

8. MEDIDA DE TENSIONES RESIDUALES POR EL MÉTODO DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS Y LA PERFORACIÓN DE UN AGUJERO*

8.1. Tensiones Residuales y su Medida

Las tensiones residuales (internas) de la estructura de un material o componente son las tensiones que existen en él cuando no hay (y a veces cuando ni siquiera han habido anteriormente) solicitaciones o cargas externas. Los procesos de conformado son las causas más comunes que provocan tensiones residuales. Virtualmente todos los procesos de conformado y fabricación-fundición, soldadura, mecanizado, moldeo, tratamientos térmicos, etc. introducen tensiones residuales en el objeto conformado. En algunas ocasiones, las tensiones residuales pueden ser introducidas también más tarde a lo largo de la vida de la estructura por procedimientos de instalación o montaje, por sobrecargas ocasionales, por efectos de asentamiento del suelo o estructuras subterráneas, o por cargas muertas que puedan llegar a ser parte integrante de la estructura.

Los efectos de las tensiones residuales pueden ser beneficiosos o perjudiciales, dependiendo de la magnitud, sentido, y distribución de estas tensiones con respecto a las tensiones inducidas por cargas. Por lo general, las tensiones residuales son perjudiciales, y hay muchos casos documentados en los que estas tensiones fueron el factor predominante que contribuyó a la fatiga y a otros fallos estructurales cuando las tensiones aparecidas en servicio se superponen a las tensiones residuales ya presentes. Un aspecto particularmente insidioso de las tensiones residuales es que no se detecta su presencia hasta después del fallo o mal funcionamiento del componente afectado.

La medición de tensiones residuales en objetos opacos no puede llevarse a cabo por procedimientos convencionales de análisis experimental de tensiones, ya que los sensores de deformación (galgas extensométricas, capa fotoelástica, etc.) son totalmente insensibles a todo lo que haya ocurrido anteriormente en la pieza, y solo pueden medir los cambios producidos después de la instalación del sensor.

Para medir tensiones residuales con estos sensores estándar, las tensiones internas deben ser aliviadas de alguna forma (con el sensor presente) para que el sensor pueda registrar la tensión causada por la eliminación de las tensiones. Este método en el pasado se hacía de forma destructiva, cortando y seccionando la pieza, eliminando sucesivas capas superficiales, o cortando un disco de la pieza y sacando la parte interior.

Con sensores de tensión correctamente colocados antes de diseccionar la pieza, los sensores responden a la deformación producida por la relajación de la tensión al eliminar material. Las tensiones residuales iniciales pueden ser deducidas a partir de las deformaciones medidas por consideraciones de elasticidad. La mayoría de estas técnicas se reducen a aplicaciones de laboratorio en probetas planas o cilíndricas, y no son fácilmente adaptables a objetos reales de forma y tamaño arbitrarios.

La medida de deformaciones por difracción de rayos-x, que no requiere relajación de tensiones, ofrece una alternativa no destructiva a los métodos precedentes, pero tiene grandes limitaciones. Aparte del volumen y la complejidad del equipo necesario, que puede reducir el campo de aplicación, la técnica esta limitada a medida de deformaciones en capas muy poco profundas. Aunque otras técnicas no destructivas (p.e., ultrasonidos, electromagnetismo) han sido desarrolladas para los mismos propósitos, estas aún tienen que conseguir una amplia aceptación como los métodos normalizados de análisis de tensiones residuales.

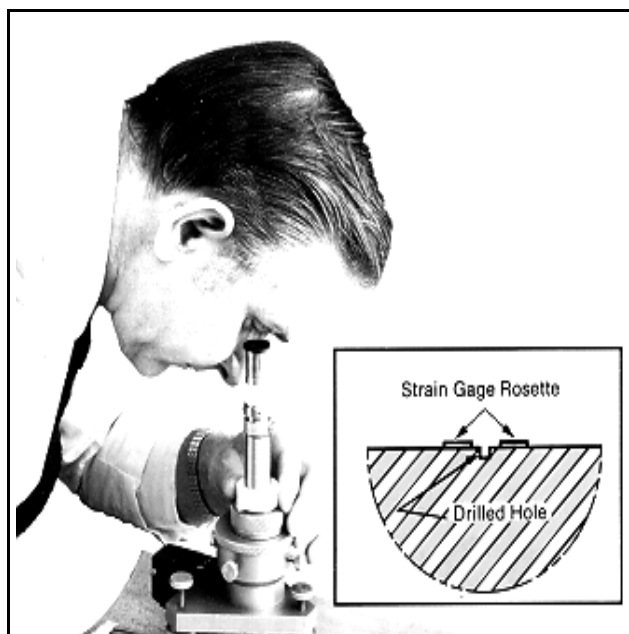


Figura 1. Método de las galgas extensométricas y la perforación de un agujero.

8.1.1 El método de la perforación de un agujero

La técnica moderna más ampliamente utilizada para la medida de tensiones residuales es la de las galgas extensométricas y la relajación de tensiones por la perforación de agujero, representado en la figura 1.

Brevemente resumido, el procedimiento de medida esta compuesto de seis pasos básicos:

- Se coloca una galga extensométrica circular especial de tres elementos en el punto de la pieza a estudiar donde queremos determinar las tensiones residuales.
- Se conectan las tres galgas a un indicador de deformación estática a través de una unidad de alimentación y balance.

- Se une la pieza a ensayar a una guía de perforación de precisión (el modelo RS-200, se muestra en la figura 1) y se centra correctamente sobre el punto a perforar en el círculo formado por las galgas o roseta.
- Después de poner a cero los indicadores de las galgas, se perfora un pequeño agujero superficial en el centro de la roseta.
- Las lecturas obtenidas son causadas por las deformaciones por relajación del material que están relacionadas con las tensiones residuales iniciales.
- Utilizando los datos que proporcionamos en este documento, podemos calcular las tensiones residuales principales y su orientación angular a partir de las deformaciones medidas.

El procedimiento anterior es relativamente simple, y ha sido normalizado en ASTM (Método de Ensayo Estandar) E837.¹ Utilizando equipo y repuestos correctos y ateniéndose a las recomendaciones de la norma ASTM, este procedimiento puede ser aplicado rutinariamente por cualquier técnico cualificado en el análisis tensional, ya que no se requiere ningún experto para hacer las medidas. El método es también muy versátil y puede ser desarrollado en el laboratorio o en el exterior, en una amplia gama de formas o tallas del objeto a ensayar. Frecuentemente se hace referencia a esta técnica como "semi-destructiva", ya que en pocas ocasiones el pequeño agujero perjudicará la estructura de la pieza ensayada (el agujero suele ser de entre 0.8 y 4.8 mm de diámetro y profundidad). Cuando el objeto a ensayar es grande a veces es factible eliminar el agujero después de realizar el ensayo, por una mezcla y un moleteado suave de la superficie con un pequeño amolador manual. Esto, por supuesto, debe realizarse con mucho cuidado para evitar introducir tensiones en el proceso de moleteado.

NOTA: En su estado de desarrollo actual, el método de perforación de agujero está destinado ante todo para aplicaciones en las que las tensiones residuales son uniformes a lo largo de la profundidad de perforación, o esencialmente así. Mientras que los procedimientos para adquisición y abreviación de datos en tales casos son sencillos y están perfectamente establecidos, se requiere una evaluación ingenieril cada cierto tiempo para verificar la uniformidad de las tensiones y otros criterios para la validez de las tensiones calculadas. Esta nota técnica contiene la información técnica básica para comprender como opera el método, pero, por supuesto, no puede abarcar todos los conocimientos necesarios para la correcta aplicación en todos los casos. Como ayuda adicional para los usuarios del método se proporciona una amplia lista de referencias técnicas en la bibliografía.

8.2. Principio y Teoría del método de las Galgas Extensométricas y el agujero perforado

La introducción de un agujero (incluso de diámetro muy pequeño) en un cuerpo con tensiones

residuales relaja las tensiones en esa zona. Esto ocurre porque toda perpendicular a una superficie libre (toda la superficie en este caso) es necesariamente un eje principal en el cual las tensiones normales y cortantes son nulas. La eliminación de estas tensiones en la superficie del agujero cambia las tensiones en las regiones inmediatamente circundantes, causando las correspondientes deformaciones locales en la superficie del objeto a ensayar. Este principio es el fundamento de la medida de las tensiones residuales por el método de la perforación de un agujero, propuesto por primera vez por Mathar.²

En la mayoría de las aplicaciones prácticas del método, el agujero perforado es ciego (sin salida), con una profundidad:

- a) aproximadamente igual a su diámetro
- b) pequeña en comparación con el grosor del objeto a ensayar

Desafortunadamente, la geometría del agujero ciego es suficientemente compleja como para que no se pueda calcular directamente las tensiones residuales a partir de las deformaciones medidas a través de una solución particular de la teoría de la elasticidad, excepto por la introducción de coeficientes empíricos. De todas maneras, se puede obtener una solución para un caso más simple como el de un agujero que perfora completamente una fina lámina en el cual las tensiones residuales están uniformemente distribuidas a lo largo del espesor de la lámina. Debido a esto, las bases teóricas de este método se desarrollarán primero para la geometría del agujero pasante, y después se extenderán para la aplicación a agujeros ciegos.

8.2.1. Análisis del agujero pasante

La figura 2a representa un área local del interior de una placa que esta sujeta a una tensión residual uniforme σ_x . El estado inicial de tensión en un punto P (R, α) puede expresarse en coordenadas polares así:

$$\sigma'_r = \sigma_x (1 + \cos (2\alpha)) / 2 \quad (1a)$$

$$\sigma'_\theta = \sigma_x (1 - \cos (2\alpha)) / 2 \quad (1b)$$

$$\tau'_{r\theta} = - (\sigma_x / 2) \text{sen} (2\alpha) \quad (1c)$$

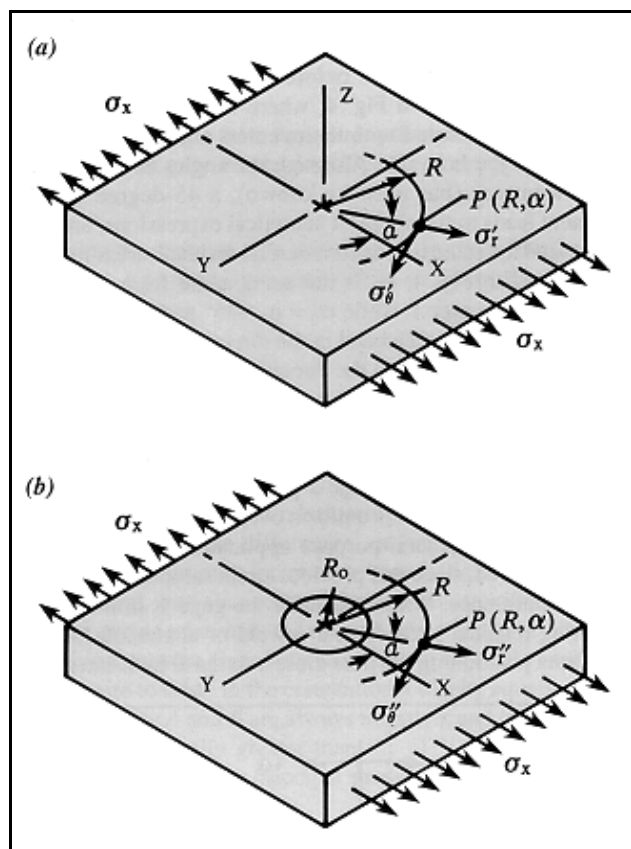


Figura 2. Estados de tensión en $P(R, \alpha)$, antes y después de la perforación del agujero.

