85.
- b) - Usar en cuanto sea posible los datos establecidos por el fabricante del extensómetro.
- c) - Que la aplicación del método sea lo más económica posible.
- d) - Que el procedimiento se pueda efectuar en el lugar de ensayo.

III Experimentos

3.1 Realización de los ensayos.

La realización de los experimentos se divide en tres partes:

Experimento 1.- Metodología y aplicación del método, así como también la exploración de las variables involucradas en el mismo.

Experimento 2.- Comprobar si el método de barrenado ciego es aplicable a superficies curvas bajo un estado de esfuerzos homogéneo con respecto a la profundidad.

Experimento 3.- Comprobar si el método de barrenado ciego es aplicable a superficies curvas bajo un estado de esfuerzos no homogéneo con respecto a la profundidad.

A continuación se presenta la realización de las pruebas de laboratorio efectuadas mediante la metodología descrita anteriormente.

3.2 experimento 1

Experimento para aprender la Metodología y aplicación del método. Se maquina un tubo de aluminio de 400 mm. de longitud, de constantes elásticas conocidas (E y ν) y con las siguientes características:

- 1.- El espesor del tubo fue 10 mm., con el objetivo de no sobrepasar el límite elástico del material cuando se aplican 60 bar.
- 2.- El maquinado del tubo se hizo con una tolerancia de forma cilíndrica de acuerdo al dibujo técnico de la fig. 3.1.
- 3.- Se dio tolerancia de dimensión libre en los diámetros de acuerdo a la misma figura.
- 4.- Se eligió una longitud de 400 mm. para asegurar una distribución uniforme del estado de esfuerzos en el centro del tubo.

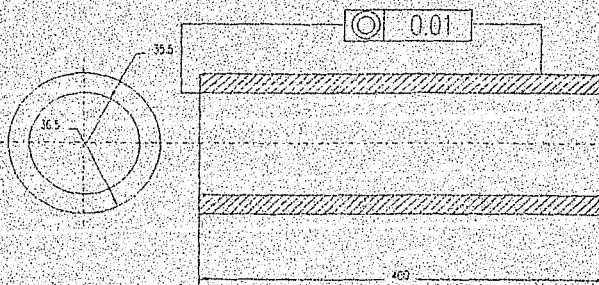


Figura 3.1.- Dibujo de taller del cilindro de aluminio.

Se diseñó un dispositivo con dos placas de acero de 6.35 mm. (1/4 de pulgada) con cuatro pernos en las esquinas, tal como lo muestra la figura 3.2. Dicho dispositivo tiene como objetivo apoyar el equipo de barrenado con el cual se centra la roseta para que el cortador perforo el agujero en el centro de la misma con mayor exactitud.

El equipo de barrenado está provisto con un microscopio que permite observar la posición correcta de la roseta, para que con ello el cortador quede centrado y realice el corte de 1.9 mm. de profundidad. La relación de la profundidad al diámetro es de 1.2.

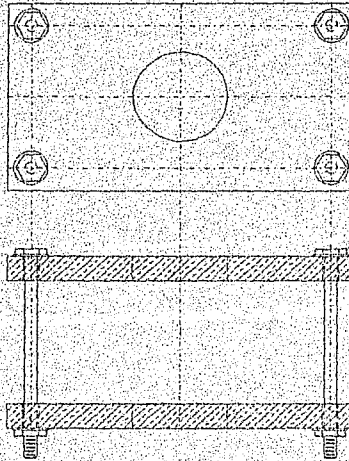


Figura 3.2 dispositivo para apoyar el aparato de taladrado y centrado de roseta.

El experimento se realizó en las siguientes etapas:

- a).-Montaje del extensómetro: El montaje de la roseta se realiza de acuerdo a la norma ASTM E837-85[1] y con las indicaciones del fabricante del extensómetro. El extensómetro utilizado fue el EA-13-062RE-120, el cual es para aplicaciones en aluminio, el módulo de elasticidad del material utilizado es de 76.814 GPa y su relación de Poisson es de 0.33.
- b).-Montaje del equipo de barrenado: A través del dispositivo mostrado en la figura (3.2) se monto e instalo el equipo de barrenado. Con el mismo se centra el cortador en la roseta de extensómetros.
- c).-Realización y medición: Se fabricó un sistema para aplicar presión interna al cilindro, a través de un sistema hidráulico de aceite a presión, con una bomba

manual (como se muestra en la figura 3.3) y al mismo tiempo se midió la presión del aceite con un manómetro de precisión.

El experimento constó de dos partes:

- 1.- Aprender la metodología y comprobar los documentos técnicos.
- 2.- Comprobación del método en cuanto a su aplicación.

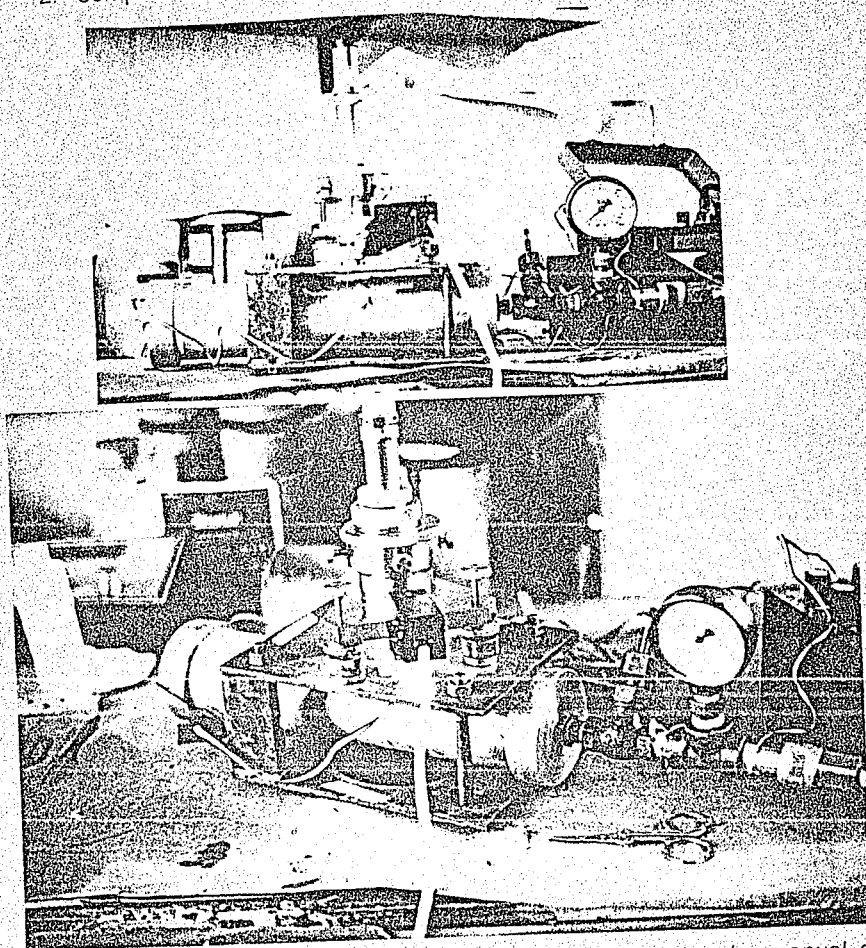


Figura 3.3 Sistema de aplicación de presión mediante una bomba manual de aceite.

manual (como se muestra en la figura 3.3) y al mismo tiempo se midió la presión del aceite con un manómetro de precisión.

El experimento constó de dos partes:

- 1.- Aprender la metodología y comprobar los documentos técnicos.
- 2.- Comprobación del método en cuanto a su aplicación.

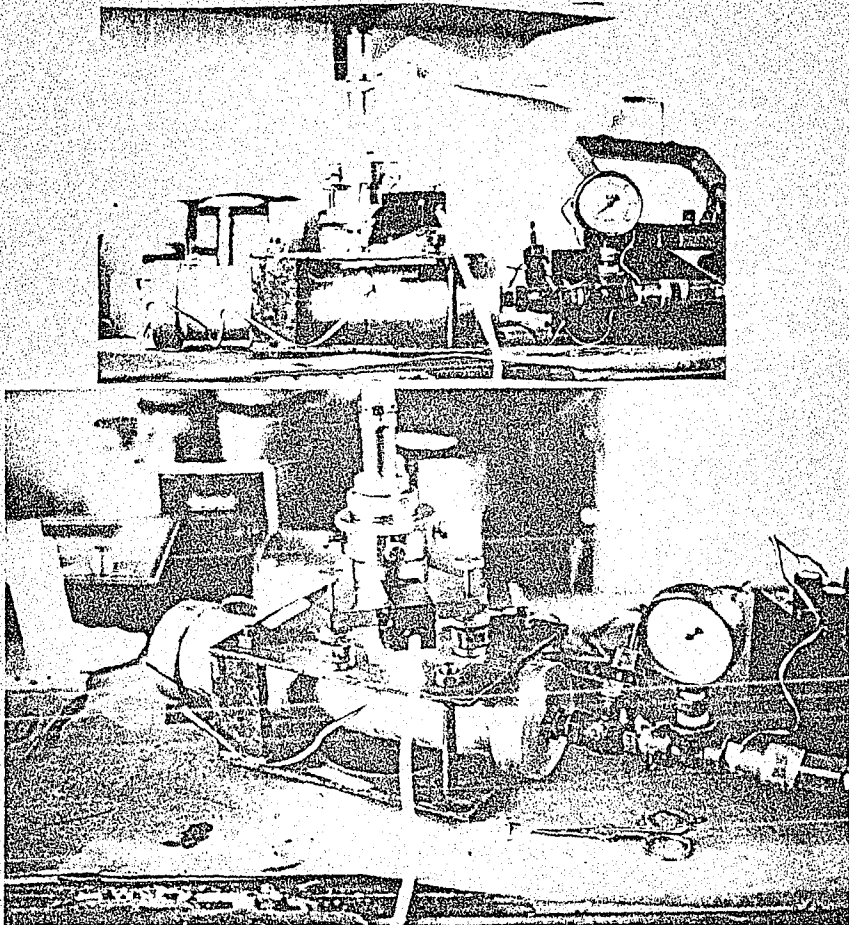


Figura 3.3 Sistema de aplicación de presión mediante una bomba manual de aceite.

La siguiente tabla muestra los resultados de las mediciones de los extensómetros de la roseta cuando no se taladra agujero, pero variando la presión aplicada al tubo. En la última columna se agrega la medición de un extensómetro unidireccional colocado diametralmente opuesto (a 180° de la posición de la roseta) y en sentido longitudinal.

Presión Aplicada en atmósferas	ϵ_1 ($\mu\epsilon$)	ϵ_2 ($\mu\epsilon$)	ϵ_3 ($\mu\epsilon$)	ϵ_4 ($\mu\epsilon$)
10	85	50	20	20
20	274	160	64	66
30	420	245	100	104
40	434	257	101	100

Tabla 3.1.- Datos obtenidos en el experimento 1.

Posteriormente se efectuaron ensayos sobre el mismo pero ahora taladrando un agujero ciego. Los resultados de este ensayo se presentan en la siguiente tabla de lecturas, en la cual se incrementa la profundidad de barrenado y se aplica presión interna al tubo.

Deformación en $\mu\epsilon$	Profundidad en mm. (min)	Presión = 20 Atm.	Presión = 30 Atm.	Presión = 40 Atm.	Presión = 50 Atm.
ϵ_1	0.254	150	268	392	505
ϵ_2	(10)	96	165	250	312
ϵ_3		32	52	77	93
ϵ_1	0.381	92	274	396	518
ϵ_2	(15)	55	176	252	335
ϵ_3		10	44	60	88
ϵ_1	0.508	105	258	360	
ϵ_2	(20)	66	156	218	
ϵ_3		18	45	65	
ϵ_1	0.635	102	200	330	434
ϵ_2	(25)	75	150	235	304
ϵ_3		16	29	48	67
ϵ_1	0.762	89	218	316	412
ϵ_2	(30)	60	151	201	270
ϵ_3		18	23	26	47
ϵ_1	0.889	122	238	340	437
ϵ_2	(35)	75	150	208	272
ϵ_3		18	40	45	65
ϵ_1	1.016	120	218	289	377
ϵ_2	(40)	75	144	183	243
ϵ_3		18	30	52	69
ϵ_1	1.143	74	203	308	396
ϵ_2	(45)	48	130	200	254
ϵ_3		14	9	13	23

e1	1.27	78	212	296	387
e2	(50)	50	162	230	290
e3		17	44	60	82
e1	1.397	88	201	283	376
e2	(55)	63	139	196	254
e3		20	43	64	74
e1	1.524	83	206	298	351
e2	(60)	56	140	200	233
e3		20	38	54	65
e1	1.651	74	200	290	370
e2	(65)	48	138	193	258
e3		11	37	50	66
e1	1.778	111	216	294	393
e2	(70)	72	137	190	256
e3		16	43	56	73
e1	1.9	76	214	290	375
e2	(75)	52	145	187	252
e3		16	50	64	87

Tabla 3.2.- Datos obtenidos en el experimento 1, barrenando un agujero.