La figura 2b representa el mismo área de la lámina después de perforar un agujero pequeño en ella. Las tensiones en las proximidades del agujero son ahora bastante diferentes, ya que σ_r y $\tau_{r\theta}$ tienen que ser cero en toda la superficie del agujero. G. Kirsch en 1898 obtuvo una solución a este caso, y consiguió las siguientes expresiones para las tensiones en el punto $P(R, \alpha)$:³

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

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

$$\tau'_{r\theta} = - \frac{\sigma_x}{2} \left[1 - \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2} \right] \sin 2\alpha \quad (2c)$$

Donde: $r = R / R_0$ siendo $R \in R_0$

R_0 : radio del agujero

R : radio arbitrario desde el centro del agujero

Restando las tensiones iniciales y finales obtenemos la variación de la tensión, o relajación de tensión en el punto P (R, α) debido a la perforación del agujero:

$$\epsilon \sigma_r = \sigma''_r - \sigma'_r \quad (3a)$$

$$\epsilon \sigma_\theta = \sigma''_\theta - \sigma'_\theta \quad (3b)$$

$$\epsilon \tau_{r\theta} = \tau''_{r\theta} - \tau'_{r\theta} \quad (3c)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1) y (2) dentro de las ecuaciones (3) se obtienen las expresiones completas de las tensiones relajadas (o aliviadas). Si el material de la lámina es homogéneo e isótropo, y tiene un comportamiento elástico lineal, estas ecuaciones se pueden sustituir dentro de la ley biaxial de Hooke para calcular las deformaciones normales en el punto P (R, α). Las expresiones que resultan son las siguientes:

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

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

Las ecuaciones anteriores pueden escribirse de forma más simple, demostrando que a lo largo de un círculo en cualquier radio R ($R \in R_0$) las deformaciones radiales y tangenciales aparecidas varían de forma sinusoidal:

$$\epsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) \quad (5a)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \sigma_x (-A + C \cos 2\alpha) \quad (5b)$$

La comparación de las ecuaciones (5) con las ecuaciones (4) demuestra que los coeficientes A, B, y C tienen las siguientes definiciones:

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\frac{1}{r^2} \right] \quad (6a)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left[\frac{4}{1+\nu} \right] \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right] \quad (6b)$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left[-\left[\frac{4}{1+\nu} \right] \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right] \quad (6c)$$

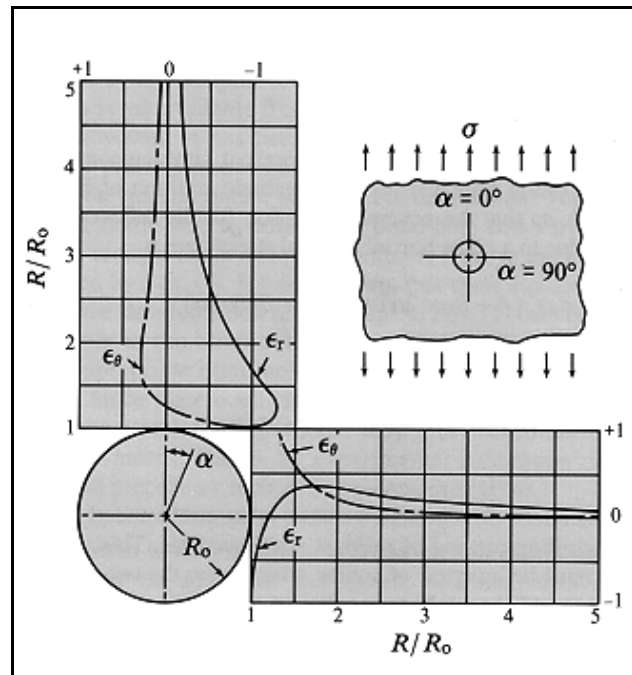


Figura 3. Variación con la distancia (a lo largo de los ejes) desde el centro del agujero perforado, de las deformaciones radiales y tangenciales aliviadas. Tensión residual uniaxial

Podemos ver que las deformaciones aparecidas también varían, de forma compleja, con la distancia a la superficie del agujero. Esta variación está representada en la figura 3, donde dibujamos las deformaciones en los ejes principales, en $\alpha = 0^\circ$, y $\alpha = 90^\circ$. Como se muestra en la figura, las deformaciones aparecidas decrecen con la distancia al agujero. Debido a esto, es deseable medir las deformaciones cerca del borde del agujero para hacer que la señal de las galgas sea lo mayor posible.

Por otra parte, los efectos parásitos también aumentan en las proximidades inmediatas del agujero. Estas consideraciones, junto con aspectos prácticos del diseño y aplicación de las galgas extensométricas, exigen un compromiso para elegir el radio óptimo (R) para la colocación de la galga. Los estudios analíticos y experimentales han establecido un rango práctico de $0.3 \leq r \leq 0.45$ donde $r = R_0 / R$ y R es la distancia al centro de la galga.

En la figura 3 se puede observar que para $\alpha = 0E$ (a lo largo del eje de la mayor tensión principal) la deformación radial obtenida, ε_r , es considerablemente mayor que la deformación tangencial, ε_θ , en la región de medida especificada. Como consecuencia, las galgas extensométricas en forma de roseta comerciales para el análisis de tensiones residuales se diseñan con rejillas orientadas radialmente para medir la deformación radial, ε_r . En cuyo caso, solo la ecuación (5a) es directamente relevante para tener en cuenta de ahora en adelante. También es evidente en la figura que la deformación radial a lo largo del eje principal mayor es de signo opuesto a la tensión residual inicial. Esto es debido a que los coeficientes A y B de la ecuación (5a) son siempre negativos, y (para $\alpha = 0E$) $\cos 2\alpha = +1$.

El tratamiento anterior consideró solamente el caso más simple, tensión residual uniaxial. En la práctica, sin embargo, las tensiones residuales son con mayor frecuencia biaxiales, con dos tensiones principales diferentes de cero. Esta condición puede ser fácilmente incorporada en el análisis aplicando el principio de superposición, que es aplicable a materiales elástico-lineales. Refiriéndonos de nuevo a la figura 2, aparentemente tenía la tensión residual uniaxial a lo largo del eje Y en vez del eje X, las ecuaciones (1) y (2) podrían aplicarse, sustituyendo $\cos 2\alpha$ por $\cos 2(\alpha + 90E)$, o por el equivalente $-\cos 2\alpha$. Así la deformación en el punto P (R, α) debida a la tensión residual uniaxial en la dirección Y puede escribirse como:

$$\varepsilon_r^y = \sigma_y (A - B\cos 2\alpha) \quad (7)$$

Y, empleando la notación correspondiente, la ecuación (5a) queda:

$$\varepsilon_r^x = \sigma_x (A + B\cos 2\alpha) \quad (8)$$

Cuando ambas tensiones residuales están presentes simultáneamente, el principio de superposición permite la suma algebraica de las ecuaciones (7) y (8), así que la expresión general para la deformación por relajación debida a un estado tensional plano biaxial es:

$$\varepsilon_r = \sigma_x (A + B\cos 2\alpha) + \sigma_y (A - B\cos 2\alpha) \quad (9a)$$

O, en una forma ligeramente diferente:

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (9b)$$

Las ecuaciones (9) representan la relación básica que sirve de base para el método de perforación de agujero de análisis de tensiones residuales. Esta relación debe ser utilizada, por supuesto, para calcular las dos tensiones principales y el ángulo α en función de las deformaciones medidas que acompañan a la relajación de tensión. Ya que hay tres cantidades desconocidas, se requieren tres medidas independientes de la deformación radial para una solución completa. Estas tres medidas se pueden sustituir sucesivamente en la ecuación (9a) o la ecuación (9b) para conseguir tres ecuaciones que se resuelven simultáneamente para obtener las tensiones principales y el ángulo.

El procedimiento normal para la medida de las deformaciones es montar tres galgas extensométricas en forma de roseta alrededor del lugar donde se va a perforar el agujero. La roseta esta representada esquemáticamente en la figura 4 donde se colocan tres galgas extensométricas orientadas radialmente con sus centros en el radio R desde el centro del agujero. Aunque los ángulos entre galgas pueden ser arbitrarios (deben ser conocidos), un incremento del ángulo de 45E conduce a las expresiones analíticas más simples, y esta ha llegado a ser la norma para rosetas de tensión residual comerciales. Como se indica en la figura 4, α_1 es el ángulo formado por la galga 1 con el eje principal más cercano, mientras que $\alpha_2 = \alpha_1 + 45E$ y $\alpha_3 = \alpha_1 + 90E$, con ángulos positivos en el sentido de la numeración de las galgas. Debería destacarse que el sentido de la numeración de las galgas para el tipo de roseta esquematizada en la figura 4 es el sentido de las agujas del reloj, ya que la galga 2, aunque físicamente en la posición 2a, para efectos de numeración de las galgas esta en la posición 2b. Las ecuaciones (9) pueden usarse para verificar que ambas posiciones para la galga 2 producen el mismo resultado suponiendo que las tensiones residuales son uniformes en el área que luego ocupará el agujero.

Para aplicaciones de propósito general, la posición que se prefiere es 2a, ya que proporciona un muestreo de la deformación alrededor del agujero. Cuando el espacio para la galga es limitado, como en la medición de tensiones residuales cerca de una unión o estribo, la posición 2b permite posicionar el agujero lo más cercano posible al área de interés.

Ahora podemos escribir la ecuación (9b) tres veces, una por cada galga de la roseta:

$$\varepsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (10a)$$

$$\varepsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 45E) \quad (10b)$$

$$\varepsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2(\alpha + 90^\circ) \quad (10c)$$

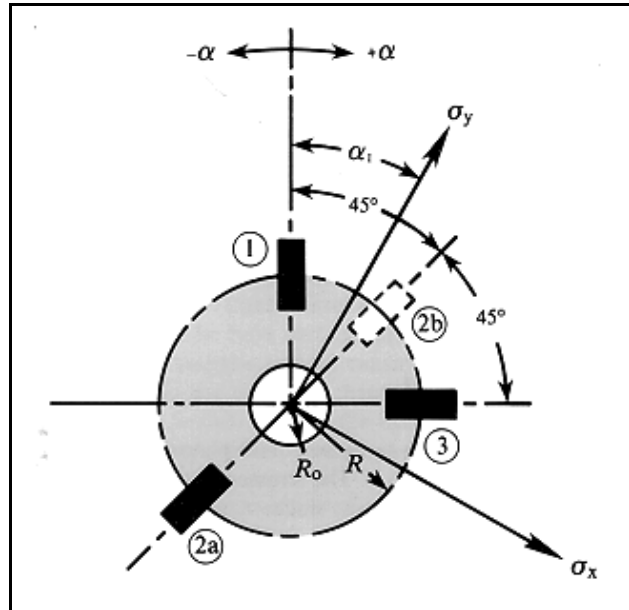


Figura 4. Disposición de la roseta de galgas extensométricas para determinar la tensión residual.

Cuando las ecuaciones (10) se resuelven simultáneamente para las tensiones principales y su dirección, los resultados se pueden expresar así:

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (11a)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (11b)$$

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

donde α es el ángulo que forma la galga 1 con el eje principal más cercano (en la dirección de la numeración de las galgas, si es positivo; u opuesto, si es negativo).

Reservando el sentido de α para definirlo más convenientemente desde la galga 1 hasta el eje más cercano, mientras que se mantenga el anterior convenio de signos.

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

Los siguientes comentarios importantes sobre las ecuaciones (11) deberían ser cuidadosamente anotados. Estas ecuaciones son muy similares en apariencia a las relaciones de adquisición de datos para galgas extensométricas de roseta convencionales, pero las diferencias son significativas. Los coeficientes A y B no solo incorporan las propiedades elásticas del material a ensayar, sino que reflejan la intensa atenuación de las deformaciones aliviadas relativa a la tensión relajada. Se puede observar, además, que los signos entre los términos en las ecuaciones (11a) y (11b) son opuestos a los de las ecuaciones de las rosetas convencionales. Esto ocurre porque A y B son siempre negativos; y así, ya que la ecuación (11a) es algebraicamente mayor que la ecuación (11b), la primera debe representar la tensión principal máxima.

La ecuación (11c) es idéntica a la de una roseta convencional rectangular de tres elementos, pero debe ser interpretada de forma diferente para determinar que tensión principal se refiere a la galga número 1. Las siguientes reglas pueden usarse para este propósito:

- $\varepsilon_3 \square \varepsilon_1 : \alpha$ se refiere a σ_{\max}
- $\varepsilon_3 \square \varepsilon_1 : \alpha$ se refiere a σ_{\min}
- $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 : \alpha = \nabla 45E$
- $\varepsilon_2 \square \varepsilon_1 : \sigma_{\max}$ en $+45E$
- $\varepsilon_2 \square \varepsilon_1 : \sigma_{\max}$ en $-45E$

También debemos resaltar alguna consideración importante para la determinación de los valores de los coeficientes A y B. La definición algebraica de las ecuaciones (6) solo es aplicable cuando se cumplen las condiciones impuestas por la solución Kirsch. Esta solución da la distribución de tensiones en los puntos de coordenadas (r, α) alrededor de un agujero circular en una lámina fina y extensa sujeta a tensión plana y uniforme. Sin embargo, la comparación de las figuras 3 y 4 ilustra que, ya que las rejillas de las galgas extensométricas de la roseta tienen áreas finitas, pueden percibir distribuciones variables de deformación como las representadas en la figura 3. Así, la señal de salida de cada galga tiende a representar la deformación media en el área de la rejilla. Además, como las rejillas están compuestas generalmente por líneas paralelas, las líneas que no están directamente en la línea central de una rejilla orientada radialmente no son radiales. Por tanto las galgas son ligeramente sensibles a la deformación tangencial, a la vez que a la deformación radial. Como consecuencia, se pueden obtener valores más precisos para los coeficientes integrando las ecuaciones (4) en las áreas de las respectivas rejillas de las galgas. Los coeficientes determinados así que dan cuenta del área finita de las galgas extensométricas, se designan por } y \} para distinguirlos de los valores en un punto como los

definidos por las ecuaciones (6). Un método alternativo para obtener ϵ_x y ϵ_y es medirlos por calibración experimental. El procedimiento para hacerlo se describe en la sección III "Determinar los coeficientes ϵ_x y ϵ_y ". Cuando se desarrolla correctamente, este procedimiento es potencialmente el medio más exacto para evaluar los coeficientes.

Cuando se emplean rosetas convencionales para análisis experimentales de tensión, se suele recomendar que las medidas de deformación sean corregidas debido a la sensibilidad transversal de las galgas. Estas relaciones no son aplicables directamente, sin embargo, para las deformaciones medidas con una roseta de tensión residual por el método de la perforación de un agujero.

En el caso de las tensiones residuales, las galgas individuales de la roseta están en diferentes posiciones de un campo de deformaciones que varía espacialmente. Como resultado, las deformaciones transversales y axiales aplicadas a cada galga no están relacionadas de la misma forma que en un campo de deformaciones uniforme. Una corrección rigurosa requeriría la evaluación del coeficiente C [en realidad es integrado o calibrado, ver las ecuaciones (6)], para las geometrías del agujero pasante y del agujero ciego. Debido a lo anterior, y el hecho de que las sensibilidades transversales de las rosetas de tensión residual son característicamente muy bajas (aproximadamente 1%), no se considera necesario corregir para sensibilidad transversal. Kabir,⁴ por ejemplo, demostró que el error debido a ignorar la sensibilidad transversal (en el caso de tensión residual uniaxial) es despreciable en comparación con las demás incertidumbres en los procedimientos de medida y adquisición de datos.

8.2.2. Análisis del agujero ciego

La base teórica para el método de la perforación de un agujero se desarrolló en el apartado anterior, partiendo de la perforación de un pequeño agujero pasante en una lámina plana, fina y ancha sujeta a una tensión plana y uniforme. Tal configuración, sin embargo, esta lejos de la típica de los objetos a ensayar en la práctica, ya que las partes de una máquina cualquiera y los miembros estructurales que requieren un análisis de tensiones residuales pueden ser de cualquier forma y tamaño, y raramente son finas o planas. Debido a esto, en la mayoría de las aplicaciones del método del agujero perforado se utiliza un agujero ciego y poco profundo.

La introducción de un agujero ciego en un campo de tensión plana produce un estado local de tensión muy complejo, para el cual aún no existe ninguna solución exacta disponible de la teoría de la elasticidad. Afortunadamente, sin embargo, Rendler y Vigness⁵ han demostrado que este caso es muy similar a la condición de agujero pasante con una distribución de tensiones de naturaleza general. Así, las deformaciones aliviadas debidas a perforar el agujero ciego aun varían sinusoidalmente a lo largo de un círculo concéntrico con el agujero, de la forma descrita por las ecuaciones (9). Se deduce, entonces, que estas ecuaciones, al igual que las relaciones de adquisición de datos en las ecuaciones (11) son igualmente aplicables a la implementación de agujero ciego cuando se emplean los

coeficientes apropiados del agujero ciego β y λ . Ya que estos coeficientes no pueden calcularse directamente por consideraciones teóricas, deben ser obtenidos por medios empíricos; esto es, calibración experimental o por procedimientos numéricos como el análisis por elementos finitos.

Comparado con el procedimiento del agujero pasante, el análisis del agujero ciego incluye una variable independiente adicional; llamada. la profundidad adimensional del agujero, Z/D (ver figura 5 en la siguiente página). Así, de una forma generalizada, los coeficientes pueden expresarse así:

$$\beta = f_A(E, \nu, r, Z/D) \quad (12a)$$

$$\lambda = f_D(E, \nu, r, Z/D) \quad (12b)$$

Para cualquier estado inicial dado de tensión residual, y un diámetro determinado, las deformaciones aliviadas generalmente aumentan (en una proporción decreciente) con la profundidad del agujero. Por tanto, con intención de maximizar la señales de deformación, el agujero se perfora generalmente a una profundidad correspondiente al menos a $Z/D = 0.4$ (ASTM E837 especifica $Z/D = 0.4$ como la profundidad máxima del agujero).

La variación general con la profundidad de las deformaciones aliviadas esta representada en la figura 5, donde las deformaciones han sido normalizadas, en este caso, como 100% para $Z/D = 0.4$. Los datos incluyen resultados experimentales de dos investigadores diferentes, demostrando la forma en que la relación entre el diámetro del agujero y el diámetro del círculo de las galgas (D_0/D) afecta a la función de deformaciones aliviadas. Ambos casos incluyen tensión (plana) uniaxial y uniforme, en muestras que son gruesas en comparación con la profundidad máxima del agujero. Las curvas dibujadas en la figura se consideran representativas de la respuesta esperada cuando la tensión residual es uniforme a través de la profundidad del agujero.

Una contribución importante del trabajo de Rendler y Vigness es la demostración de que, dado un conjunto de propiedades de un material, E y ν , los coeficientes β y λ son funciones geométricas exclusivamente, y por tanto constantes para todo caso geoméricamente similar. Esto significa que una vez determinados los coeficientes para una configuración particular de la roseta, podemos aplicar los mismos coeficientes si aumentamos o disminuimos el tamaño de la roseta y el diámetro del agujero de forma proporcional (asumiendo, por supuesto, que es el mismo material). Se han probado diferentes aproximaciones intentando eliminar la dependencia del material de β y λ , quedando solo la dependencia geométrica. Una de estas, propuesta por Schajer,⁷. Schajer introdujo dos coeficientes nuevos, denominados aquí $\tilde{\beta}$ y $\tilde{\lambda}$, y definidos así:

$$\tilde{\beta} = - (2E\beta) / (1 + \nu) \quad (13a)$$

$$\sigma_z = -2E\epsilon_z \quad (13b)$$

Por comparación con las ecuaciones (6), puede verse que para el agujero pasante, ϵ_z es independiente del material, y σ_z depende de forma muy débil del coeficiente de Poisson. Schajer ha determinado, calculándolo con elementos finitos, que en los agujeros ciegos, ϵ_z y σ_z varían menos del 2% para un rango de 0.25 a 0.35 del coeficiente de Poisson.

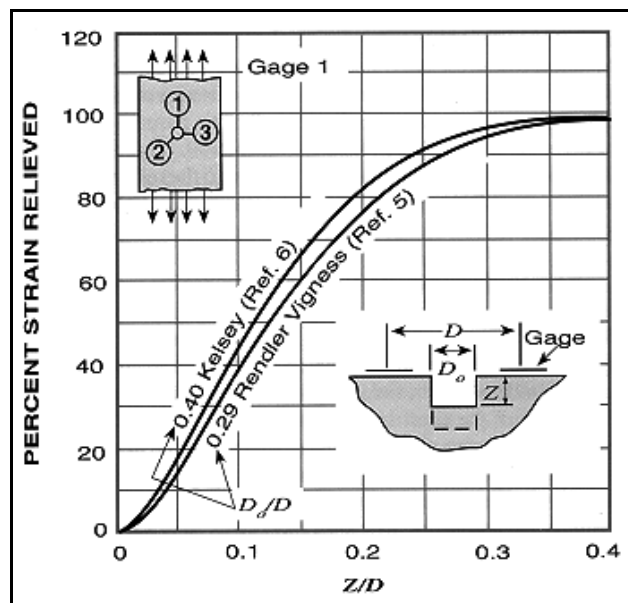


Figura 5. Deformación aliviada frente a la relación entre la profundidad del agujero y el diámetro del círculo de galgas.

8.3. Determinación de los Coeficientes A y B

Si la aplicación del análisis de la tensión residual incluye la perforación de un agujero pasante o de un agujero ciego, los coeficientes A y D (o α y δ) deben determinarse para calcular las tensiones producidas por las deformaciones aliviadas. En el caso del agujero pasante, pueden obtenerse valores razonablemente exactos de los coeficientes para cualquier caso particular por medios analíticos, si se desea. Esto se hace integrando, en el área de la rejilla de la galga, la componente de la deformación paralela al eje principal de sensibilidad de deformación de la galga. Dados los detalles de la geometría de la rejilla (espaciado y ancho de línea, número de líneas, etc.), se podría obtener una exactitud ligeramente mayor integrando a lo largo de las líneas de la rejilla individuales. Este método no se puede aplicar al análisis del agujero ciego porque las expresiones que relacionan las deformaciones aliviadas con las tensiones residuales, en términos de la profundidad del agujero, no son válidas.

Calibración experimental

Los coeficientes necesarios para el análisis del agujero pasante o del agujero ciego pueden determinarse por calibración experimental. Este procedimiento es particularmente atractivo ya que tiene en cuenta automáticamente las propiedades mecánicas del material a ensayar, la geometría de la roseta de galgas extensométricas, el diámetro y la profundidad del agujero, y el efecto promediador de la deformación de la rejilla de la galga extensométrica. Cuando se desarrolla correctamente, con suficiente atención a los detalles, es potencialmente el medio más exacto para determinar los coeficientes. Su principal desventaja es que la calibración debe repetirse cada vez que se incluye un conjunto diferente de parámetros geométricos.

La calibración de A y D se efectúa instalando una roseta de galgas extensométricas en un espécimen con una tensión biaxial y hecho con el mismo material que la pieza a ensayar. La roseta debería estar orientada para alinear la rejilla número 1 paralelamente a la dirección de la carga, colocando la rejilla número 3 a lo largo del eje transversal del espécimen. Hay que tener cuidado de que el estado de tensión uniaxial sea uniforme a lo largo de la sección de la pieza; p.e., que la tensión flexora es despreciable. Para minimizar efectos de borde, la anchura de la muestra debe ser por lo menos diez veces el diámetro del agujero, y la distancia entre las agarraderas de la máquina al menos cinco veces el ancho. Cuando se determinan σ_c y σ_t para aplicaciones del agujero ciego el grosor del espécimen se recomienda que sea de más de cinco veces el diámetro del agujero. Para la calibración del agujero pasante, el grosor de la muestra de calibración debe ser preferentemente el mismo que el de la pieza a ensayar. También es importante que la tensión máxima aplicada durante la calibración no exceda la mitad del límite elástico del material. En cualquier caso, la tensión aplicada más la tensión residual inicial debe ser lo suficientemente baja, para evitar el riesgo de fluencia local debida al efecto de concentración de tensiones del agujero.