3.3 Experimento 2

Experimentos para la comprobación del método de barrenado en un estado de esfuerzos homogéneo.

En tres tubos de acero se instalaron rosetas de medición de esfuerzos residuales con denominación EA-09-062RE-120¹. A dichos tubos se les aplico un esfuerzo homogéneo de compresión de manera que simulara un estado de esfuerzos residuales homogéneo a través del espesor del tubo. Para lograr el objetivo se aplicaron cargas en compresión con una máquina universal de 25 toneladas.

El proceso de instalación de los extensómetros, así como del dispositivo de centrado del cortador se efectúa conforme a la norma ASTM ya mencionada y también con el procedimiento descrito para el tubo de aluminio.

Una vez montado el experimento se aplican gradualmente cargas en compresión al tubo, y se efectúan las mediciones de los extensómetros de la roseta con un agujero taladrado a la profundidad que establece la norma ASTM E837-85[1] (dichas lecturas aparecen en la tabla como ext1, ext2 y ext3). Previamente se instalan dos extensómetros diametralmente opuestos a la roseta (a 180°) para que con ellos se tenga una referencia de comparación en las mediciones y en los cálculos (en la tabla aparecen estas lecturas como ext4 y ext5).

¹ Debido a dificultades en la obtención de tubos de aluminio de distintos diámetros se optó por cambiar de material.

La siguiente tabla presenta los datos mencionados

Tubo 1	cx1($\mu\epsilon$)	cx2($\mu\epsilon$)	cx3($\mu\epsilon$)	cx4($\mu\epsilon$)	cx5($\mu\epsilon$)
carga 1	7	-13	-55	7	-25
carga 2	15	-27	-86	4	-55
carga 3	21	-40	-128	5	-80
carga 4	28	-54	-153	4	-101
carga 5	37	-66	-183	4	-130
carga 6	43	-77	-218	3	-160
carga 7	48	-90	-247	3	-195
Tubo 2	cx1($\mu\epsilon$)	cx2($\mu\epsilon$)	cx3($\mu\epsilon$)	cx4($\mu\epsilon$)	cx5($\mu\epsilon$)
carga 1	6	-5	-27	16	-55
carga 2	12	-12	-43	32	-114
carga 3	19	-21	-69	44	-158
carga 4	25	-29	-95	54	-200
carga 5	33	-43	-124	65	-245
carga 6	41	-49	-158	75	-287
carga 7	52	-65	-190	87	-323
Tubo 3	cx1($\mu\epsilon$)	cx2($\mu\epsilon$)	cx3($\mu\epsilon$)	cx4($\mu\epsilon$)	cx5($\mu\epsilon$)
carga 1	4	-5	-16	6	-7
carga 2	6	-9	-36	9	-10
carga 3	9	-14	-51	11	-14
carga 4	10	-18	-60	12	-19
carga 5	13	-20	-67	13	-23
carga 6	16	-23	-86	15	-27
carga 7	16	-26	-93	16	-31
carga 8	21	-33	-108	17	-37

Tabla 3.3.- Datos obtenidos en el experimento 2

Experimento 3

Experimentos para la comprobación del método en un estado de esfuerzos no homogéneo.

Posteriormente se procedió a conectar en los tubos un sistema hidráulico de tal forma que se les pudiera aplicar presión interna. Para tal efecto se conectaron válvulas de paso así como un manómetro para poder verificar la presión aplicada con la lectura de los extensómetros montados en los tubos a 180° de las rosetas.

En cada tubo se realizó el montaje y se calibraron de los instrumentos de medición. El procedimiento de instalación de las rosetas así como el montaje del dispositivo de taladrado es idéntico al descrito en el experimento 2.

En seguida se realizó el experimento incrementando la profundidad de taladrado con paso de 5 milésimas de pulgada , hasta llegar a la profundidad establecida y en cada paso se aplicó presión variable, controlándola mediante un extensómetro. Por seguridad se calibraban los medidores de deformación a cero en cada cambio de la profundidad.

Mediante este procedimiento se obtuvieron lecturas para cada presión aplicada y se presentan en el anexo 1, en el cual también se presentan las graficas correspondientes al comportamiento de las lecturas de los extensómetros.

IV. Análisis de resultados

Los experimentos descritos en el apartado anterior se analizan de la siguiente manera:

4.1 Experimento 1. Experimento para aprender la Metodología y aplicación del método.

Como ya se mencionó, en este experimento se aprende primeramente la metodología y se comparan los esfuerzos calculados a través de los extensómetros, como lo establece la norma ASTM E837[1], con los esfuerzos teóricos aplicados para comprobar si coinciden.

Los esfuerzos así como su ángulo se calculan como se establece en la norma empleando las expresiones:

$$\sigma_x = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (7)$$

$$\tan 2\beta = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}$$

Donde ε_1 , ε_2 y ε_3 corresponden a los valores de la tabla (3.1).

El cálculo del esfuerzo teórico en el punto donde se instala la roseta y en el caso de aplicar presión interna al tubo de aluminio sin efectuar algún barreno, se obtiene de la fórmula (6).

A continuación se presenta una tabla comparativas de los esfuerzos teóricos en función de los calculados con las lecturas de los extensómetros cuando aún no se taladra ningún barreno, para las distintas presiones.

Presión en bares	σ_1 (en MPa)	σ_2 (en MPa)	ángulo (en grados)	esfteor1(en MPa)	esfteor2(en MPa)
10	7.88	3.94	2.19	7.509	3.75
20	15.77	7.8	2.44	16.77	8.38
30	23.65	11.83	2.67	25.68	12.84
40	31.54	15.6	1.80	34.63	17.315

Tabla 4.1.- Cálculo de esfuerzos para el experimento 1.

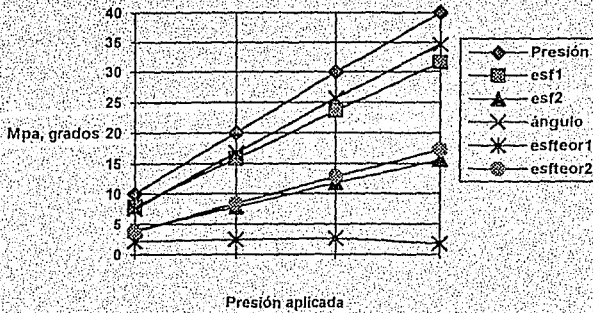


Figura 4.1 Comparación entre los esfuerzos calculados y los teóricos para el experimento 1.

Como se muestra en las tablas anteriores los esfuerzos teóricos son muy próximos a los esfuerzos calculados para un cilindro sujeto a presión interna en la parte central, lo cual indica que la instalación de los extensómetros es adecuada.

Con el objetivo de observar el comportamiento de las diversas variables involucradas en este experimento se barrenó un agujero tal como lo establece la norma y se efectuaron las mediciones, variando la presión interna aplicada. La figura 4.2 muestra los resultados obtenidos para una presión, como un ejemplo.

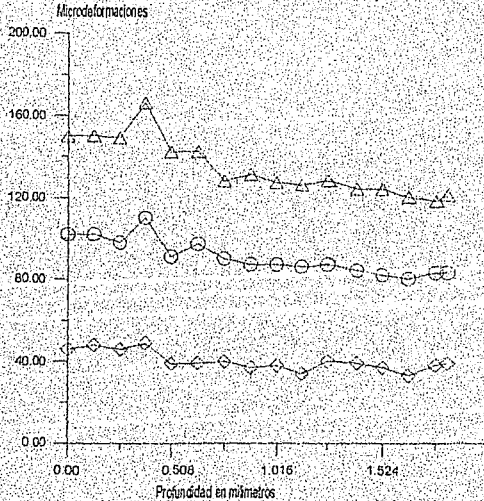


Figura 4.2.- Variación de las lecturas de los extensómetros con respecto a la profundidad para una presión aplicada.

De la gráfica se nota que las lecturas en $\mu\epsilon$ (microdeformaciones) tienden a estabilizarse y se deduce que las variables más importantes son la profundidad de barrenado y la presión aplicada.

4.2 Experimento 2.

Experimentos relativos a la comprobación del método de barrenado en un estado de esfuerzos homogéneo.

Con los datos obtenidos que se muestran en la tabla (3.3) se calculan los esfuerzos principales con las fórmulas 4.1 tal como lo establece la norma ASTM.

Los coeficientes A y B se calcularon con los datos proporcionados por el fabricante del extensómetro.

Los resultados se presentan en la Tabla 4.2 en las columnas de esf_1 , esf_2 , y el ángulo.

Se presentan, además, dos columnas en las que se calculan los esfuerzos principales con las fórmulas:

$$Esfcal1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{xx} + \nu\epsilon_{yy})$$

$$Esfcal2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_{yy} + \nu\epsilon_{xx})$$

Donde ϵ_{xx} y ϵ_{yy} son las lecturas de los extensómetros 4 y 5 respectivamente.

Finalmente se presenta en la última columna de la misma tabla el esfuerzo teórico calculado a partir de:

$$Esfteoer1 = \frac{P_{aplicada}}{A_{efectiva}}$$

De los datos de la tabla se puede observar que el estado de esfuerzos calculados a partir de las fórmulas que establece la norma no coincide con los valores teóricos calculados, ni con respecto al cálculo efectuado con las ecuaciones constitutivas ($Esfcal1$ y $Esfcal2$). Pero el valor de $esfcal1$ coincide con el de $esfteoer1$ con una pequeña variación como se presenta en la gráfica 4.5. Esto indica que la fórmula teórica es válida en el centro del tubo.

Tubo 1	ext1 με	ext2 με	ext3 με	ext4 με	ext5 με	esf1 Mpa	esf2 Mpa	ángulo	esfcal 1 Mpa	esfcal 2 Mpa	esfteo r1 Mpa
Carga 1	7	-13	-55	13	-25	4.92	36.2	9.7	-4.41	1.15	-5
Carga 2	15	-27	-86	19	-55	6.06	54.8	4.7	-10.3	522	-9.9
Carga 3	21	-40	-128	28	-80	9.83	81.9	5.1	-14.9	835	-15
Carga 4	28	-54	-153	18	-101	10.3	96.9	2.6	-20	-2.57	-20
Carga 5	37	-66	-183	20	-130	10.1	115	1.8	-25.9	-3.97	-25
Carga 6	43	-77	-218	22	-160	12.7	137	2.3	-32	-5.43	-30
Carga 7	48	-90	-247	24	-195	15	156	1.8	-39.2	-7.2	-35
Tubo 2	ext1 με	ext2 με	ext3 με	ext4 με	ext5 με	esf1 Mpa	esf2 Mpa	ángulo	esfcal 1 Mpa	esfcal 2 Mpa	esfteo r1 Mpa
Carga 1	6	-5	-27	16	-55	7.23	17.3	9.2	-10.5	-104	-9.38
Carga 2	12	-12	-43	32	-114	0.92	-35.9	3.6	-21.8	-459	-19.2
Carga 3	19	-21	-69	44	-158	4.02	-51.2	2.6	-30.2	-71	-28.1
Carga 4	25	-29	-95	54	-200	1.3	-65.6	2.8	-38.4	-1.25	-37.5
Carga 5	33	-43	-124	65	-245	1.62	-78.7	9.1	-47.1	-1.77	-46.9
Carga 6	41	-49	-158	75	-287	2.58	-97.8	2.7	-55.2	-2.32	-56.3
Carga 7	52	-65	-190	87	-323	1.53	-112	9.4	-62	-2.07	-65.7
Tubo 3	ext1 με	ext2 με	ext3 με	ext4 με	ext5 με	esf1 Mpa	esf2 Mpa	ángulo	esfcal 1 Mpa	esfcal 2 Mpa	esfteo r1 Mpa
Carga 1	4	-5	-16	6	-7	3.6	9.93	2.8	-1.09	814	-763
Carga 2	6	-9	-36	9	-10	2.46	23.3	7.9	-1.52	1.25	-1.52
Carga 3	9	-14	-51	11	-14	3.34	32.7	6.5	-2.23	1.42	-2.28
Carga 4	10	-18	-60	12	-19	4.44	38.4	5.6	-3.22	1.32	-3.05
Carga 5	13	-20	-67	13	-23	3.82	42.5	4.9	-3.99	1.27	-3.81
Carga 6	16	-23	-86	15	-27	5.07	55	6.6	-4.7	1.44	-4.57
Carga 7	16	-26	-93	16	-31	6.39	59.6	6.4	-5.47	1.40	-5.33
Carga 8	21	-33	-108	17	-37	6.19	68.4	4.6	-6.6	1.23	-6.09

Tabla 4.2.- Cálculo de esfuerzos para el experimento 2.