Básicamente, el procedimiento de calibración incluye la medida de las deformaciones de la roseta bajo las mismas cargas aplicadas o tensión de calibración, σ_c , antes y después de perforar el agujero. Tal procedimiento es necesario para eliminar el efecto de alivio de deformaciones que podría ocurrir debido a la relajación de la tensión residual en el espécimen de calibración. Con esta técnica, el incremento de deformación observada (antes y después de la perforación del agujero) es causada solamente por la tensión de calibración aplicada y está relacionada únicamente con esa tensión. Los pasos en el procedimiento de calibración pueden ser brevemente resumidos, teniendo en cuenta que solo es necesario medir las deformaciones de la rejilla número 1 y número 3, ya que estas rejillas son las que están alineadas con los ejes principales de la muestra:

1. Equilibrar a cero los circuitos de las galgas.

2. Aplicar una carga, P, al espécimen para conseguir la tensión de calibración, σ_c .
3. Medir las deformaciones ϵ'_1 y ϵ'_3 (antes de perforar).
4. Descargar el espécimen, y quitarlo de la máquina de ensayo.
5. Perforar el agujero, como se describe en la sección 4 "Técnicas experimentales".
6. Volver a poner el espécimen en la máquina de ensayo, volver a equilibrar a cero los circuitos de las galgas, y volver a aplicar la misma carga, P.
7. Medir las deformaciones ϵ''_1 y ϵ''_3 (después de la perforación).

Las deformaciones de calibración correspondientes a la carga, P, y la tensión, σ_c , son entonces:

$$\begin{aligned}\epsilon_{c1} &= \epsilon''_1 - \epsilon'_1 \\ \epsilon_{c3} &= \epsilon''_3 - \epsilon'_3\end{aligned}$$

La fiabilidad de la calibración puede ser mejorada cargando el espécimen de forma progresiva y haciendo medidas de la deformación en cada nivel de carga, antes y después de perforar el agujero. Esto permite dibujar un gráfico de σ_c frente a ϵ_{c1} y ϵ_{c3} , para que a partir de los puntos de datos puedan construirse curvas de deformación más exactas, para minimizar el efecto de errores aleatorios. También ayudará identificar la presencia de fluencia, si se produjera. La relación resultante entre las tensiones aplicadas y las deformaciones aliviadas es por lo general más representativa que la obtenida por determinación de un solo punto.

Como la calibración se desarrolla con solo una tensión principal distinta de cero, puede utilizarse la ecuación (5a) para desarrollar expresiones para los valores calibrados de ϵ_{c1} y ϵ_{c3} . Sustituyendo en la ecuación (5a) $\alpha=0^\circ$ y $\alpha=90^\circ$, para las rejillas número 1 y número 3 respectivamente:

$$\epsilon_{c1} = \sigma_c [A + D \cos(0^\circ)] = \sigma_c (A + D)$$

$$\epsilon_{c3} = \sigma_c [A + D \cos(2 \cdot 90^\circ)] = \sigma_c (A - D)$$

Calculamos A y D:

$$A = (\epsilon_{c1} + \epsilon_{c3}) / (2\sigma_c) \quad (14a)$$

$$D = (\epsilon_{c1} - \epsilon_{c3}) / (2\sigma_c) \quad (14b)$$

El procedimiento descrito aquí se ha aplicado a un agujero pasante en un espécimen hecho con acero inoxidable 304, y los datos de calibración están representados en la figura 6. Puede verse en la figura que para esta geometría ($D_o / D = 0,35$) y material, ϵ_{c1} y ϵ_{c3} son $-90\mu\epsilon$ y $+39\mu\epsilon$, respectivamente, cuando σ_c es 10000 psi (69 MPa). Sustituyendo en las ecuaciones (14):

$$A = -0,25 \cdot 10^{-8} \text{ psi}^{-1} (-0,36 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1})$$

$$\Delta = -0,65 \cdot 10^{-8} \text{ psi}^{-1} (-0,94 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1})$$

Aunque el ejemplo numérico está referido a los coeficientes del agujero pasante, el mismo procedimiento se sigue en la calibración de los coeficientes del agujero ciego a profundidad máxima. Una vez que hemos obtenido ϵ_{c1} y ϵ_{c3} de esta forma, si conocemos el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson del material, podemos calcular con las ecuaciones (13) los correspondientes coeficientes independientes del material. Si se desea el procedimiento se puede repetir en el rango práctico de D_o / D para poder dibujar curvas de ϵ_{c1} y ϵ_{c3} para todos los casos de interés.

Debería tenerse en cuenta que los valores para los coeficientes básicos ϵ_{c1} y ϵ_{c3} a partir de un ensayo de calibración concreto son aplicables solamente para condiciones de medida de tensiones residuales que coincidan exactamente con las condiciones de calibración:

- material con las mismas propiedades elásticas.
- misma geometría de la roseta (pero la orientación de la roseta es arbitraria).
- mismo tamaño del agujero.
- misma forma del agujero (agujero pasante o agujero ciego de profundidad total).
- tensión uniforme con la profundidad.
- tensión nominal uniforme en un plano del agujero.

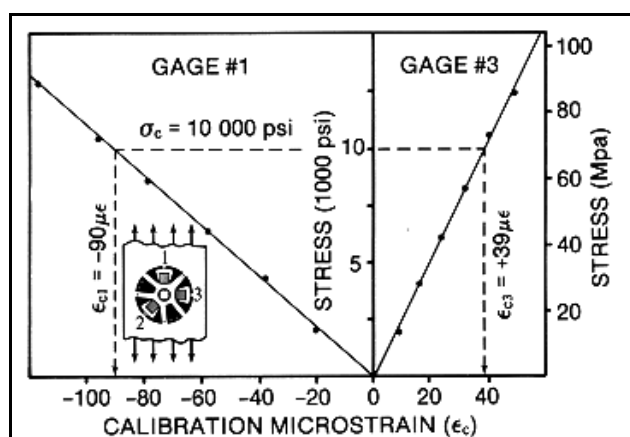


Figura 6. Tensión frente a la deformación aliviada para la calibración de los coeficientes A y Δ en acero inoxidable 304 (agujero pasante).

8.4. Técnicas Experimentales

Como en todos los métodos experimentales, para obtener resultados correctos es esencial utilizar los materiales, los procedimientos, y la instrumentación adecuados. La precisión del método de perforación del agujero depende principalmente de los siguientes factores:

- selección e instalación de las galgas extensométricas.
- alineación y perforación del agujero.
- instrumentación indicadora de deformación.
- comprensión de las propiedades mecánicas del material a ensayar.

8.4.1. Selección e instalación de las galgas extensométricas

Instalar tres galgas extensométricas individuales, correctamente espaciadas y orientadas en un pequeño círculo no es fácil de hacer, ni aconsejable, ya que pequeños errores en la colocación y orientación pueden producir grandes errores en las tensiones residuales calculadas. Los diseños de roseta incorporan marcas de centrado para alinear la herramienta de perforación con precisión en el centro del círculo de la galga, ya que esto es crítico para la exactitud del método.^{9, 10, 11} Todas las configuraciones son válidas para usarlas en un rango de compensaciones de temperatura en metales de estructura normal.

La preparación de la superficie para instalar las rosetas es básicamente estándar. Sin embargo, se debe tener cuidado, ya que la abrasión de la superficie del objeto a ensayar puede alterar el estado inicial de tensiones residuales.¹² Por lo general, es importante que la preparación de la superficie y los procedimientos de instalación de las galgas sean de la máxima calidad, para permitir la medida correcta de las pequeñas deformaciones que se suelen registrar en el método de la perforación de un agujero. Como se evidencia en los datos de calibración de la figura 6, las deformaciones aliviadas correspondientes a una magnitud de tensión residual dada son considerablemente inferiores que la obtenidas en un ensayo mecánico convencional con el mismo nivel de tensión. Cualquier fluctuación o inexactitud en la lectura de la galga, ya sea debido a una mala instalación de la galga, instrumentación inestable, o cualquier otra cosa, puede afectar seriamente el cálculo de las tensiones residuales, ya que las deformaciones que medimos son pequeñas.

8.4.2. Instrumentación de medida de las deformaciones

Las rosetas de tensión residual no imponen ninguna necesidad de instrumentación especial. Cuando las medidas deben ser hechas en el exterior la instrumentación más efectiva y conveniente suele ser un indicador portátil de deformación estática que funciona con baterías (pilas), complementado con una unidad de conexión y balance, de precisión.

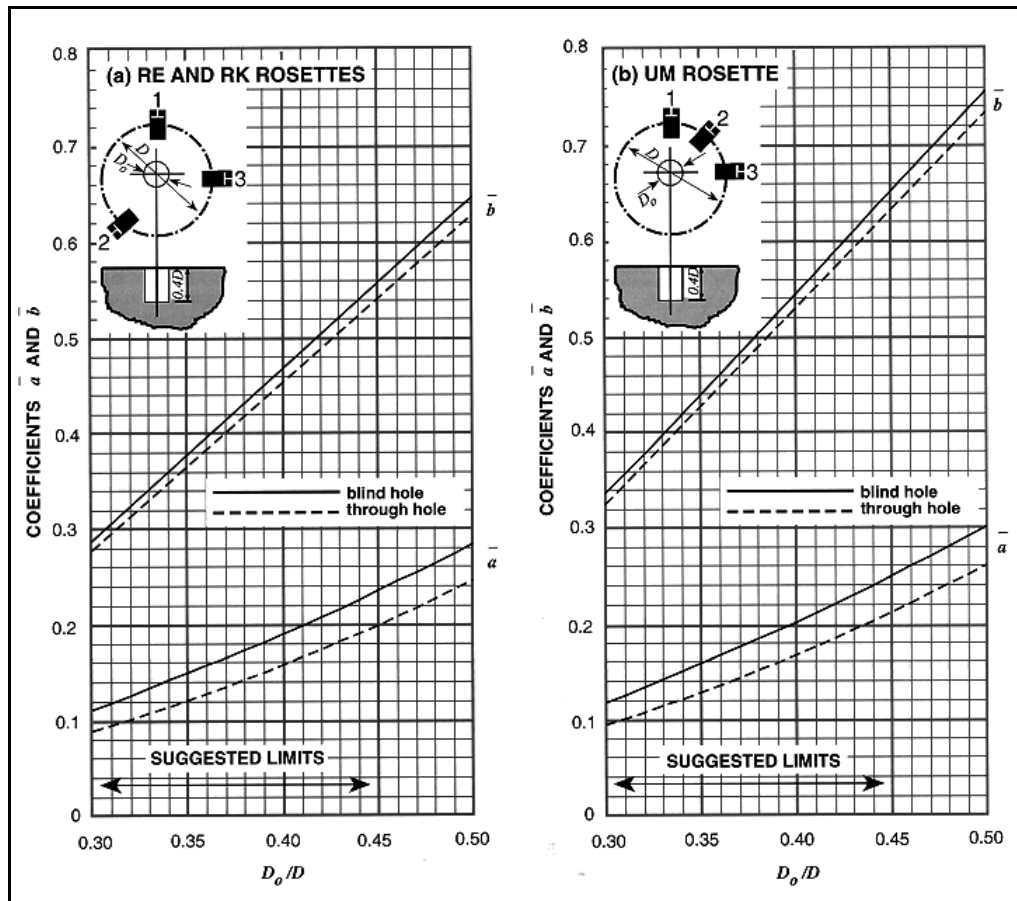
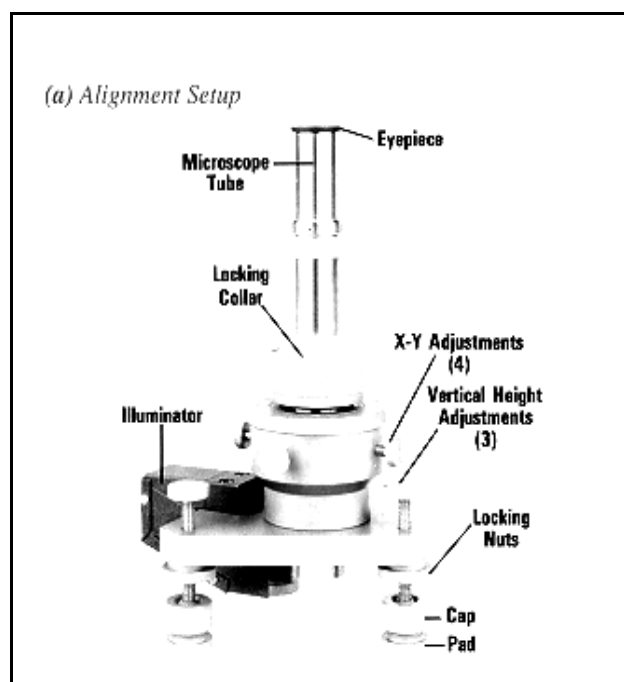


Figura 8. Coeficientes de adquisición de datos α y d frente al diámetro adimensional para las rosetas de tensión residual.

8.4.3. Alineación

Rendler y Vigness observaron que "la exactitud del método (de perforación de agujero) para aplicaciones en el exterior estará directamente relacionada con la habilidad del operador para posicionar la fresadora con precisión en el centro de la roseta de galgas extensométricas". Estudios más recientes han cuantificado el error en el cálculo de la tensión debido a la excentricidad del agujero. Por ejemplo, con un agujero que está separado 0,001 pulgadas (0,025 mm) del centro de la roseta 062RE o 062RK, el error en la tensión calculada no excede el 3% (para el estado de tensión uniaxial).^{9, 10, 11} En la práctica, la precisión de alineación requerida para estar dentro de las 0,001 pulgadas (0,025 mm) se consigue utilizando la guía de perforación RS-200 que se muestra en la figura 9. La guía de perforación se asegura al objeto de ensayo pegando sus tres soportes al objeto con un adhesivo débil de secado rápido. Luego se instala un microscopio en la unidad y se realiza la alineación visual con la ayuda de las 4 tuercas de ajuste X-Y que hay en el exterior de la guía.



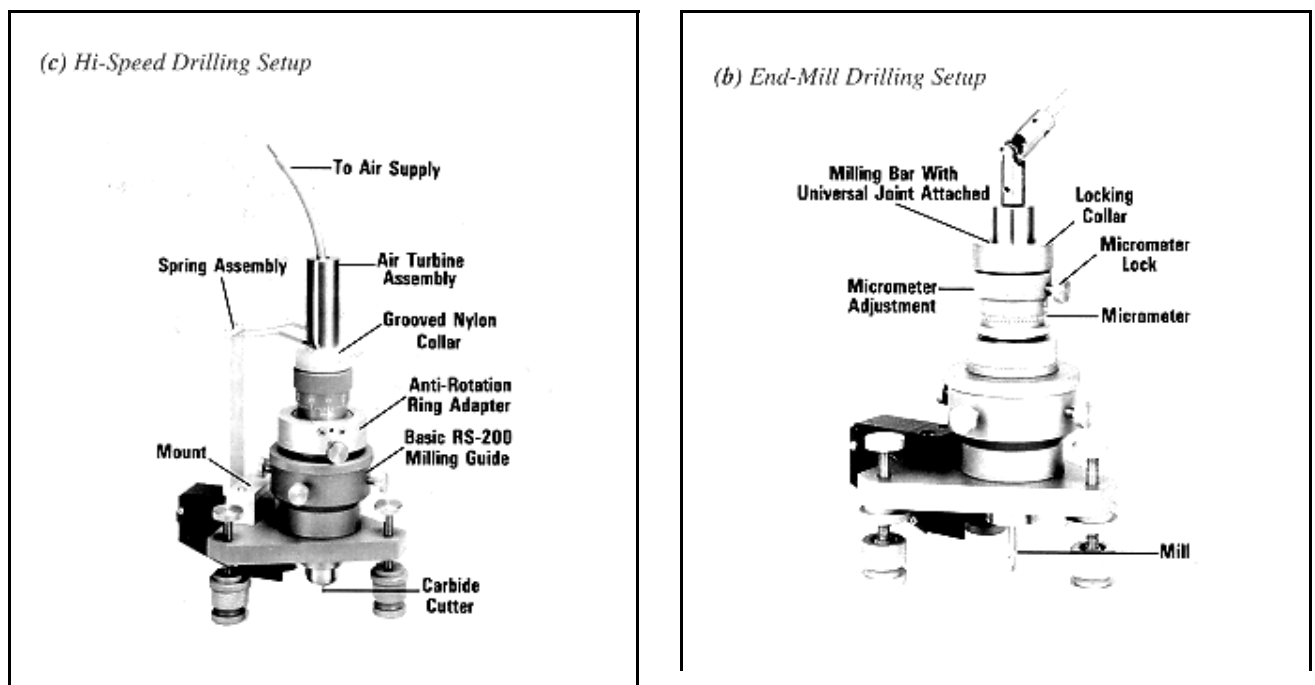


Figura 9. Guía de perforación RS-200, utilizada para hacer un agujero de fondo plano colocad con precisión.

8.4.4 Perforación

Se han publicado numerosos estudios sobre los efectos del tamaño y la forma del agujero. Rendler y Vigness especificaron una forma de fresa especial es compatible con las rosetas de tensión residual de la figura 7. Esta fresa tiene el extremo pensado para eliminar los bordes cortantes de los lados, que luego es relevado por la cara cortante para evitar pulir la superficie del agujero. Es muy importante que la fresa este rígidamente guiada durante la operación de perforación para que avance en

línea recta sin presión lateral en el agujero o fricción en el borde no cortante. Estos extremos de fresa generan la forma deseada del agujero, fondo plano y esquinas rectangulares en el contacto inicial de la superficie y mantienen la forma apropiada hasta que el agujero está acabado. Con esto cumplen los requerimientos estipulados en ASTM-E837 para la perforación incremental. Estos extremos de fresa ofrecen una aproximación simple y directa cuando se miden tensiones residuales en materiales fácilmente conformables como son el acero templado y algunas aleaciones de aluminio. La figura 9b muestra la guía de perforación RS-200 sin el microscopio y el extremo de fresa montado en su lugar. El extremo de fresa se conduce a través de la junta universal en la parte superior de la unión, por perforación manual o por perforación electrónica de velocidad variable.

En 1982, Flaman¹³ presentó por primera vez excelentes resultados para medidas de tensión residual utilizando turbinas de aire y cortadores de carburo de alta velocidad (hasta 400000 rpm). Esta técnica mantiene todas las ventajas de la del extremo de fresa especialmente revestido (buena forma del agujero, adaptabilidad a la perforación incremental, etc.) mientras que demuestra algunas características adicionales muy deseables. Los materiales que son difíciles de conformar, tal como el acero inoxidable 304 pueden ser ensayados de una forma aceptablemente libre de tensiones utilizando la combinación turbina de aire cortador de carburo. Además, la aproximación a alta velocidad está básicamente libre de la dependencia de un operador, y generalmente se prefiere al procedimiento del extremo de fresa. La figura 9c muestra el montaje de la turbina de aire con el cortador de carburo instalados en la misma guía básica de perforación RS-200. Los cortadores de carburo no son efectivos para penetrar el cristal, la mayoría de las cerámicas, metales muy duros, etc.; pero los cortadores de diamante son prometedores, y los esfuerzos de investigación continúan.

En 1972, Bush y Kramer¹⁴ publicaron que los agujeros libres de tensión se consiguen utilizando un mecanizado de chorro abrasivo (AJM). Proctor y Beaney¹⁰ hicieron modificaciones y mejoras al AJM, luego Bynum¹⁵ y Wnuk¹⁶ obtuvieron buenos resultados adaptando mecánicamente los aparatos AJM para su uso en la guía de perforación RS-200. La principal ventaja de AJM es su probada habilidad para generar agujeros libres de tensión en casi todos los materiales. Sus principales limitaciones se centran en los considerables cambios en la forma del agujero en función de la profundidad. La forma inicial es como un platillo, y la final es cilíndrica con esquinas ligeramente redondeadas. Durante la perforación hay también incertidumbre acerca de la profundidad real del agujero en cada etapa. Estos factores hacen del AJM una técnica menos práctica para determinar la variación con la profundidad de las deformaciones aliviadas, como se recomienda en ASTM-E837.

8.4.5. Propiedades mecánicas

Como en cualquier tipo de análisis experimental de tensión, la exactitud de la medida de tensión residual esta limitada a la exactitud con la que conocemos el modelo elástico y el coeficiente de Poisson. Las incertidumbres típicas en las propiedades mecánicas del acero común y aleaciones de aluminio están en las proximidades del 1 al 3%; y, como tales, son contribuciones menores a los errores potenciales en el análisis de tensión residual. Se pueden introducir errores mucho mayores por desviaciones de las hipótesis adoptadas en la teoría básica, como se describe en la sección II. Una hipótesis clave, por ejemplo, es que el material es elástico y lineal, ya que el desarrollo incluye la ley de Hooke y la superposición de tensiones. Si la relación tensión/deformación no es lineal para el material de ensayo, la tensión residual calculada será errónea debido a fluencia y otras cosas.

Cuando la tensión residual inicial está muy cerca de la resistencia a la fluencia, la concentración de tensiones provocada por la presencia del agujero podría inducir fluencia local en la zona. Por tanto es necesario establecer un nivel umbral de tensión residual, por debajo del cual el efecto de la fluencia es despreciable. Este problema se ha estudiado analítica y experimentalmente, y hay conformidad sustancial entre las diferentes investigaciones.^{10, 17, 18} Es decir, que los errores son despreciables cuando la tensión residual es menor de un 70% del límite de proporcionalidad del material a ensayar para agujeros pasantes y ciegos. Por otra parte, cuando la tensión residual inicial es igual al límite de proporcionalidad, se han observado errores positivos de 10 al 30 % (y mayores). La magnitud del error depende obviamente de la inclinación del diagrama tensión/deformación en la región postfluencia; y tiende a aumentar según la curva se va aplanando, aproximándose al comportamiento plástico perfectamente idealizado.¹⁸

8.5. Adquisición e Interpretación de Datos. Agujero Ciego

Como se recomienda en ASTM-E387, siempre es preferible perforar el agujero en pequeños incrementos de profundidad, grabando las deformaciones observadas y la profundidad medida en cada incremento. Esto se hace para obtener datos para juzgar si la tensión residual es uniforme con la profundidad, validando así el uso de los coeficientes estándar de profundidad total $\sim y$ para calcular las magnitudes de la tensión. Si no se toman medidas incrementales, no hay medios para hacer inferencias sobre la uniformidad de la tensión, y la tensión residual calculada podría tener un error considerable. En tales casos, cuando la tensión varía con la profundidad, debería tenerse en cuenta que la tensión calculada es siempre menor que el máximo real.

Actualmente no hay ningún criterio absoluto para verificar la uniformidad de la tensión desde la superficie de la pieza a ensayar hasta el fondo del agujero de profundidad total. Sin embargo, los datos incrementales, consistentes en la tensión aliviada frente a la profundidad del agujero, pueden usarse de dos formas diferentes para ayudar a la detección de distribuciones de tensión no uniformes. La primera de las formas consiste en calcular, para cada incremento de profundidad las sumas y diferencias de los datos de la deformación medida, $\epsilon_3 + \epsilon_1$ y $\epsilon_3 - \epsilon_1$ respectivamente.¹ Expresar cada

grupo de datos como fracciones de sus valores cuando el agujero iguala 0,4 veces el diámetro medio del círculo de galgas extensométricas. Dibujar estas deformaciones porcentuales frente a la profundidad del agujero normalizada. Estas gráficas deberían dar como resultado puntos de datos muy cercanos a las curvas que se muestran en la figura 10. Los puntos que se eliminan de las curvas de la figura 10 indican o una grave no uniformidad tensional o errores de medida de deformación. En cualquier caso, los datos medidos no son aceptables para cálculos de tensión residual utilizando los coeficientes \sim y $|$ para profundidad total.

Cuando la dirección principal de las tensiones residuales está más cerca de la dirección axial de la galga 2, que de las direcciones de las otras galgas 1 o 3, la suma de deformaciones $\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2$ será numéricamente más grande que $\epsilon_3 - \epsilon_1$. En tal caso, la comprobación de los datos de la deformación porcentual debería hacerse utilizando $\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2$ en lugar de $\epsilon_3 - \epsilon_1$.