En las siguientes figuras (4.3-4.6) se muestra el comportamiento de los distintos datos encontrados en el experimento 2.

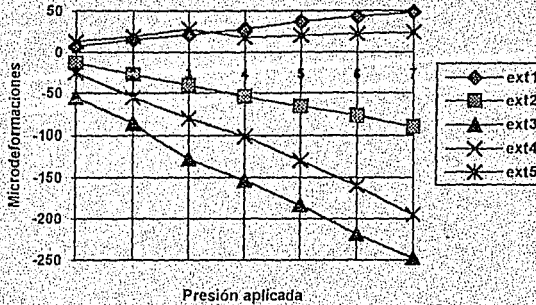


Figura 4.3 Gráfica que muestra la variación de las lecturas de los extensómetros conforme se aumenta la presión para el tubo 1.

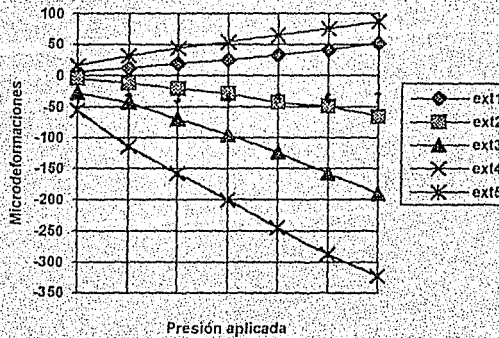


Figura 4.4 Gráfica que muestra la variación de las lecturas de los extensómetros conforme se aumenta la presión para el tubo 2.

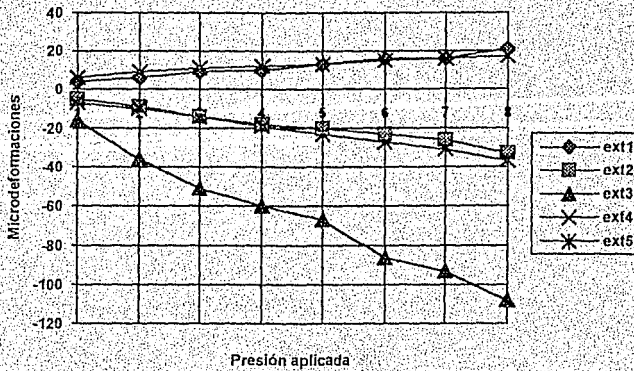


Figura 4.5 Gráfica que muestra la variación de las lecturas de los extensómetros conforme se aumenta la presión para el tubo

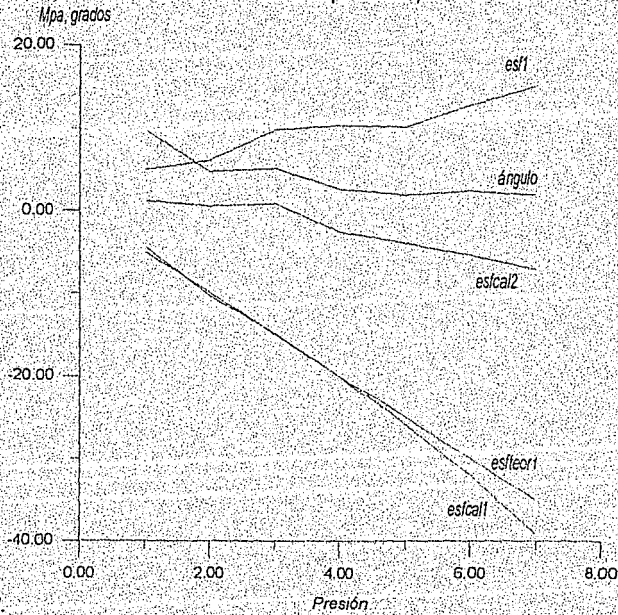


Figura 4.6 (a) Gráfica de esfuerzos en el tubo de 38.1 mm de diámetro en el experimento 2.

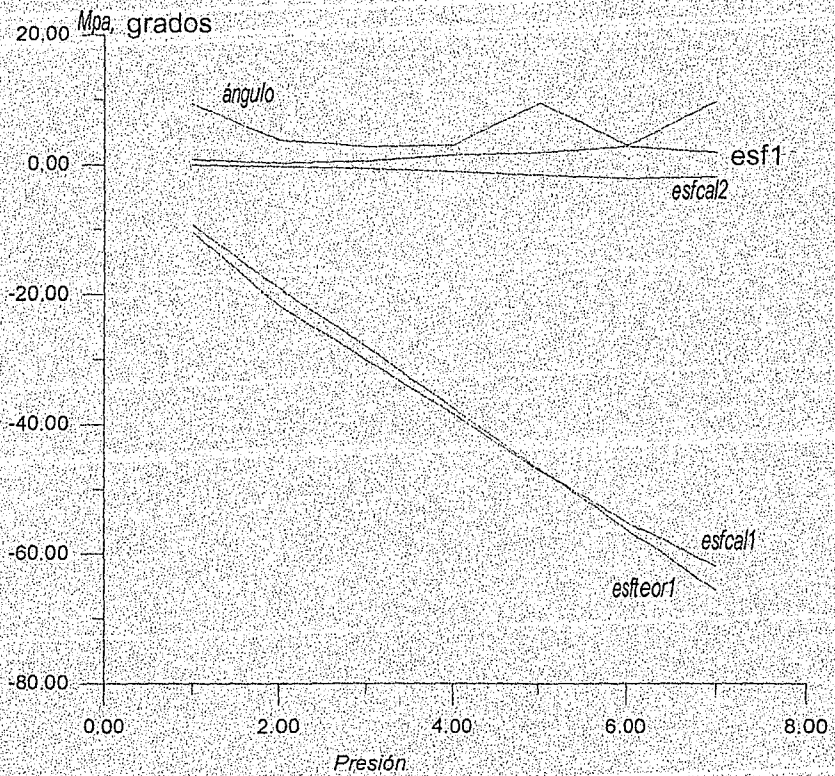


Figura 4.6 (b) Gráfica de esfuerzos en el tubo de 31.8 mm de diámetro en el experimento 2.

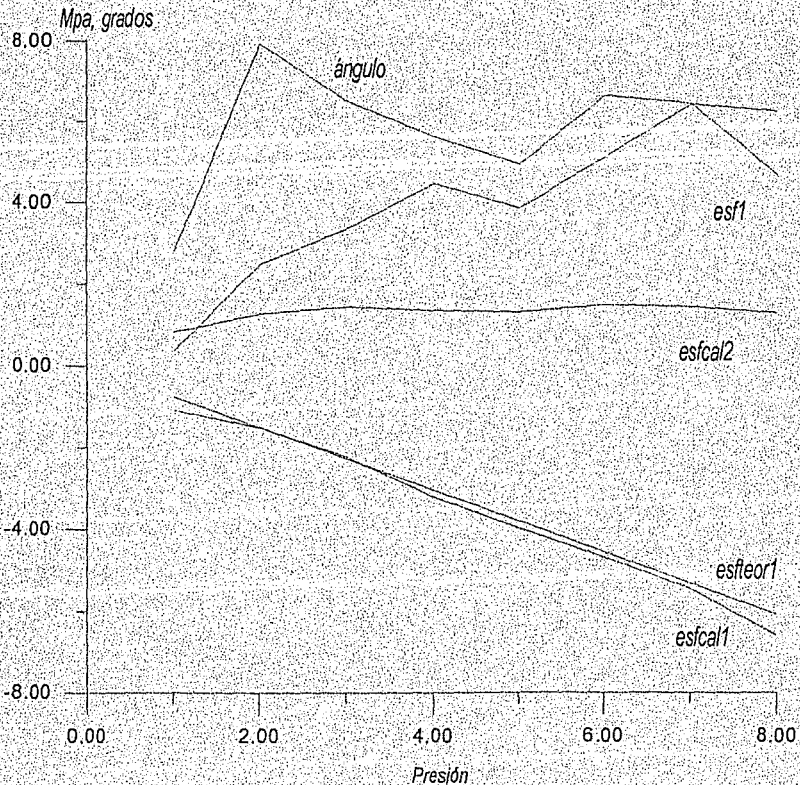


Figura 4.6 (c) Gráfica de esfuerzos en el tubo de 25.4 mm de diámetro en el experimento 2.

De las gráficas se infiere que:

- 1.- Existe un comportamiento lineal entre la presión aplicada y los esfuerzos medidos.
- 2.- Coincide el esfteor1 con esfcál1 con un error despreciable (figura 4.6 a, b y c).
- 3.- No existe correspondencia alguna entre el esfuerzo calculado conforme a la norma ($\sigma_1 = \text{esf1}$ y $\sigma_2 = \text{esf2}$) y los esfuerzos teóricos en el centro del cilindro (esfcál1 y esfcál2) para un estado de esfuerzos homogéneo con respecto a la profundidad del barrenado efectuado conforme a la norma ASTM.

4.3 Experimento 3.- Experimentos relativos a la comprobación del método en un estado de esfuerzos heterogéneo (no homogéneo).

Con los datos de microdeformaciones tomados de las tablas del anexo 1 se calculan los esfuerzos principales con las fórmulas (4) para cada presión aplicada y para cada profundidad de barrenado. Dichos cálculos se presentan en la tabla 4.3 como esf_1 y esf_2 para una presión y para un tubo como ejemplo.

Se presentan además, en la misma tabla 4.3 la relación entre cada uno de los esfuerzos calculados con (4) y la profundidad de taladrado (en la tabla como Relación/h), para observar la variación con respecto a la profundidad del taladrado.

Se presenta una columna en la tabla 4.3 con la relación entre los esfuerzos obtenidos con (4), y otra con la relación entre dichos esfuerzos y la presión aplicada.

Como ejemplo, en la figura 4.7 se grafica una de las lecturas de los extensómetros para una visualización del comportamiento de las mismas de los datos del experimento para una presión.

Debe mencionarse que en la tabla 4.3 a manera de ejemplo se muestra un cálculo para una presión aplicada al tubo 1 (38.1 mm. de diámetro). Para las demás presiones aplicadas, así como también para los otros tubos, los datos de cálculos, lecturas y gráficas se presentan en el anexo 1.

Profundidad mm	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Angulo	Relación Esf1/h	Relación Esf2/h	Relación Esf1/Esf2	Esf1/Presión	Esf2/Presión
0	17	30	50	17	-114.04	-97.98	5.99	ERR	ERR	1.16	-47.68	-40.96
	19	36	55	17	-125.67	-108.50	1.59	-25.13	-21.70	1.16	-52.54	-45.36
0.254	9	32	55	17	-112.22	-90.31	0.00	-11.22	-9.03	1.24	-46.91	-37.76
0.381	14	32	45	17	-100.83	-85.88	-4.58	-6.72	-5.73	1.17	-42.15	-35.90
0.508	17	28	47	17	-108.66	-93.87	7.47	-5.43	-4.69	1.16	-45.42	-39.24
0.635	12	28	45	17	-98.05	-82.33	0.87	-3.92	-3.29	1.19	-40.99	-34.42
0.762	12	28	44	17	-96.23	-80.99	0.00	-3.21	-2.70	1.19	-40.23	-33.86
0.889	14	32	47	17	-104.41	-88.63	-2.60	-2.98	-2.53	1.18	-43.65	-37.05
1.016	10	29	46	17	-97.19	-80.02	-1.59	-2.43	-2.00	1.21	-40.63	-33.45
1.143	13	30	47	17	-103.03	-86.84	0.00	-2.29	-1.93	1.19	-43.07	-36.30
1.27	16	30	47	17	-107.10	-92.27	2.76	-2.14	-1.85	1.16	-44.77	-38.57
1.397	20	33	47	17	-112.45	-99.58	1.06	-2.04	-1.81	1.13	-47.01	-41.63
1.524	13	30	45	17	-99.41	-84.14	-1.79	-1.66	-1.49	1.18	-41.56	-35.17
1.651	12	26	41	17	-90.77	-76.95	0.99	-1.40	-1.18	1.18	-37.95	-32.17
1.778	12	27	36	17	-81.84	-70.06	-7.02	-1.17	-1.00	1.17	-34.21	-29.29
1.9	9	19	34	17	-74.11	-61.97	5.65	-1.03	-0.86	1.20	-30.98	-25.91

Tabla 4.3 Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 1, presión 1). Las lecturas de los extensómetros están en microdeformaciones y los esfuerzos así como también la presión en Mpa.