Los juicios anteriores concernientes a la distribución aproximada de tensiones, basados en la representación de las deformaciones aliviadas porcentuales, pueden complementarse con análisis adicionales de datos incrementales. Esto se hace calculando, en cada incremento de profundidad, las tensiones residuales principales equivalentes uniformes (E-U). Por definición, la tensión (E-U) es esa magnitud de la tensión que, si estuviera uniformemente distribuida, produciría la misma deformación aliviada total, a cualquier profundidad, según se mide durante la perforación del agujero.

NOTA: Este ensayo gráfico no es un indicador sensible de la no uniformidad del campo de tensiones. Las muestras con campos tensionales significativamente no uniformes pueden producir curvas de deformación sustancialmente similares a las que se muestran en la figura 10. El propósito principal del ensayo es identificar grosso modo campos tensionales no uniformes. Es más, la comparación gráfica utilizando $\epsilon_3 - \epsilon_1$ o $\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2$ no es efectiva cuando el campo de tensiones aliviadas se aproxima a unas tensiones o compresiones biaxiales iguales ($\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_3$) como se esperan en los procedimientos de tratamientos térmicos y "surface blasting". En comparación con la representación de $\epsilon_3 + \epsilon_2$ es inefectiva cuando $\epsilon_3 = \epsilon_1$ (cortante puro); sin embargo esta condición es relativamente infrecuente en la industria.

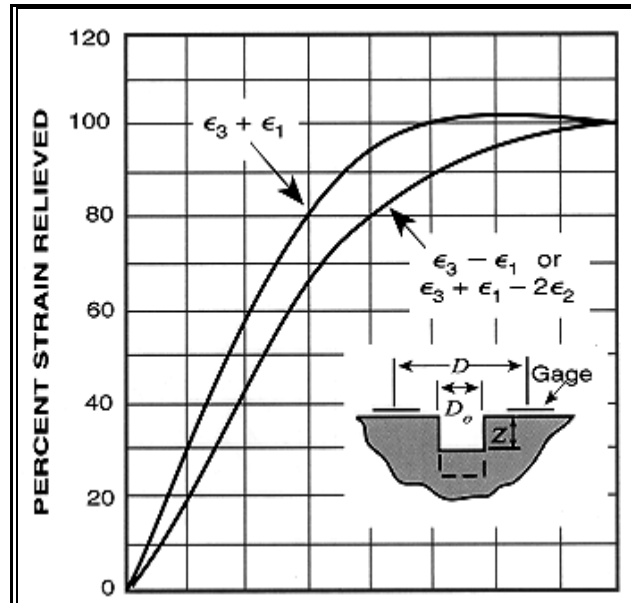


Figura 10. Deformación porcentual frente a profundidad de agujero normalizada para distribución de tensión uniforme con la profundidad.¹

Para calcular las tensiones (E-U) en cada incremento, debemos disponer de los coeficientes de tensión uniforme \sim y $|$, en función de la profundidad del agujero. Estos han sido determinados por Schajer,²³ basándose en estudios de elementos finitos. En la figura 11 se han representado los coeficientes de profundidad parcial que obtuvo Schajer frente a la profundidad adimensional del agujero, Z/D , para diferentes valores de la relación diametral D_0/D . Cuando se sabe que la tensión residual es uniforme con la profundidad, los coeficientes aplicados a cualquier combinación de Z/D y D_0/D pueden, en principio, leerse directamente de los gráficos de la figura 11 y usarse para calcular las tensiones residuales sustituyendo en las ecuaciones (13) y luego en las ecuaciones (11). En la práctica, sin embargo, la perforación se continua generalmente hasta la profundidad total del agujero ($Z/D=0,4$) como se recomienda en ASTM-E387, ya que las deformaciones aliviadas son mayores y pueden medirse con mayor exactitud. Por otra parte los coeficientes de profundidad total para tensión uniforme se conocen bastante debido a las numerosas calibraciones experimentales.

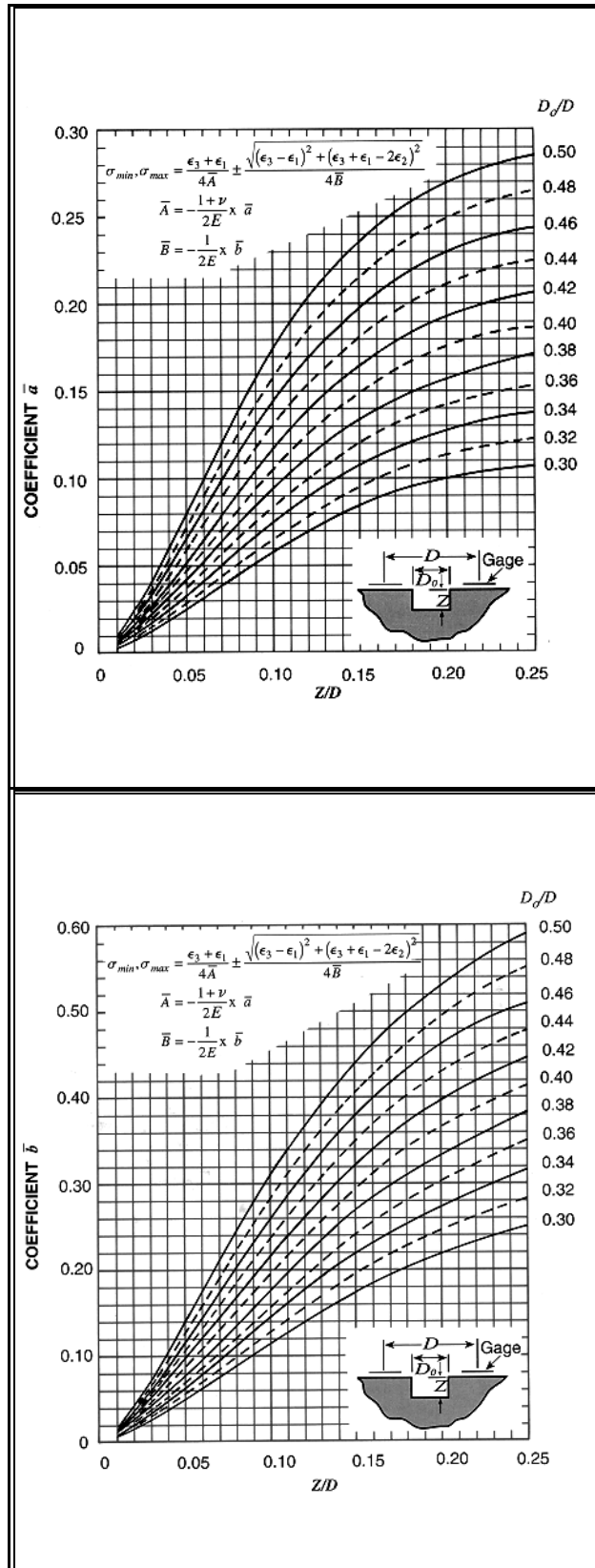


Figura 11. Coeficientes A y Δ de adquisición de datos para las rosetas RE y RK, como funciones de la profundidad y diámetro adimensionales del agujero. Los coeficientes provienen de estudios de elementos finitos para tensión uniforme con la profundidad realizados por Schajer²³, y se utilizan para calcular tensiones equivalentes uniformes.

Cuando la tensión residual varía aparentemente con la profundidad, las tensiones a profundidades parciales, calculadas con los coeficientes de la figura 11 no representan, por supuesto, la verdadera tensión residual, pero la tensión uniforme equivalente (desde la superficie hasta la profundidad Z) produciría la misma deformación aliviada a esa profundidad. Sin embargo, como se demuestra en el siguiente ejemplo numérico, la tabulación de las tensiones E-U calculadas puede proporcionar al menos información cualitativa a cerca de la variación de la tensión con la profundidad. Es más, para el primer incremento pequeño de profundidad, la tensión E-U aliviada es la mejor estima disponible de la tensión real en esa capa. Las tensiones E-U calculadas para la sección y los subsiguientes incrementos de profundidad están siempre menos sujetos a interpretación cuantitativa. Esto es así porque la deformación aliviada acumulativa en cualquier profundidad esta afectada de forma compleja por las tensiones relajadas en todas las profundidades inferiores.

Ejemplo numérico de procedimientos de adquisición de datos*

Una roseta de galgas se ha colocado en una barra de acero laminado en frío. Las propiedades elásticas del material son $E = 29,5 \times 10^6$ psi, y $\nu = 0,29$. Utilizando la guía de perforación RS-200 y el accesorio de alta velocidad, se perfora incrementalmente un agujero hasta una profundidad de 0,081 pulgadas. Como el diámetro del círculo de galgas de la roseta es 0,202 pulgadas, el cociente de diámetro $D_o/D = 0,347$ para este ejemplo. Las profundidades y deformaciones medidas para todos los incrementos se enumeran en las columnas 1 y 3 de la tabla 1.

El siguiente paso es calcular los parámetros de las deformaciones aliviadas $(\epsilon_3 + \epsilon_1)$ y $(\epsilon_3 - \epsilon_1)$ ** en cada incremento de profundidad como se muestra en la columna 4 de la tabla 1. Para este propósito, los parámetros de deformación en el agujero de profundidad total se definen como los parámetros del 100% de deformación aliviada.

* Por simplicidad y claridad en la presentación de este ejemplo, los valores numéricos se dan solamente en el sistema de unidades de los U.S. El procedimiento, por supuesto, no se ve afectado por las unidades que se utilicen.

** Utilizar $(\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)$ mejor que $(\epsilon_3 - \epsilon_1)$ cuando el ángulo de dirección (α) es $22-1/2^\circ \leq \alpha \leq 67-1/2^\circ$ (ver ASTM-E387).

así en profundidad total $Z/D = 0,4$ (columna 4 tabla 1):

$$\begin{aligned}(\epsilon_3 + \epsilon_1) &= -237 \mu\epsilon \\(\epsilon_3 - \epsilon_1) &= +67 \mu\epsilon \\(\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2) &= -153 \mu\epsilon\end{aligned}$$

Para calcular los parámetros de la deformación aliviada porcentual (o parámetros normalizados)

en $Z/D=0,050$, mirando en la columna 4 de la tabla 1, por ejemplo:

$$\begin{aligned}
 (\epsilon_3 + \epsilon_1) &= -80/-237 = 0,34 \text{ (34\%)} \\
 (\epsilon_3 - \epsilon_1) &= 18/67 = 0,27 \text{ (27\%)} \\
 (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2) &= -38/-153 = 0,25 \text{ (25\%)}
 \end{aligned}$$

Estos y todos los demás parámetros normalizados de deformación se enumeran en la columna 4 de la tabla 1. Como se recomienda en ASTM-E387 las deformaciones normalizadas se representan frente a Z/D (figura 12) para compararlas con la respuesta de la tensión uniforme. Los puntos experimentales, $(\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)$ en particular, caen fuera de la respuesta de la tensión uniforme, lo que indica tensión no uniforme.

Solamente para propósitos de deformación, la tensión residual se calculará primero utilizando solamente las máximas deformaciones medidas a la profundidad máxima del agujero (0,080 pulgadas). Las resultantes son las que serían deducidas (erróneamente) de los datos de deformación por un experimentador que ignorase las implicaciones de la figura 12, y asuma que es una distribución uniforme de tensión.

Los coeficientes A y D para el agujero de profundidad máxima pueden leerse en la figura 8a en el valor especificado $D_0/D=0,347$. Interpolando en el gráfico para las rosetas RS/RK.

$$\begin{aligned}
 a &= 0,147 \\
 d &= 0,372
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A &= [(1+\nu)/2E] * a = -0,321A10^{-8} \text{ psi}^{-1} \\
 D &= (1/2E) * d = -0,631A10^{-8} \text{ psi}^{-1}
 \end{aligned}$$

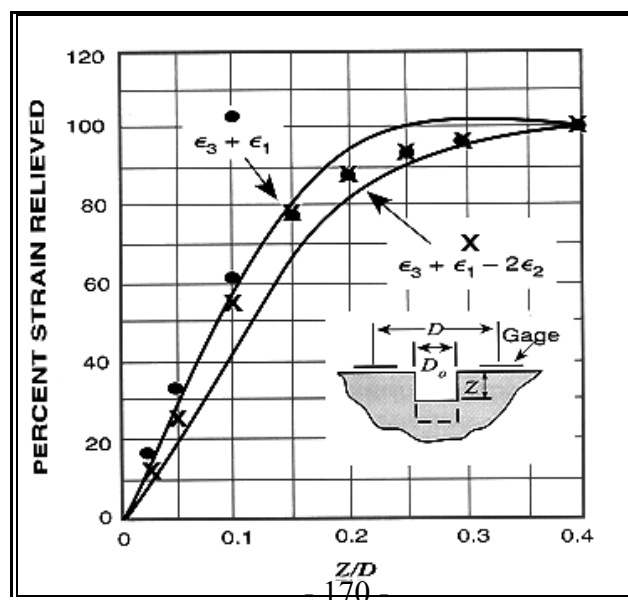


Figura 12. Deformaciones aliviadas normalizadas (del ejemplo numérico), comparadas con la respuesta de tensión uniforme de ASTM-E837.

Luego sustituyendo $4A$, 4Δ , y las deformaciones medidas en $Z/D=0,4$ (de la columna 3, tabla 1) en las ecuaciones (11) resulta:

$$\alpha_1 = -33 \equiv \text{desde la galga numero 1 hasta } \sigma_{\max}, \text{ ya que } \varepsilon_3 > \varepsilon_1$$

$$\sigma_{\max} = +25000 \text{ psi}$$

$$\sigma_{\min} = +12000 \text{ psi}$$

Los datos de las primeras 4 columnas de la tabla 4 se utilizarán ahora, junto con los coeficientes dados en la figura 11, para calcular las tensiones uniformes equivalentes en cada incremento de profundidad. Este procedimiento proporcionará una visión intuitiva adicional de la variación con la profundidad, y proporcionará una estimación de la tensión media en el primer incremento. Los cálculos se desarrollan como viene a continuación, comenzando con el primer incremento, para el cual $Z/D=0,025$.

Interpolando cuidadosamente en los gráficos de la figura 11 (para $D_0/D=0,0347$ y $Z/D=0,025$):

$$\alpha = 0,016$$

$$\delta = 0,030$$

Sustituyendo estos valores con las constantes elásticas, en las ecuaciones (13) como antes:

$$A = -0,035 * 10^{-8} \text{ psi}^{-1}$$

$$D = -0,051 * 10^{-8} \text{ psi}^{-1}$$

Los resultados más recientes se recuerdan en las columnas 5 y 6 de la tabla 1, y el procedimiento se repite para todos los incrementos de profundidad restantes. Las tensiones principales uniformes equivalentes y sus direcciones pueden luego ser calculadas en cada incremento, utilizando las ecuaciones (11):

$$\sigma_{\frac{\max}{\min}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4 A} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \varepsilon_2)^2}}{4 B}$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}$$

Las tensiones y direcciones resultantes se enumeran en las columnas 7, 8 y 9 de la tabla 1*, y las tensiones se representan en la figura 13 frente a la profundidad media de los respectivos incrementos.

Si no lo era antes, ahora es obvio que la tensión varía significativamente con la profundidad. Si la tensión hubiera sido uniforme, los datos se hubieran representado como dos líneas rectas horizontales (excepto por errores especiales). También es interesante comparar las tensiones calculadas en el primer incremento de profundidad con las que habíamos calculado antes, asumiendo distribución de tensión uniforme, y utilizando solo los coeficientes de agujero de profundidad máxima \sim y $|$. Las tensiones principales medias estimadas de la tabla 1 para el primer incremento de perforación son alrededor de un 50% mayores que las basadas en la hipótesis de tensión uniforme. Este ejemplo ilustra la necesidad de extraer tanta información como sea posible del método de perforación de agujero para la perforación incremental (con la geometría apropiada del agujero).

Para la conveniencia del usuario de la RS-200, en la página 31 se reproduce una copia de la forma de la tabla 1. La forma puede ser copiada para su uso en la grabación de los datos calculados y medidas durante el ensayo de tensiones residuales.

Los datos calculados de la tensión que se enumeran en la tabla 1 y se representan en la figura 13 pueden examinarse de forma diferente calculando la tensión uniforme equivalente "aparente" en cada incremento.¹⁹ Eso se hace de forma separada para σ_{\max} y σ_{\min} como sigue:

donde:

$$\sigma'_n = \frac{\sigma_n Z_n - \sigma_{n-1} Z_{n-1}}{Z_n - Z_{n-1}} \quad (15)$$

σ'_n = tensión uniforme equivalente "aparente" en el incremento de perforación n.

σ_n, σ_{n-1} = tensión uniforme equivalente desde la superficie hasta las profundidades Z_n, Z_{n-1}

Z_n, Z_{n-1} = profundidades de los incrementos de perforación n y n-1.

El calculo anterior se desarrolla individualmente para cada tensión principal en cada

incremento de profundidad. Este procedimiento se ha seguido en los datos de la tabla 1, cuyos resultados se representan en la figura 14.

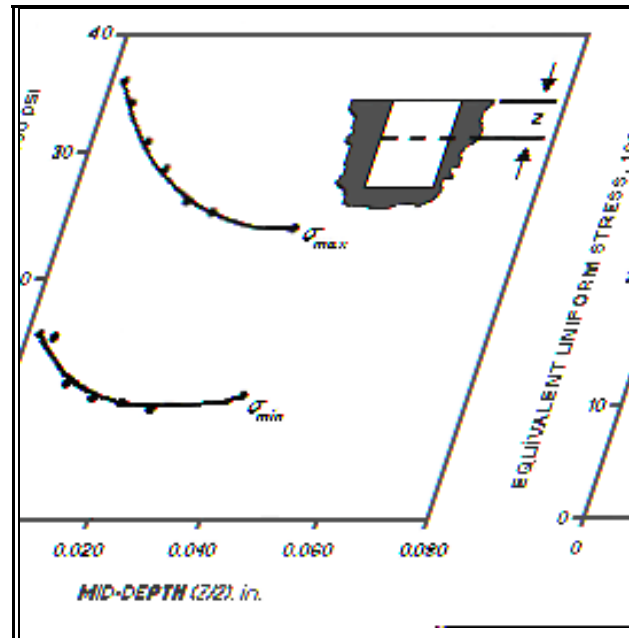


Figura 13. Tensión equivalente uniforme frente a la profundidad del agujero, con gráficos de las tensiones a profundidades medias.

Es importante tener en mente que ni las tensiones uniformes equivalentes de la tabla 1 y figura 13, ni las tensiones incrementales "aparentes" de la figura 14 representan la tensión residual real, excepto cuando la tensión esta uniformemente distribuida. Sin embargo, estas tensiones calculadas pueden ser útiles para identificar la presencia de tensión no uniforme e indicar la dirección de la distribución de tensiones. Por añadidura, en el primer incremento de profundidad, los dos métodos de análisis anteriores producirán el mismo resultado que , si el incremento es pequeño y las medidas de las deformaciones y la profundidad del agujero son suficientemente exactas, debería dar una buena estimación de las tensiones medias en ese incremento. Con cada incremento añadido a la profundidad, las tensiones calculadas deberían alejarse de las tensiones reales si hay suficiente variación de la tensión con la profundidad.

Limitaciones y precauciones

Los estudios de elementos finitos hechos por Schajer y por investigadores posteriores^{20, 21, 22, 23}

han demostrado que el incremento en la deformación producido por la perforación a cualquier incremento de profundidad (más allá del primero) es causado solo en parte por la tensión residual en ese incremento. El resto de la deformación aliviada incremental es generada por las tensiones residuales de los incrementos anteriores, debidos al aumento de la adaptabilidad del material, y por la variación de la distribución de tensión según el agujero profundiza. Por otra parte, en un incremento determinado, la contribución relativa de la tensión al correspondiente incremento de la deformación decrece rápidamente con la distancia a la superficie. Como resultado, la deformación aliviada total a profundidad máxima está principalmente influenciada por las tensiones en las capas de material más cercanas a la superficie, es decir, en el tercio o quizá la mitad superior de la profundidad del agujero. A profundidad de agujero correspondiente a $Z/D \leq 0,2$, las tensiones en estos incrementos tienen muy poco efecto en las deformaciones observadas. La forma del gráfico de deformación normalizada de la figura 5 confirma este comportamiento (para tensión uniforme), en este gráfico alrededor del 80% de la deformación total normalmente ocurre en la primera mitad de la profundidad del agujero. Debido a estas características, solo se pueden hacer pequeñas interpretaciones cuantitativas, si se puede, de los datos de deformación incrementales para incrementos mas allá de $Z/D=0,2$, con independencia del método analítico empleado para la adquisición de datos.

En resumen, la aplicación ideal del método de perforación de agujero es aquella en que la tensión es esencialmente uniforme con la profundidad. Para este caso, los coeficientes de adquisición de datos están bien establecidos, y las tensiones calculadas son suficientemente exactas para la mayoría de los prototipos ingenieriles asumiendo que no existen errores experimentales significativos. Sin embargo, la perforación incremental y el análisis de datos deberían realizarse siempre para verificar la uniformidad de la tensión. Si la tensión cerca de la superficie varía con la profundidad, los procedimientos dados aquí para análisis incremental aproximado ofrecen una alternativa simple y conveniente a los métodos de elementos finitos que son más rigurosos. Como se ilustra con el ejemplo de la barra de acero laminada en frío, los procedimientos descritos normalmente resaltan la presencia de variación de la tensión con la profundidad e indican su dirección, también proporcionan una estima cuantitativa de las tensiones principales medias en el primer incremento de perforación.

El error y la incertidumbre están siempre presentes en diferente grado, en todas las medidas de variables físicas. Y, por o general, sus magnitudes dependen fuertemente de la calidad de la técnica experimental y del número de parámetros que incluye. Como la determinación de las tensiones residuales por el método de la perforación de un agujero incluye un número y variedad de técnicas y parámetros mayor que el análisis de tensión experimental, los errores son potencialmente mayores. A causa de esto, y otras consideraciones brevemente resumidas a continuación, las tensiones residuales no pueden ser determinadas por lo general con la misma exactitud que las tensiones debidas a cargas estáticas aplicadas externamente.

La introducción del pequeño agujero en el espécimen a ensayar es una de las operaciones mas importantes del procedimiento. El manual de instrucciones para la RS-200 contiene instrucciones

precisas para hacer el agujero; y estas deberían seguirse rigurosamente para obtener la máxima precisión. El agujero debería ser concéntrico al objetivo de perforación de la roseta especial de galgas extensométricas. También debería tener la forma prescrita en términos de cilindricidad, fondo plano, y esquinas angulosas en la superficie. Es particularmente necesario que los requerimientos de la configuración del agujero se satisfagan cuando se está haciendo la perforación incremental para examinar la variación de la tensión con la profundidad. Bajo estas circunstancias, es importante que se mida con la mayor precisión posible la profundidad del agujero en cada incremento de perforación; ya que un pequeño error absoluto en la profundidad puede producir un gran error relativo en las tensiones calculadas. Debido a las limitaciones prácticas en la medida de pequeñas profundidades de agujero, el primer incremento de profundidad debería ser normalmente por lo menos de 0,005 pulgadas (0,13 mm). También es necesaria una medida precisa del diámetro del agujero. Por último, es importante que el agujero sea perforado (fresado) sin introducir tensiones residuales adicionales significativas. La precisión será sacrificada de acuerdo con el grado en que cualquiera de los requerimientos anteriores no sea cumplido.

Las deformaciones aliviadas por perforación de un agujero se miden generalmente, con instrumentación de deformación estática. Sin embargo, las deformaciones indicadas son característicamente mucho menores, que lo serían para el mismo estado tensional en una pieza cargada externamente. Como resultado, la necesidad de una medición de deformación precisa y estable es mayor de lo normal. Con la perforación incremental, las deformaciones medidas en los primeros incrementos de profundidad pueden ser especialmente bajas, y los errores de unas pocas microdeformaciones pueden provocar grandes errores en las tensiones calculadas para estas profundidades.