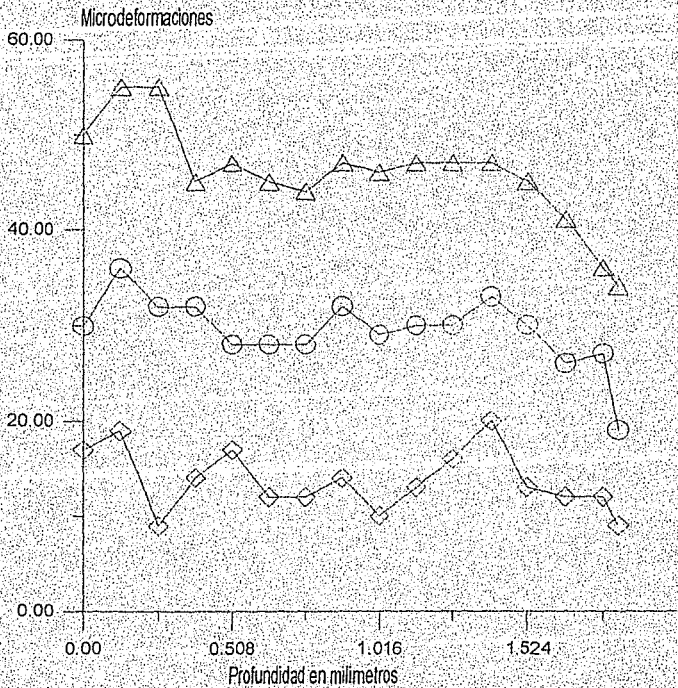


Figura 4.7.- Comportamiento de las lecturas de los extensómetros para el tubo 1, presión 1.

A continuación se grafican los resultados de los cálculos para una mejor interpretación de resultados.

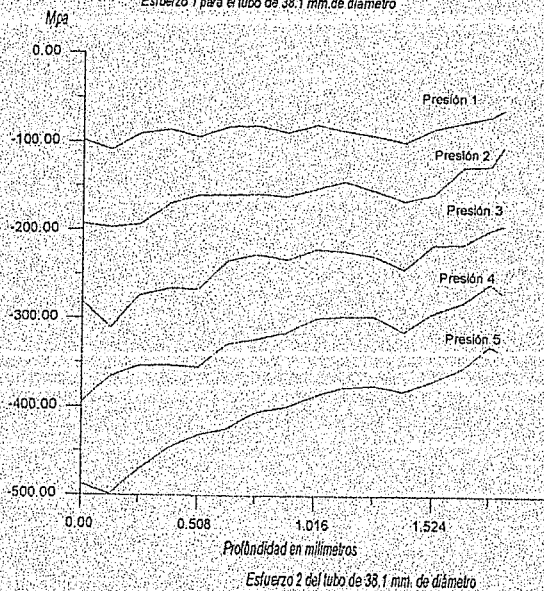
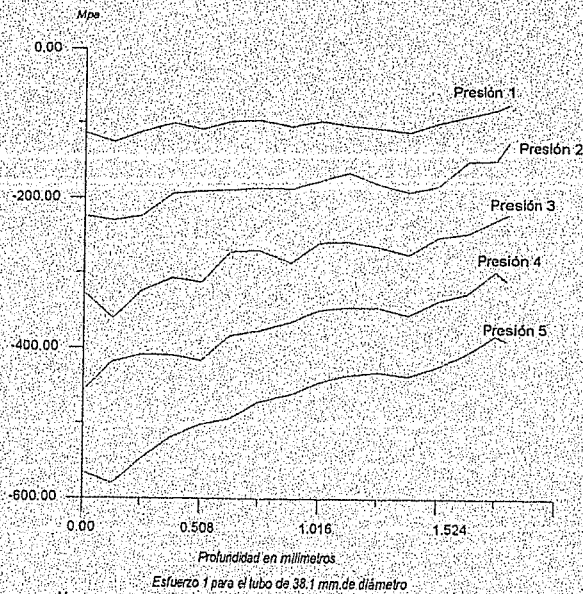


figura 4.8. (a)- Gráfica de los esfuerzos calculados en el tubo de 38.1 mm de diámetro para cada presión aplicada.

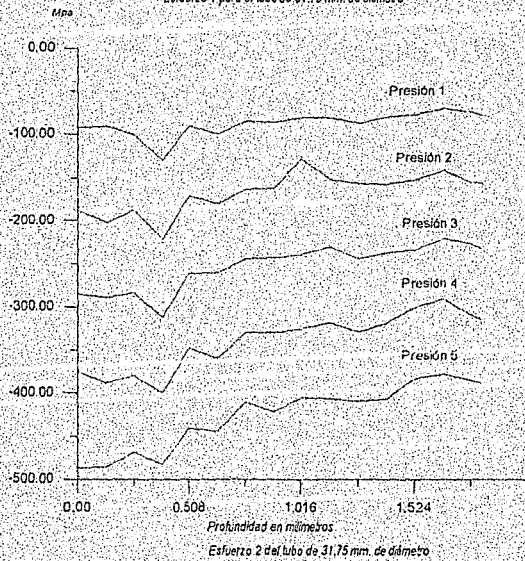
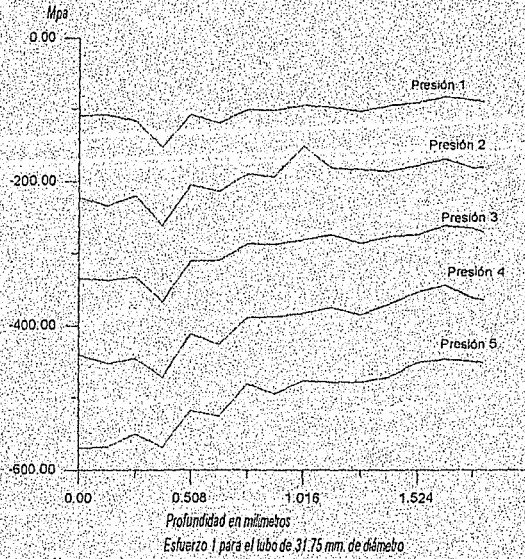
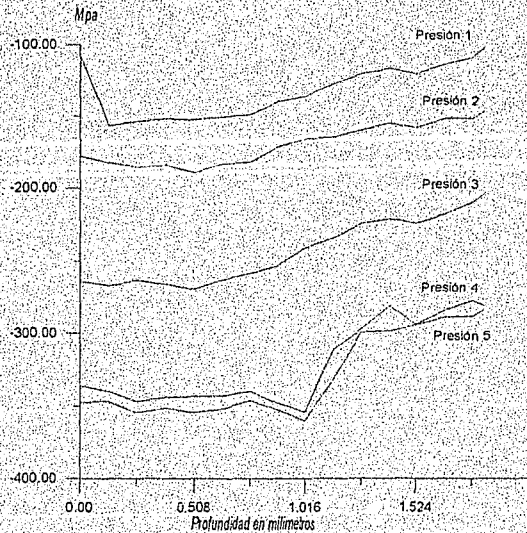
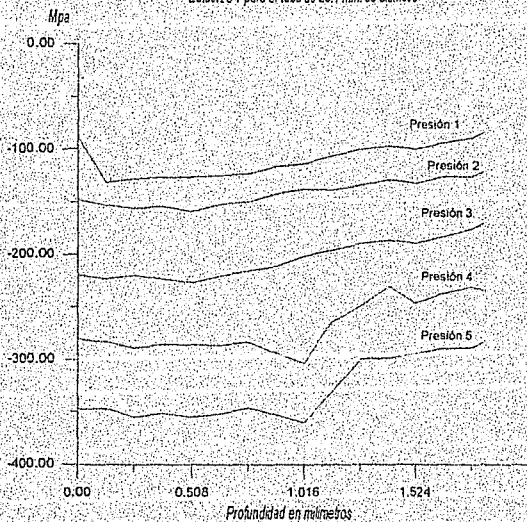


figura 4.8.(b)- Gráfica de los esfuerzos calculados en el tubo de 31.8 mm de diámetro para cada presión aplicada:



Esfuerzo 1 para el tubo de 25.4 mm. de diámetro



Esfuerzo 2 para el tubo de 25.4 mm. de diámetro

figura 4. 8.(c)- Gráfica de los esfuerzos calculados en el tubo de 25.4 mm de diámetro para cada presión aplicada.

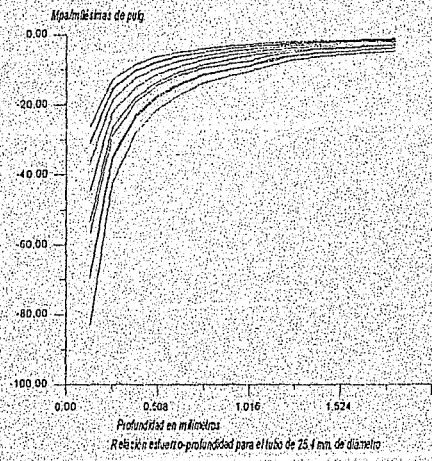
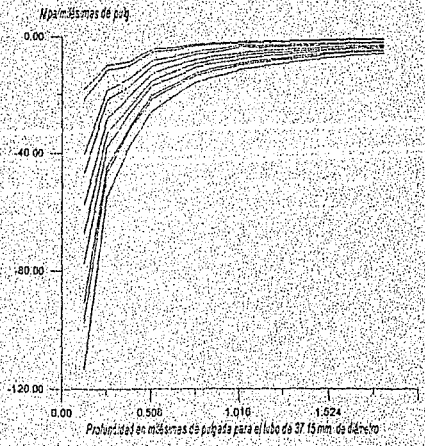
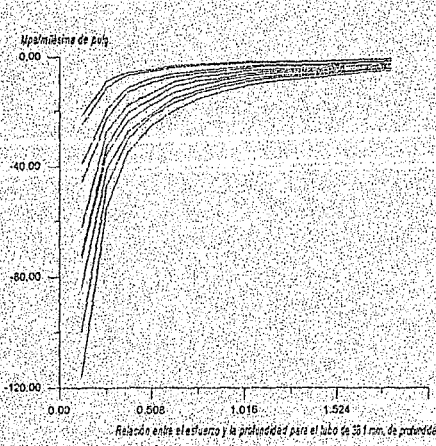


Fig. 4.9 Relación de esfuerzos calculados con la profundidad de barrenado para los tres tubos

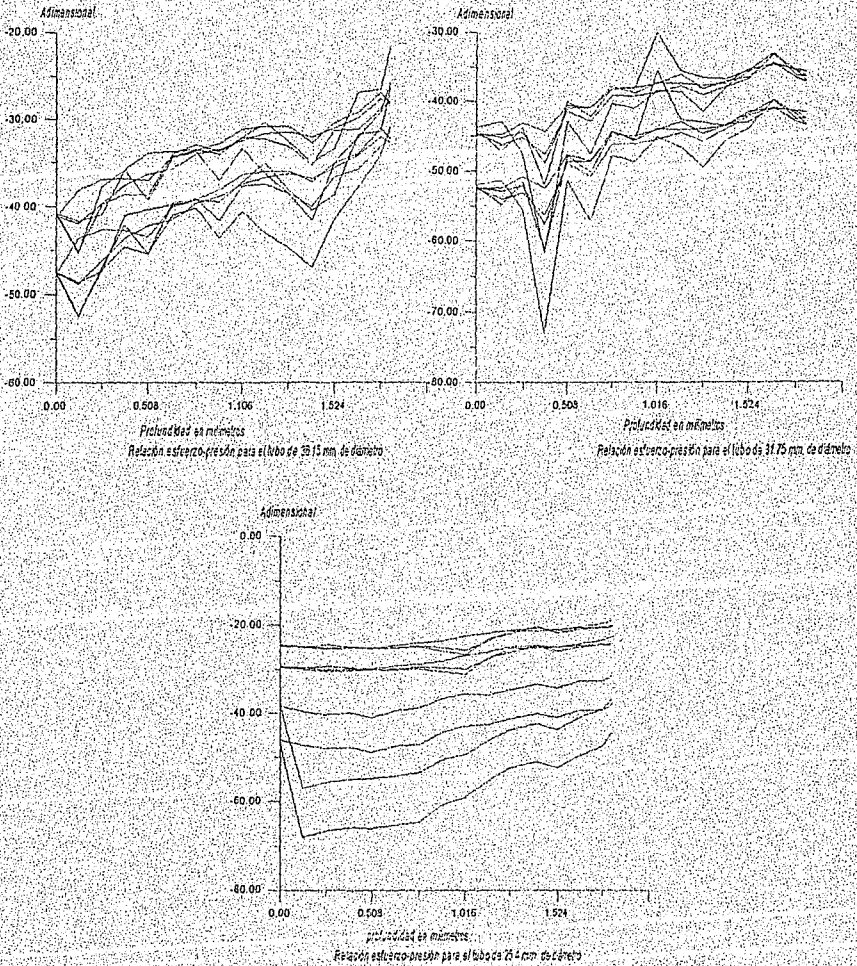


Figura 4.10 - Relación del entre el esfuerzo calculado y la presión aplicada.