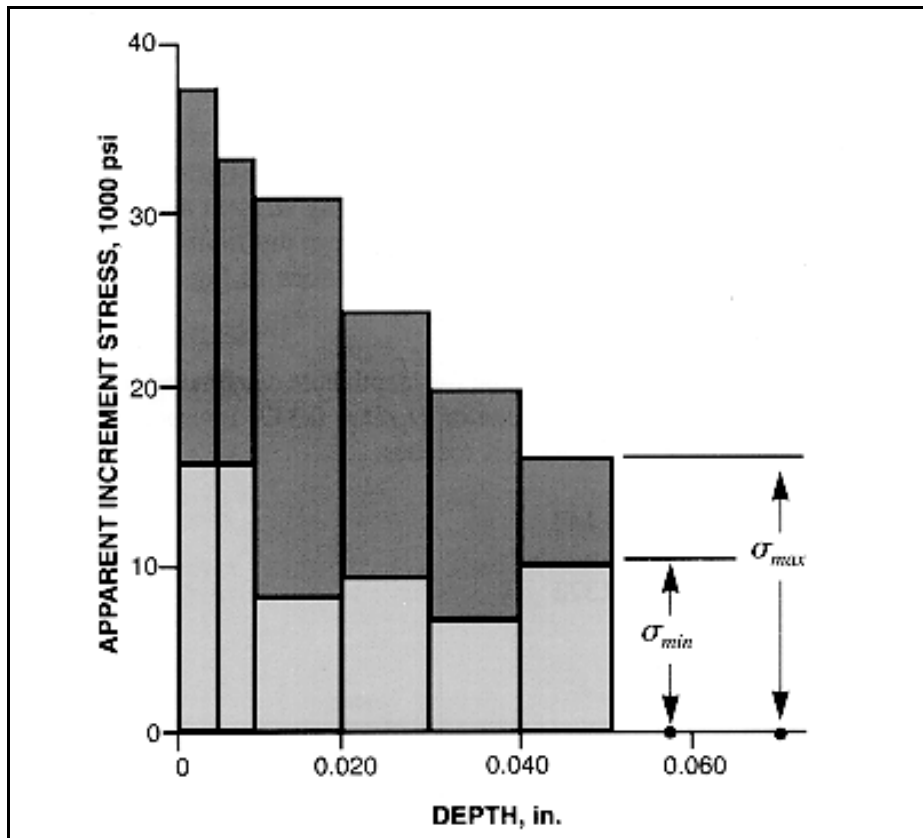


Figura 14. Tensiones aparentes en incrementos de profundidad, calculados a partir de tensiones uniformes equivalentes (ver el texto).

Aparte de lo anterior, también es necesario que se satisfagan razonablemente algunas hipótesis teóricas del método de la perforación de un agujero. En la perforación a profundidad máxima por ASTM-E837 la tensión debe ser esencialmente uniforme con la profundidad en magnitud y dirección, para obtener resultados precisos. Con los elementos finitos y otros procedimientos de investigación de la variación de la tensión en las capas subsuperficiales, se requiere solo que las direcciones de las tensiones principales no cambien de forma apreciable con la profundidad. Como para todas las medidas con rosetas de galgas extensométricas convencionales, las relaciones de adquisición de datos asumen que la tensión está uniformemente distribuida en el plano de la superficie a ensayar. Sin embargo, para las medidas de tensiones residuales es preferible que la "longitud de galga" efectiva sea el diámetro del agujero en vez de las relativamente largas de la geometría global de la roseta. Consecuentemente, las incertidumbres introducidas por los gradientes de deformación en la superficie plana son generalmente más bajas para la determinación de tensión residual que para ensayos de carga estática convencionales. Normalmente no se puede hacer ninguna generalización sobre los efectos de las distribuciones de tensión no lineales y progresivamente variables en los planos subsuperficiales a la roseta.

TABLA 1

PROFUNDIDAD		DEFORMACIÓN MEDIDA		DEFORMAC. ALIVIADAS			COEFICIENTES (los coeficientes \square y \square están multiplicados por $(10)^{-8}$)				\square	Tensión E-U a profund. Z (10^3 psi)		
Z(in)	Z/D	\square_1	\square_2	\square_3	$\square_3 - \square_1$	$\square_3 + \square_1$	\square	\square	\square	\square	\square	$\square_{min.}$	$\square_{max.}$	
0	0	\square_1	0	0	0	0	\square	----	\square	----	----	0	0	
		\square_2	0	-----	-----	-----	\square	----	\square	----				
		\square_3	0	0%	0%	05	4 \square	----	4 \square	----				
0.005	0.025	\square_1	-23	-	+9 \square	-	\square	0.016	\square	0.030	-32 \square	+16	+37	
		\square_2	-9	37 \square	\square	19 \square	\square	-	\square	-				0.051
		\square_3	-14	-----	-----	-----	4 \square	-	4 \square	-				0.204
				16%	13%	12%		0.140						
0.010	0.050	\square_1	-49	-	+18 \square	-	\square	0.036	\square	0.067	-32 \square	+16	+35	
		\square_2	-21	80 \square	\square	38 \square	\square	-	\square	-				0.113
		\square_3	-31	-----	-----	-----	4 \square	-	4 \square	-				0.453
				34%	27%	25%		0.315						
0.020	0.099	\square_1	-90	-	+35 \square	-	\square	0.078	\square	0.148	-34 \square	+12	+30	
		\square_2	-30	145 \square	\square	85 \square	\square	-	\square	-				0.250
		\square_3	-55	-----	-----	-----	4 \square	-	4 \square	-				1.000
				61%	52%	56%		0.683						
0.030	0.149	\square_1	-118	-	+50 \square	-	\square	0.111	\square	0.227	-34 \square	+11	+28	
		\square_2	-33	186 \square	\square	120 \square	\square	-	\square	-				0.384
		\square_3	-68	-----	-----	-----	4 \square	-	4 \square	-				1.535
				78%	75%	78%		0.972						
		\square_1	-136	-	+63 \square	-	\square	0.133	\square	-0282				

0.040	0.198	\square_2	-36	209 \square	\square	137 \square	\square	-	\square	-	-34 \square	+10	+26	
		\square_3	-73	\square	----- --	----- --	4 \square	-	4 \square	-				
0.050	0.248	\square_1	-143	-	+67 \square	-	\square	0.145	\square	0.328	-32 \square	+10	+24	
		\square_2	-38	219 \square	\square	143 \square	\square	-	\square	-				
		\square_3	-76	\square	----- --	----- --	4 \square	-	4 \square	-				
0.060	0.297	\square_1	-146	-	+67 \square	-	\square	----	\square	----	Más allá del rango de la figura 11			
		\square_2	-40	225 \square	\square	145 \square	\square	----	\square	----				
		\square_3	-79	\square	----- --	----- --	4 \square	----	4 \square	----				
0.081	0.40	\square_1	-152	-	+67 \square	-	\square	0.147	\square	0.374	-33 \square	+12	+25	
		\square_2	-42	237 \square	\square	153 \square	\square	-	\square	-				
		\square_3	-85	\square	----- --	----- --	4 \square	-	4 \square	-				
		\square_1					\square		\square					
		\square_2			----- --	----- --				\square				
							4 \square		4 \square					
1	2	3	a	b	c	5	6	7	8	9				
			4											

$$D_o = 0.070; E = 29.5(10)^6$$

$$D_o/D = 0.347, v = 0.291/2E = 1.69(10)^{-8}$$

$$(1+v)/(2E) = 2.19(10)^{-8}$$

Material: Acero laminado en frío

* Datos redondeados para tabulación.

BIBLIOGRAFÍA

1. "Determining residual stresses by the hole-drilling strain gage method" ASTM standard E837.
2. Mathar, J., "Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes" Trans., ASME 56, No. 4: 249-254 (1934).
3. Timoshenko, S. and J.M. Goodier, "Theory of elasticity", New York: McGraw-Hill (1951)
4. Kabiri, M., "Measurement of residual stresses by the hole drilling method: Influences of transverse sensitivity of the gages and relieved strain coefficients" Experimental mechanics 25: (252-256) (Sept. 1984).
5. Rendler, N.J. and I. Vigness, "Hole drilling strain gage method of measuring residual stresses" Proc., SESA XXIII. No. 2: 5777-586 (1966).
6. Kelsey, R.A. "Measuring non-uniform residual stresses by the hole drilling method" Proc. SESA XIV, No. 181-194 (1956).
7. Schajer, G.S., "Application of finite element calculations to residual stress measurements" Journal of engineering materials and technology 103: 157-163 (1981).
8. 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.
9. Sandifer, J.P. and G.E. Bowie, "Residual stress by blind hole method with off center hole" Experimental mechanics 18:173-179 (May 1978).
10. Procter, E. and E.M. Beaney, "Recent developments in center hole technique for residual stress measurement" Experimentation 6: 10-15 (December 1982).
11. Wang, H.C., "The alignment error of the hole drilling method" Experimental mechanics (1986).
12. Prevey, P.S., "Residual stress distributions produced by strain gage surface preparation" Proc., 1986 SEM Conference on experimental mechanics (1986).
13. Flaman, M.T., "Brief investigation of induced drilling stresses in the center hole method of residual stress measurement" Experimental mechanics 22: 26-30 (January 1982).

14. Bush, A.J. and F.J. Kromer, "Simplification of the hole drilling method of residual stress measurements" Trans., ISA 112, No. 3:249-260 (1973).
15. Bynum, J.E., "Modifications to the hole drilling technique of measuring residual stresses for improved accuracy and reproducibility" Experimental mechanics 21: 21-33 (January 1981).
16. Wnuk, S.P., "Residual stress measurements in the field using the airbrasive hole drilling method" Presented at the technical committee for strain gages, spring meeting of SESA, Dearborn, Michigan, June, 1981.
17. Delameter, W.R. and T.C. Mamaros, "Measurement of residual stresses by the hole drilling method" Sandia national laboratories report SAND-77-8006 (1977), 27pp. (NTIS).
18. Nickola, W.E., "Post yield effects on center hole residual stress measurements" Proc., 5th International congress on experimental mechanics, 126-136. Brookfield center, Connecticut: Society for experimental mechanics, 1984.
19. Nickola, W.E., "Practical subsurface residual stress evaluation by the hole drilling method" Proc., 1986 SEM Spring conference on experimental mechanics, Brookfield center, Connecticut: Society for experimental mechanics, 1986.
20. Flaman, M.T. and B.H. Manning, "Determination of residual stress variation with depth by the hole drilling method" Experimental mechanics 25: 205-207 (1985).
21. Niku-Lari, A.J. Lu and J.F. Flavenot, "Measurement of residual stress distribution by the incremental hole drilling method". Experimental mechanics 25: 175-185 (1985).
22. 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 (June 1987).
23. Schajer, G.S., "Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method" Journal of engineering materials and technology, 120, No. 4: Part I. 338-343; Part II. 344-349 (1988).

REFERENCIAS ADICIONALES

Ajovalasit, A., "Measurement of residual stresses by the hole drilling method: Influence of the hole excentricity" Journal of strain analysis 14, No. 4: 171-178 (1979).

Beaney, E.M. and E. Procter, "A critical evaluation of the centre hole technique for the measurement of residual stresses" Strain, Journal of BSSM 10, No. 1: 7-14 (1974).

Nawwar, A.M., K. MacLachman, and J. Shewchuk, "A modified hole drilling technique for determining residual stresses in thin plates" Experimental mechanics 16: 226-232 (June 1976).

Nickola, W.E., "Weld induced residual stress measurements via the hole drilling strain gage method" Presented at the winter annual meeting, ASME, New Orleans, Louisiana, December 9-14, 1984.

Witt, F., F. Lee, and W. Rider, "A comparison of residual stress measurements using blind hole, abrasive jet and trepan ring methods" Experimental techniques 7: 41-45 (February 1983).

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.

Flaman, M.T. and J.A. Herring, "SEM/ASTM Round robin residual stress measurement study - phase 1, 304 stainless steel specimen" Experimental techniques, 10, No. 5: 23-25.

Yavelak, J.J. (compiler), "Bulk zero stress standard - AISI 1018 carbon steel specimens, round robin phase 1" Experimental techniques, 9, No. 4: 38-41 (1985).