De los resultados anteriores podemos concluir:

- El esfuerzo calculado mediante (4) no tiene un comportamiento definido conforme se aumenta la profundidad de taladrado.

b).- Sin embargo, conforme las figuras 4.8, existe un cambio suave en la relación entre el esfuerzo calculado con (4) y la profundidad de taladrado, que posiblemente tienda a una estabilización (figura 9). Se deduce que dicha estabilización se logrará a una profundidad distinta a la descrita por la norma pero muy cercana que para fines prácticos es aceptable.

c).- La relación entre el esfuerzo calculado con (4) y la presión aplicada varía desde un valor máximo común a un mínimo común para todas las presiones aplicadas (figura 4.10), sin embargo, en el tubo 3 no se cumple cabalmente, debido probablemente a lecturas erróneas.

d).- Nótese que la relación mínima entre el esfuerzo calculado y la presión aplicada para el tubo 1 es de aproximadamente 28 para el esfuerzo 1 y de 33 para el esfuerzo 2, mientras para el tubo 2 es de 37 para el esfuerzo 1 y de 43 para el esfuerzo 2. Para el tubo 3 las relaciones tienden a 39 para el esfuerzo 1 y 43 para el esfuerzo 2. en la figura 4.10 se muestra una gráfica de la variación de dicha relación con respecto al diámetro del tubo ensayado.

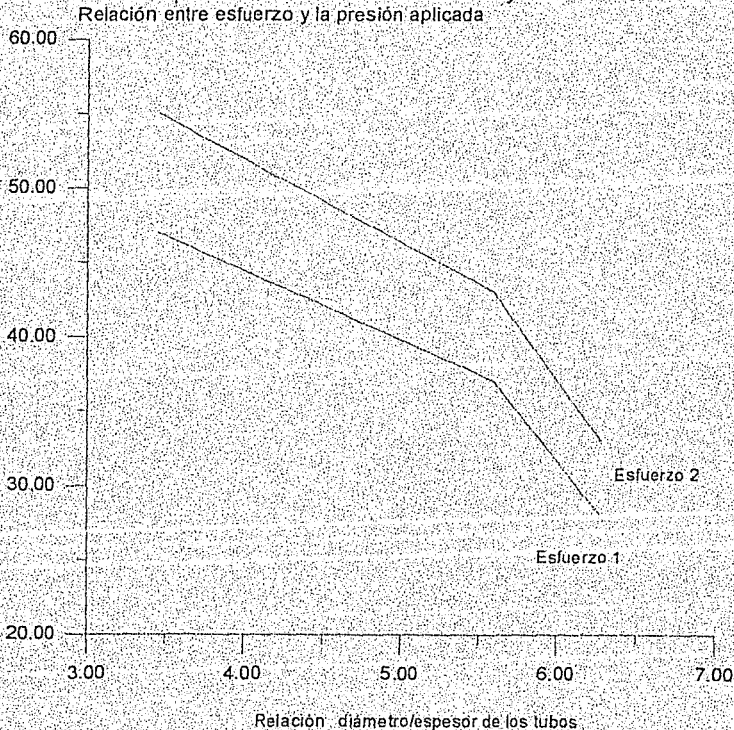


Figura 4.11 - Variación de la relación esfuerzo-presión con respecto al diámetro.

e).- la variación de la relación tiende a un valor muy alto conforme se aumenta el radio de curvatura, como se muestra en la figura 4.11, pero disminuye rápidamente cuando el radio de curvatura es menor. En la misma figura se deduce que para un radio de curvatura mayor a 101.6 mm la influencia de la curvatura es despreciable, obviamente esta afirmación es válida solo para acero inoxidable 606. En caso de utilizar estas deducciones en otros materiales se tendrá que construir un diagrama similar para dichos materiales.

V Conclusiones.

De los análisis de los apartados anteriores podemos concluir:

1.- Con apoyo en los resultados del experimento 2, se puede afirmar que el método de barrenado ciego para medir esfuerzos residuales no puede aplicarse en el caso de superficies curvas, cuando las piezas se encuentran bajo un estado de esfuerzos homogéneamente distribuidos con respecto a la profundidad del barrenado debido a que:

No existe correspondencia alguna entre el esfuerzo calculado conforme a la norma ($\sigma_1 = \text{esf}_1$ y $\sigma_2 = \text{esf}_2$) y los esfuerzos teóricos en el centro del cilindro ($\text{esf}_{\text{ca}1}$ y $\text{esf}_{\text{ca}2}$) para un estado de esfuerzos homogéneo con respecto a la profundidad del barrenado efectuado conforme a la norma ASTM E837-85 (figuras 4.6 a, b y c).

2.- La aplicación del método de barrenado ciego en superficies curvas bajo una distribución no homogénea de esfuerzos no es aceptable como lo demuestran las figuras 4.7 y 4.8; debido a que el esfuerzo calculado mediante (4) no tiene un comportamiento definido conforme se aumenta la profundidad de taladrado.

Se conoce que en la generalidad de los casos los esfuerzos residuales se encuentran en piezas con una distribución no homogénea por lo que la utilización del método de barrenado ciego es cuestionable como por ejemplo en la medición de esfuerzos residuales en uniones de piezas soldadas, y aún cuando éstas no fuesen en superficies curvas no es válido puesto que la norma establece que el estado de esfuerzos debe ser con distribución homogénea con respecto a la profundidad.

3.- En caso de insistir en utilizar el método de barrenado para medir esfuerzos residuales en tuberías sujetas a presión interna, de la figura 4.11 se pueden obtener los factores de corrección, mediante los valores conocidos del diámetro del tubo, pero bajo la advertencia de que el estado de esfuerzos varíe con respecto a la profundidad tal y como lo hacen en el caso teórico de un tubo sujeto a presión interna.

Anexo I

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Es1/h	Relación Es2/h	Relación Es1/Es2	Es1/Presión	Es2/Presión
0	17	30	30	17	-114.04	-97.98	5.99	ERR	ERR	1.16	-47.68	-40.96
0.127	19	36	55	17	-125.67	-108.50	1.59	-25.13	-21.70	1.16	-52.54	-45.36
0.254	9	32	55	17	-112.22	-90.31	0.00	-11.22	-9.03	1.24	-46.91	-37.76
0.381	14	32	45	17	-100.83	-85.88	-4.58	-6.72	-5.73	1.17	-42.15	-35.90
0.508	17	28	47	17	-108.66	-93.87	7.47	-5.43	-4.69	1.16	-45.42	-39.24
0.635	12	28	45	17	-98.05	-82.33	0.87	-3.92	-3.29	1.19	-40.99	-34.42
0.762	12	28	44	17	-96.23	-80.99	0.00	-3.21	-2.70	1.19	-40.23	-33.86
0.889	14	32	47	17	-104.41	-88.63	-2.60	-2.98	-2.53	1.18	-43.65	-37.05
1.016	10	29	46	17	-97.19	-80.02	-1.59	-2.43	-2.00	1.21	-40.63	-33.45
1.143	13	30	47	17	-103.03	-86.84	0.00	-2.29	-1.93	1.19	-43.07	-36.30
1.27	16	30	47	17	-107.10	-92.27	2.76	-2.14	-1.85	1.16	-44.77	-38.57
1.397	20	33	47	17	-112.45	-99.58	1.06	-2.04	-1.81	1.13	-47.01	-41.63
1.524	13	30	45	17	-99.41	-84.14	-1.79	-1.66	-1.40	1.18	-41.56	-35.17
1.651	12	26	41	17	-90.77	-76.95	0.99	-1.40	-1.18	1.18	-37.95	-32.17
1.778	12	27	36	17	-81.84	-70.06	-7.02	-1.17	-1.00	1.17	-34.21	-29.29
1.9	9	19	34	17	-74.11	-61.97	5.65	-1.03	-0.86	1.20	-30.98	-25.91

Profundidad en milímetros
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 1, presión 1)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Es1/h	Relación Es2/h	Es1/Presión	Es2/Presión
0	33	66	99	34	-224.57	-193.14	0	ERR	ERR	-47.50	-40.85
0.127	33	68	102	34	-230.03	-197.17	-0.41	-46.00	-39.43	-48.658	-41.70
0.254	34	63	98	34	-224.16	-193.55	2.67	-22.41	-19.3	-47.41	-40.94
0.381	32	60	83	34	-194.16	-169.76	-2.79	-12.94	-11.317	-41.07	-35.90
0.508	24	60	87	34	-190.78	-160.48	-4.06	-9.53	-8.02	-40.355	-33.94
0.635	25	55	85	34	-188.33	-159.76	0	-7.53	-6.39	-39.83	-33.79
0.762	26	57	83	34	-186.09	-158.84	-2.50	-6.20	-5.29	-39.36	-33.59
0.889	28	55	82	34	-186.00	-161.19	0	-5.34	-4.60	-39.53	-34.09
1.016	27	50	77	34	-176.49	-152.61	2.28	-4.41	-3.81	-37.33	-32.281
1.143	26	50	72	34	-166.02	-144.10	-1.24	-3.68	-3.20	-35.11	-30.48
1.27	26	53	80	34	-180.57	-154.86	0	-3.61	-3.09	-38.19	-32.75
1.397	30	56	83	34	-191.41	-166.17	0.54	-3.48	-3.02	-40.489	-35.15
1.524	28	56	80	34	-183.30	-158.46	-2.19	-3.05	-2.64	-38.77	-33.51
1.651	20	46	68	34	-150.70	-127.77	-2.38	-2.31	-1.96	-31.878	-27.02
1.778	20	50	67	34	-149.26	-126.04	-7.73	-2.13	-1.80	-31.573	-26.66
1.9	13	37	59	34	-124.88	-102.96	-1.24	-1.73	-1.43	-26.41	-21.77

Profundidad en milímetros
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones.
Esfuerzos en MPa.
Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 1, presión 2)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf/h	Relación Esf2/h	Esf/Presión	Esf2/Presión
0	48	95	144	51	-326.65	-280.93	0.59	ERR	ERR	-47.50	-40.85
0.127	54	104	158	51	-360.22	-310.66	1.10	-72.04	-62.13	-52.38	-45.17
0.254	41	97	148	51	-324.55	-273.54	-1.33	-32.45	-27.35	-47.19	-39.77
0.381	47	93	134	51	-307.14	-265.6	-1.64	-20.47	-17.70	-44.66	-38.63
0.508	43	91	140	51	-312.65	-266.46	0.29	-15.63	-13.32	-45.4	-38.74
0.635	40	82	120	51	-272.23	-234.0	-1.43	-10.88	-9.36	-39.58	-34.04
0.762	34	80	123	51	-269.62	-227.21	-0.96	-8.98	-7.57	-39.20	-33.04
0.889	42	42	122	51	-286.43	-232.55	22.5	-8.18	-6.64	-41.65	-33.81
1.016	36	77	116	51	-259.55	-221.45	-0.71	-6.48	-5.53	-37.74	-32.20
1.143	39	77	113	51	-258.13	-222.88	-0.77	-5.73	-4.95	-37.53	-32.41
1.27	40	76	116	51	-264.95	-228.71	1.50	-5.29	-4.57	-38.53	-33.26
1.397	48	80	116	51	-275.71	-243.27	1.68	-5.01	-4.42	-40.09	-35.3
1.524	36	78	112	51	-252.37	-215.98	-3.00	-4.20	-3.59	-36.70	-31.40
1.651	40	73	106	51	-246.72	-215.29	0	-3.79	-3.31	-35.87	-31.30
1.778	36	68	99	51	-228.60	-198.60	-0.45	-3.26	-2.83	-33.24	-28.88
1.9	36	62	95	51	-221.42	-193.13	3.38	-3.07	-2.68	-32.20	-28.08

Profundidad en milímetros
 Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
 esfuerzos en MPa.
 Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 1, presión 3)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf/h	Relación Esf2/h	Esf/Presión	Esf2/Presión
0	69	134	200	69	-456.82	-394.44	0.21	ERR	ERR	-47.67	-41.16
0.127	70	136	178	69	-418.74	-366.06	-6.26	-83.74	-73.21	-43.70	-38.24
0.254	63	130	178	69	-409.08	-353.57	-4.69	-40.90	-35.35	-42.69	-36.90
0.381	61	121	180	69	-409.66	-352.99	-0.24	-27.31	-23.53	-42.75	-36.84
0.508	57	124	187	69	-417.04	-355.10	-0.88	-20.85	-17.755	-43.52	-37.06
0.635	55	114	170	69	-383.40	-328.62	-0.74	-15.33	-13.14	-40.0	-34.29
0.762	54	111	167	69	-376.58	-322.77	-0.25	-12.55	-10.75	-39.30	-33.68
0.889	55	108	160	69	-365.19	-315.18	-0.27	-10.43	-9.00	-38.11	-32.89
1.016	50	107	155	69	-349.45	-299.27	-2.44	-8.73	-7.48	-36.47	-31.234
1.143	50	101	153	69	-345.72	-296.67	0.27	-7.682	-6.59	-36.08	-30.96
1.27	50	102	153	69	-345.72	-296.67	-0.27	-6.91	-5.93	-36.08	-30.963
1.397	62	104	150	69	-356.41	-314.46	1.30	-6.48	-5.71	-37.19	-32.82
1.524	53	102	146	69	-337.04	-292.60	-1.53	-5.61	-4.87	-35.17	-30.54
1.651	48	96	144	69	-326.65	-280.94	0	-5.02	-4.32	-34.09	-29.32
1.778	48	93	128	69	-297.67	-259.28	-3.56	-4.25	-3.70	-31.06	-27.06
1.9	50	86	134	69	-311.34	-270.93	4.06	-4.32	-3.763	-32.49	-28.27

Profundidad en milímetros
 Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
 esfuerzos en MPa.
 Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 1, presión 4)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf/h	Relación Esf2/h	Esf/Presión	Esf2/Presión
0	85	165	248	86	-565.71	-488.08	0.52	ERR	ERR	-47.64	-41.10
0.127	85	170	256	86	-580.27	-498.84	0.16	-116.05	-99.76	-48.87	-42.01
0.254	80	151	242	86	-548.20	-470.77	2.46	-54.82	-47.07	-46.16	-39.64
0.381	77	156	228	86	-518.58	-446.60	-1.32	-34.57	-29.77	-43.67	-37.61
0.508	74	152	221	86	-501.83	-431.76	-1.75	-25.09	-21.58	-42.26	-36.35
0.635	72	145	218	86	-493.62	-424.09	0	-19.70	-16.96	-41.57	-35.71
0.762	69	139	208	86	-471.38	-405.19	-0.20	-15.71	-13.50	-39.69	-34.12
0.889	70	136	202	86	-461.80	-398.95	0	-13.19	-11.39	-38.89	-33.59
1.016	70	127	193	86	-445.50	-386.77	2.09	-11.13	-9.66	-37.51	-32.57
1.143	66	129	191	86	-436.40	-376.82	-0.22	-9.69	-8.3	-36.75	-31.74
1.27	68	125	187	86	-431.83	-375.12	1.20	-8.63	-7.50	-36.369	-31.59
1.397	71	128	188	86	-437.67	-381.94	0.73	-7.95	-6.94	-36.86	-32.16
1.524	68	127	183	86	-424.54	-369.76	-0.74	-7.07	-6.16	-35.75	-31.14
1.651	67	118	174	86	-406.83	-355.82	1.33	-6.258	-5.47	-34.26	-29.96
1.778	58	118	167	86	-382.09	-329.92	-2.88	-5.45	-4.71	-32.17	-27.78
1.9	60	116	170	86	-390.11	-337.72	-0.52	-5.41	-4.69	-32.85	-28.44

Profundidad en milímetros
 Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
 esfuerzos en MPa.
 Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 1, presión 5)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf/h	Relación Esf2/h	Esf/Presión	Esf2/Presión
0	14	35	50	16	-109.95	-92.57	-4.73	ERR	ERR	-51.99	-43.77
0.127	13	34	50	16	-108.57	-90.79	-3.84	-21.71	-18.158	-51.33	-42.93
0.254	17	32	52	16	-117.59	-100.7	4.06	-11.7	-10.07	-55.60	-47.64
0.381	20	47	70	16	-154.34	-130.4	-2.28	-10.28	-8.69	-72.98	-61.68
0.508	13	34	50	16	-108.57	-90.79	-3.84	-5.428	-4.53	-51.3	-42.93
0.635	14	36	56	16	-120.77	-100.7	-1.36	-4.83	-4.029	-57.10	-47.6
0.762	13	33	46	16	-101.38	-85.3	-5.98	-3.37	-2.84	-47.94	-40.34
0.889	13	29	47	16	-103.04	-86.82	1.68	-2.94	-2.48	-48.72	-41.05
1.016	11	30	43	16	-95.81	-81.40	-3.79	-2.39	-2.03	-45.30	-38.4
1.143	11	30	46	16	-98.55	-81.82	-2.44	-2.19	-1.81	-46.60	-38.69
1.27	13	33	48	16	-104.93	-88.10	-4.06	-2.0	-1.762	-49.6	-41.65
1.397	11	29	45	16	-96.71	-80.49	-1.68	-1.75	-1.463	-45.73	-38.06
1.524	11	29	43	16	-93.12	-77.76	-3.56	-1.5	-1.29	-44.03	-36.7
1.651	10	26	39	16	-84.47	-70.59	-2.95	-1.29	-1.08	-39.94	-33.37
1.778	12	28	40	16	-89.01	-75.54	-4.06	-1.27	-1.07	-42.08	-35.7
1.9	13	27	41	16	-92.10	-78.77	0	-1.27	-1.09	-43.55	-37.2

Profundidad en milímetros
 Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
 esfuerzos en MPa.
 Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 2, presión 1)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf/h	Relación Esf2/h	Esf1/Presión	Esf2/Presión
0	29	70	101	32	-223.00	-188.38	-3.95	ERR	ERR	-52.09	-44.01
0.127	36	74	102	32	-234.24	-202.46	-4.30	-46.84	-40.49	-54.72	-47.29
0.254	30	65	99	32	-220.54	-187.68	-0.41	-22.05	-18.76	-51.52	-43.84
0.381	35	76	118	32	-261.85	-222.32	0.34	-17.45	-14.8	-61.17	-51.93
0.508	24	61	95	32	-205.21	-171.37	-1.20	-10.26	-8.56	-47.94	-40.03
0.635	27	67	98	32	-214.82	-180.74	-3.61	-8.59	-7.22	-50.18	-42.22
0.762	28	58	84	32	-190.58	-163.84	-2.04	-6.352	-5.46	-44.52	-38.27
0.889	23	60	90	32	-194.83	-162.75	-2.9	-5.56	-4.65	-45.51	-38.02
1.016	24	58	65	32	-152.51	-129.13	-16.6	-3.81	-3.22	-35	-30.16
1.143	21	56	85	32	-183.02	0	-2.67	-4.06	-3.38	-42.75	-35.60
1.27	25	56	83	32	-184.72	-157.04	-1.97	-3.69	-3.14	-43.15	-36.68
1.397	24	57	85	32	-187.04	-157.89	-2.94	-3.4	-2.87	-43.6	-36.88
1.524	24	53	81	32	-179.71	-152.56	-0.50	-2.99	-2.542	-41.9	-35.64
1.651	19	53	80	32	-171.26	-142.02	-3.27	-2.63	-2.18	-40.00	-33.17
1.778	25	56	82	32	-182.92	-155.68	-2.50	-2.61	-2.22	-42.73	-36.36
1.9	26	55	81	32	-182.41	-156.18	-1.56	-2.53	-2.16	-42.61	-36.48

Profundidad en milímetros
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 2, presión 2)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf/h	Relación Esf2/h	Esf1/Presión	Esf2/Presión
0	46	102	150	48	-334.96	-285.29	-2.19	ERR	ERR	-52.402	-44.63
0.127	48	102	150	48	-337.61	-288.96	-1.68	-67.52	-57.792	-52.81	-45.20
0.254	46	98	149	48	-333.06	-284.01	-0.27	-33.30	-28.40	-52.10	-44.43
0.381	49	110	166	48	-368.07	-312.30	-1.22	-24.53	-20.8	-57.58	-48.85
0.508	39	91	142	48	-310.91	-261.86	-0.27	-15.54	-13.0	-48.64	-40.96
0.635	39	97	142	48	-311.11	-261.67	-3.59	-12.44	-10.46	-48.67	-40.93
0.762	40	90	128	48	-286.96	-244.67	-3.88	-9.56	-8.15	-44.89	-38.27
0.889	37	87	131	48	-288.24	-243.39	-1.82	-8.23	-6.95	-45.09	-38.07
1.016	38	87	127	48	-282.37	-239.77	-2.88	-7.05	-5.99	-44.17	-37.51
1.143	34	86	126	48	-275.25	-231.07	-3.71	-6.11	-5.13	-43.06	-36.14
1.27	40	87	128	48	-286.82	-244.82	-1.95	-5.73	-4.89	-44.87	-38.30
1.397	39	84	124	48	-278.18	-237.63	-1.68	-5.05	-4.32	-43.51	-37.1
1.524	37	82	124	48	-275.47	-234.02	-0.98	-4.59	-3.90	-43.09	-36.0
1.651	33	80	120	48	-262.86	-221.30	-2.30	-4.04	-3.40	-41.12	-34.62
1.778	38	83	118	48	-266.03	-227.63	-3.5	-3.80	-3.25	-41.61	-35.61
1.9	39	83	121	48	-272.74	-233.58	-2.0	-3.78	-3.244	-42.66	-36.54

Profundidad en milímetros
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 2, presión 3)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Angulo	Relación Est/1	Relación Est/2	Esf1/Presión	Esf2/Presión
0	61	135	197	64	-440.73	-375.72	-2.52	ERR	ERR	-52.451	-44.71
0.127	65	139	201	64	-453.39	-388.37	-2.52	-90.67	-77.67	-53.92	-46.224
0.254	61	134	200	64	-446.11	-379.83	-1.44	-44.61	-37.98	-53.09	-45.208
0.381	62	143	214	64	-472.97	-400.4	-1.88	-31.53	-26.69	-56.29	-47.060
0.508	54	125	186	64	-411.26	-348.2	-2.16	-20.56	-17.41	-48.94	-41.446
0.635	55	130	194	64	-427.18	-360.7	-2.26	-17.0	-14.43	-50.82	-42.94
0.762	52	122	175	64	-388.74	-329.61	-3.93	-12.9	-10.98	-46.26	-39.2
0.889	52	118	175	64	-388.54	-329.8	-2.0	-11.1	-9.4	-46.24	-39.25
1.016	52	118	172	64	-383.14	-325.7	-2.8	-9.57	-8.14	-45.60	-38.76
1.143	50	115	169	64	-374.97	-318.0	-2.64	-8.33	-7.0	-44.69	-37.85
1.27	54	115	172	64	-385.70	-329.4	-0.97	-7.7	-6.58	-45.90	-39.21
1.397	54	111	164	64	-371.14	-318.7	-1.04	-6.74	-5.79	-44.1	-37.93
1.524	47	109	160	64	-354.56	-300.4	-2.7	-5.9	-5.00	-42.2	-33.76
1.651	44	105	157	64	-345.02	-291.0	-2.27	-5.3	-4.47	-41.06	-34.6
1.778	50	109	162	64	-362.14	-308.7	-1.53	-5.1	-4.4	-43.10	-36.74
1.9	53	110	162	64	-366.16	-314.2	-1.31	-5.0	-4.3	-43.58	-37.39

Profundidad en milímetros
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Angulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 2, presión 4)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Extensómetro 4	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Angulo	Relación Est/1	Relación Est/2	Esf1/Presión	Esf2/Presión
0	80	173	254	80	-570.00	-486.95	-1.97	ERR	ERR	-52.53	-44.88
0.127	80	172	253	80	-568.17	-485.62	-1.81	-113.63	-97.123	-52.37	-44.76
0.254	74	166	248	80	-550.99	-467.99	-1.64	-55.09	-46.7	-50.78	-43.13
0.381	75	174	257	80	-568.81	-481.8	-2.51	-37.92	-32.12	-52.43	-44.41
0.508	70	156	233	80	-518.29	-440.56	-1.58	-25.91	-22.02	-47.77	-40.60
0.635	67	161	240	80	-527.10	-444.4	-2.47	-21.08	-17.77	-48.58	-40.96
0.762	67	149	215	80	-481.64	-410.7	-3.08	-16.05	-13.69	-44.39	-37.86
0.889	67	148	223	80	-496.03	-421.69	-1.10	-14.17	-12.0	-45.72	-38.86
1.016	64	147	215	80	-477.58	-405.32	-2.83	-11.93	-10.1	-44.02	-37.3
1.143	64	146	216	80	-479.34	-406.7	-2.25	-10.6	-9.03	-44.18	-37.49
1.27	68	146	213	80	-479.24	-409.99	-2.16	-9.58	-8.19	-44.17	-37.79
1.397	70	140	208	80	-472.73	-407.01	-0.4	-8.5	-7.40	-43.57	-37.51
1.524	61	138	203	80	-451.65	-383.79	-2.41	-7.52	-6.39	-41.63	-35.37
1.651	58	135	203	80	-447.56	-378.38	-1.77	-6.8	-5.82	-41.25	-34.87
1.778	64	135	200	80	-450.13	-385.30	-1.26	-6.4	-5.50	-41.49	-35.51
1.9	66	138	200	80	-452.87	-388.89	-2.13	-6.2	-5.40	-41.74	-35.84

Profundidad en milímetros
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Angulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 2, presión 5)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf/h	Relación Esf2/h	Esf1/Presión	Esf2/Presión
0	10	30	52	-108.11	-88.08	1.36	ERR	ERR	-46.94	-38.25
0.127	19	45	72	-156.6	-131.36	0.54	-31.32	-26.27	-68.00	-57.04
0.254	18	44	71	-153.44	-128.20	0.54	-15.34	-12.82	-66.63	-55.66
0.381	18	43	70	-151.6	-126.8	1.10	-10.10	-8.45	-65.84	-55.08
0.508	17	41	71	-152.17	-126.32	3.17	-7.6	-6.315	-66.08	-54.84
0.635	17	42	70	-150.29	-125.0	1.61	-6.0	-5.00	-65.26	-54.28
0.762	16	42	70	-148.94	-123.20	1.06	-4.96	-4.10	-64.67	-53.50
0.889	16	42	65	-139.85	-116.4	-1.75	-3.99	-3.32	-60.72	-50.57
1.016	16	41	63	-136.21	-113.7	-1.82	-3.40	-2.84	-59.14	-49.40
1.143	15	38	59	-127.57	-106.60	-1.30	-2.83	-2.36	-55.3	-46.2
1.27	14	35	56	-120.75	-100.75	0	-2.41	-2.01	-52.43	-43.75
1.397	13	34	55	-117.59	-97.594	0	-2.13	-1.77	-51.06	-42.3
1.524	14	35	56	-120.75	-100.75	0	-2.01	-1.67	-52.43	-43.7
1.651	12	33	54	-114.43	-94.430	0	-1.76	-1.4	-49.68	-41.00
1.778	11	33	52	-109.47	-89.895	-2.09	-1.56	-1.28	-47.53	-39.03
1.9	11	30	48	-102.16	-84.54	-0.77	-1.41	-1.17	-44.3	-36.7

Profundidad en milímetros
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 3, presión 1)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf/h	Relación Esf2/h	Esf1/Presión	Esf2/Presión
0	20	50	83	-177.99	-147.95	1.36	ERR	ERR	-46.03	-38.26
0.127	22	52	84	-182.09	-152.95	0.92	-36.49	-30.59	-47.20	-39.56
0.254	23	55	85	-185.65	-156.11	-0.92	-18.56	-15.61	-48.01	-40.37
0.381	22	54	85	-184.30	-154.30	-0.45	-12.28	-10.286	-47.66	-39.90
0.508	23	55	87	-189.28	-158.81	0	-9.46	-7.940	-48.95	-41.07
0.635	20	55	86	-183.46	-151.97	-1.73	-7.33	-6.079	-47.452	-39.30
0.762	19	55	86	-182.13	-150.14	-2.13	-6.07	-5.004	-47.10	-38.83
0.889	19	56	80	-171.49	-141.79	-6.01	-4.89	-4.05	-44.356	-36.6
1.016	20	57	76	-165.9	-137.89	-8.9	-4.14	-3.447	-42.91	-35.66
1.143	21	50	75	-164.79	-139.00	-2.11	-3.66	-3.089	-42.62	-35.95
1.27	20	46	73	-159.77	-134.53	0.54	-3.19	-2.69	-41.32	-34.79
1.397	18	47	72	-155.29	-129.51	-2.11	-2.82	-2.35	-40.16	-33.49
1.524	19	46	73	-158.42	-132.71	0	-2.64	-2.21	-40.97	-34.3
1.651	17	45	71	-152.10	-126.37	-1.06	-2.34	-1.94	-39.34	-32.68
1.778	17	43	71	-152.10	-126.37	1.06	-2.17	-1.80	-39.3	-32.68
1.9	16	42	69	-147.11	-121.87	0.54	-2.04	-1.69	-38.05	-31.52

Profundidad en milímetros
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 3, presión 2)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Esfuerzo 0 1	Esfuerzo 0 2	Ángulo	Relación Est/h	Relación Est/2/h	Relación Est1/Presión	Est2/Presión
0	30	75	123	-264.24	-219.93	0.92	ERR	ERR	-29.48	-24.54
0.127	32	74	123	-266.98	-223.52	2.19	-53.39	-44.70	-29.79	-24.94
0.254	31	74	122	-263.78	-220.38	1.57	-26.37	-22.03	-29.43	-24.59
0.381	33	77	122	-266.44	-224.06	0.32	-17.76	-14.93	-29.73	-25.00
0.508	34	78	123	-269.60	-227.22	0.32	-13.48	-11.36	-30.08	-25.35
0.635	32	75	121	-263.29	-220.88	0.96	-10.53	-8.835	-29.38	-24.64
0.762	30	74	120	-258.77	-215.90	0.63	-8.625	-7.196	-28.87	-24.09
0.889	30	72	117	-253.3	-211.86	0.98	-7.23	-6.05	-28.26	-23.64
1.016	29	70	111	-241.04	-201.99	0	-6.02	-5.04	-26.89	-22.54
1.143	28	68	108	-234.23	-196.14	0	-5.20	-4.3	-26.13	-21.8
1.27	29	64	102	-224.67	-189.89	1.17	-4.49	-3.7	-25.07	-21.18
1.397	28	65	101	-221.49	-186.73	-0.39	-4.02	-3.39	-24.7	-20.83
1.524	29	63	102	-224.7	-189.85	1.95	-3.74	-3.16	-25.0	-21.18
1.651	27	61	100	-218.37	-183.52	1.95	-3.359	-2.8	-24.36	-20.47
1.778	25	60	97	-210.18	-175.88	0.79	-3.00	-2.5	-23.4	-19.6
1.9	23	58	95	-203.85	-169.55	0.79	-2.83	-2.3	-22.74	-18.9

Profundidad en milímetros.
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 3, presión 3)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Esfuerzo 0 1	Esfuerzo 0 2	Ángulo	Relación Est/h	Relación Est/2/h	Relación Est1/Est2	Est1/Presión	Est2/Presión
0	40	94	155	-335.97	-281.11	1.74	ERR	ERR	1.19	-29.63	-24.79
0.127	39	93	158	-340.16	-283.25	2.64	-68.03	-56.656	1.2	-30.0	-24.98
0.254	40	94	161	-347.01	-289.06	3.06	-34.701	-28.906	1.20	-30.6	-25.494
0.381	38	95	161	-344.23	-285.50	2.09	-22.94	-19.0	1.2	-30.3	-25.18
0.508	39	98	160	-343.69	-286.05	0.71	-17.18	-14.3	1.2	-30.3	-25.22
0.635	40	97	159	-343.23	-286.51	1.2	-13.7	-11.46	1.19	-30.2	-25.26
0.762	39	95	158	-340.09	-283.32	1.68	-11.33	-9.44	1.20	-29.9	-24.98
0.889	45	97	158	-348.19	-294.21	2.27	-9.94	-8.40	1.18	-30.7	-25.94
1.016	51	101	157	-354.39	-303.83	1.61	-8.859	-7.5	1.166	-31.2	-26.79
1.143	42	90	140	-311.31	-264.63	0.58	-6.91	-5.8	1.176	-27.4	-23.34
1.27	37	84	136	-297.3	-250.13	1.44	-5.94	-5.0	1.188	-26.2	-22.06
1.397	28	83	134	-281.58	-231.07	-1.0	-5.11	-4.2	1.218	-24.8	-20.37
1.524	36	84	135	-294.15	-246.9	0.8	-4.90	-4.11	1.19	-25.9	-21.78
1.651	33	82	132	-284.64	-237.5	0.28	-4.37	-3.65	1.198	-25.1	-20.94
1.778	32	81	129	-277.8	-231.6	-0.29	-3.96	-3.30	1.19	-24.5	-20.43
1.9	33	80	130	-281.01	-234.8	0.88	-3.90	-3.26	1.19	-24.7	-20.70

Profundidad en milímetros.
Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones
esfuerzos en MPa.
Ángulo en grados decimales.

Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 3, presión 4)

Profundidad	Extensómetro 1	Extensómetro 2	Extensómetro 3	Esfuerzo 1	Esfuerzo 2	Ángulo	Relación Esf1/h	Relación Esf2/h	Relación Esf1/Esf2	Esf1/Presión	Esf2/Presión
0	50	116	191	-414.96	-347.68	1.8	ERR	ERR	1.193	-29.66	-24.85
0.127	49	117	192	-415.4	-347.24	1.40	-83.08	-69.44	1.19	-29.70	-24.82
0.254	51	119	195	-423.57	-354.90	1.58	-42.35	-35.49	1.19	-30.28	-25.37
0.381	50	118	194	-420.41	-351.73	1.58	-28.02	-23.4	1.195	-30.0	-25.14
0.508	51	121	195	-423.53	-354.94	0.79	-21.17	-17.74	1.193	-30.2	-25.37
0.635	51	120	193	-419.89	-352.25	0.80	-16.79	-14.09	1.192	-30.0	-25.18
0.762	50	118	190	-413.09	-346.3	0.81	-13.76	-11.54	1.192	-29.53	-24.767
0.889	55	119	188	-416.18	-352.8	1.0	-11.89	-10.08	1.17	-29.7	-25.22
1.016	60	121	187	-421.08	-360.5	1.12	-10.52	-9.01	1.16	-30.1	-25.77
1.143	53	118	175	-389.86	-331.6	-1.8	-8.663	-7.36	1.17	-27.8	-23.7
1.27	45	100	162	-355.43	-299.62	1.71	-7.10	-5.99	1.18	-25.4	-21.42
1.397	46	101	160	-353.10	-298.78	1.00	-6.42	-5.43	1.181	-25.2	-21.36
1.524	43	98	161	-350.94	-294.62	1.9	-5.84	-4.91	1.19	-25.0	-21.0
1.651	41	94	160	-346.53	-289.53	3.11	-5.33	-4.45	1.19	-24.7	-20.7
1.778	42	95	158	-344.17	-288.73	2.46	-4.91	-4.12	1.19	-24.60	-20.6
1.9	40	94	157	-339.64	-283.76	2.19	-4.71	-3.94	1.19	-24.28	-20.2

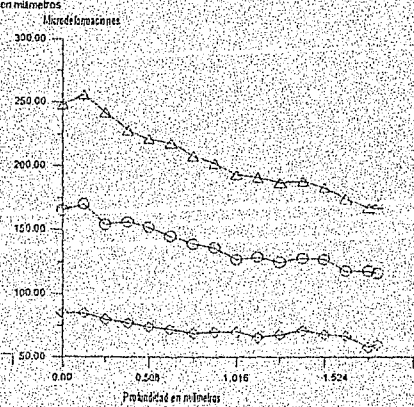
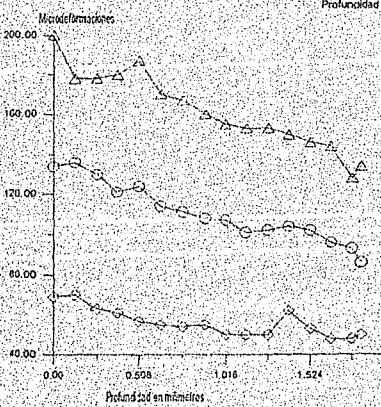
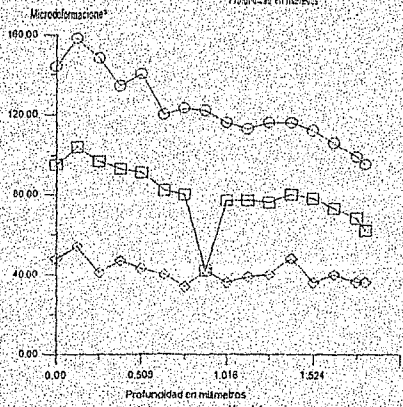
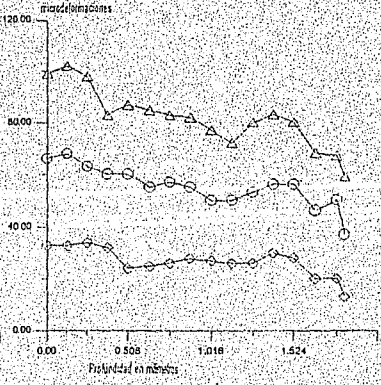
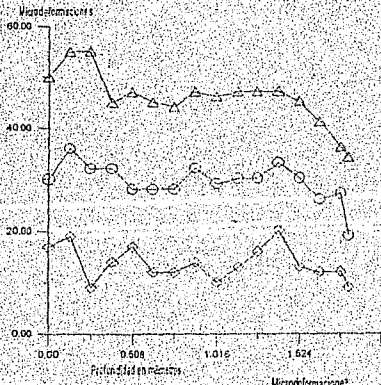
Profundidad en milímetros

Lecturas de los extensómetros en microdeformaciones

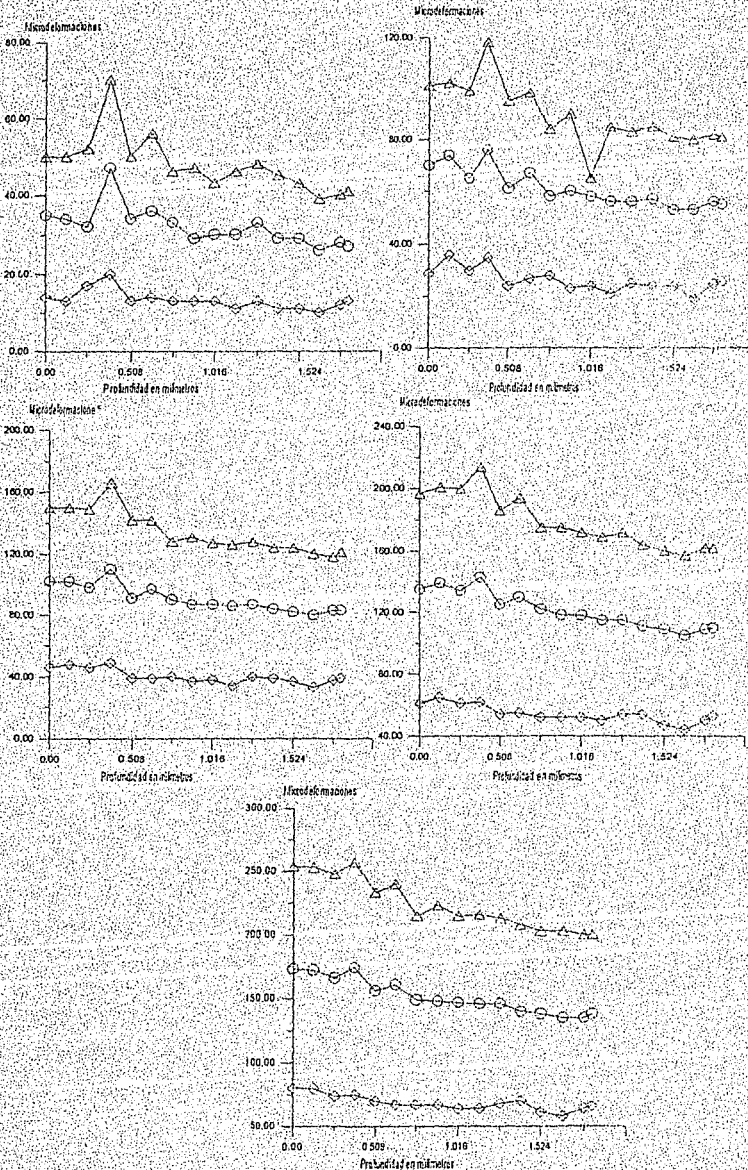
esfuerzos en MPa.

Ángulo en grados decimales.

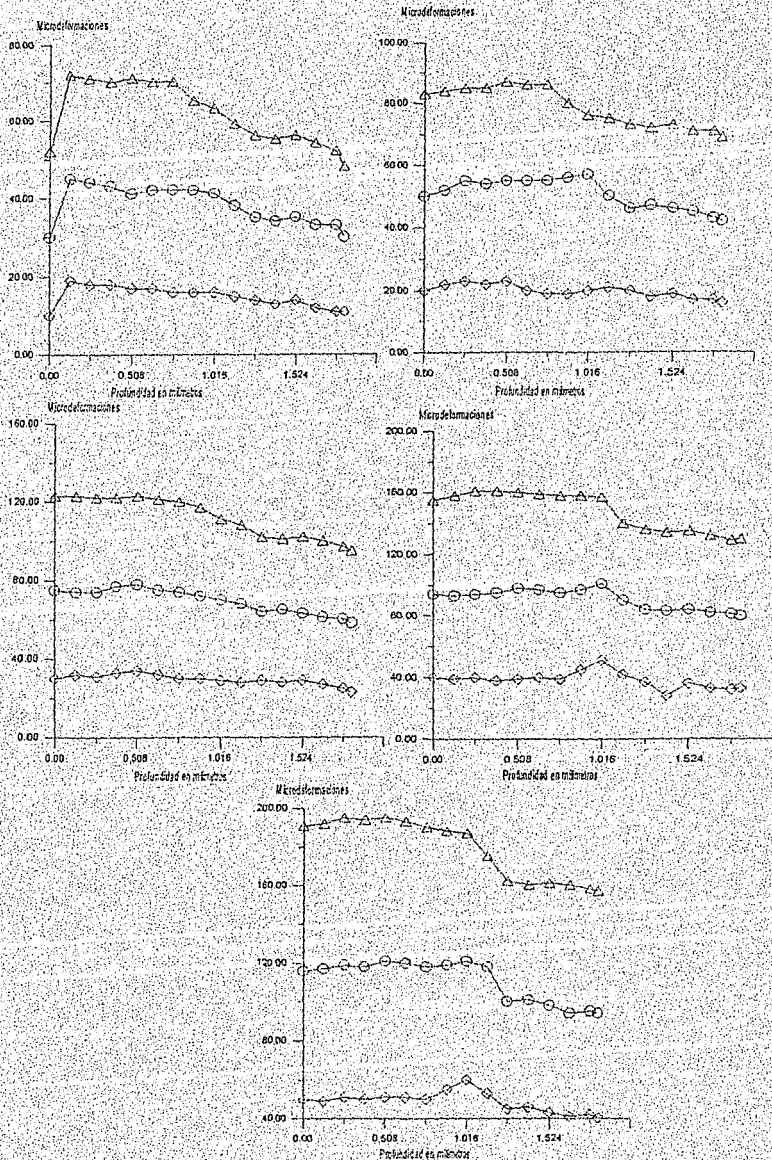
Cálculo de datos en el experimento 3 (tubo 3, presión 5)



Gráficas que representan el comportamiento de las lecturas de los extensómetros del tubo 1 (38.1 mm. de diámetro)



Gráficas que representan el comportamiento de las lecturas de los extensómetros del tubo 2 (31.75 mm. de diámetro).



Gráficas que representan el comportamiento de las lecturas de los extensómetros del tubo 3 (25.4 mm. de diámetro).

Bibliografia citada

- 1.- American Society for Testing Material (ASTM) E837-85 "determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Method".
- 2.- Mathar, J., "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes." Trans. ASME 56, No. 4: 249-254(1934).
- 3.- Rendler, N.J. and Vigness, "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stress." Proc., SESA XXIII, No. 2: 577-586 (1966).
- 4.- Schajer, G.S., "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements." Journal of Engineering Materials and Technology 103: 157-163 (1981).
- 5.- Redner, S. and C.C. Perry, "Factors Affecting the Accuracy of Residual Stress Measurements Using the Blind-Hole Drilling Method." Proc., 7th International Conference on Experimental Stress Analysis, Haifa, Israel. Israel Institute of Technology, 1982.
- 6.- Flaman, M.T., "Brief Investigation of induced Drilling Stresses in the center-hole Method of Residual-stress Measurement." Experimental Mechanics(1986).
- 7.- Flaman, M.T., B.E. Mills, and J.M. Boag, "Analysis of Stress-Variation-With-Depth Measurement Procedures for Centre Hole Method of Residual Stress Measurements." experimental Techniques 11: 35-37 (Junio 1987).
- 8.- Flaman, M.T. and B.H. Manning, "Determination of Residual Stress Variation with Depth by Hole-Drilling Method." Experimental Mechanics 25: 205-207(1985).
- 9.- Schajer, G.S. "Measurement of Non-Uniform Residual Stress Using the Hole Drilling Method." Journal of Engineering Materials and Technology 110, No.4: Part I, 338-343; Part II, 344-349 (1988).
- 10.- Schajer, G.S., "Judgment of residual Stress Field Uniformity when Using the Hole-Drilling Method." Proceedings of the International Conference on Residual Stresses II, Nancy, France, November 23-25, 1988, 71-77.

Bibliografía de consulta

John O. y Paul M.: "Residual Stress and Fatigue in Metals", McGraw-Hill, New York, 1983.

Dally, James W., y Riley, William F.: "Experimental Stress Analysis", segunda edición, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.

Sciammarella, C.A. y Abertazzi, A. : "Measurement of residual stresses by the Moiré Method", 9th International Conference on Experimental Mechanics, 1990, Copenhagen Denmark.

Nicoletto, G. : "Moiré interferometry determination of Residual Stresses in presence of gradients", 9th International Conference on Experimental Mechanics, 1990, Copenhagen Denmark.

Soudan, X., Lu, Gillereau, J. D. y Flauenot, J.F. : "Comparison of the X-ray diffraction method and hole drilling method for the measurement of Residual Stresses on the aeronautical materials", 9th International Conference on Experimental Mechanics, 1990, Copenhagen Denmark.

Hauk, V.: "Micro residual stresses, evaluation by X-rays, results assessment, 9th International Conference on Experimental Mechanics, 1990, Copenhagen Denmark.

Furguele, F.M., Pagnotta, L. y Poggialini, A. : "Applying Holographic interferometry to Residual Stress determination by Hole Drilling Method", 9th International Conference on Experimental Mechanics, 1990, Copenhagen Denmark.