

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS TENSIONES DEBIDAS AL PESO PROPIO EN ESTRUCTURAS DE VEHÍCULOS MEDIANTE TÉCNICAS DE LIBERACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES

José Luis San Román García¹; Vicente Díaz López²; Carolina Álvarez Caldas³;
Alejandro Quesada González⁴

Depto de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III, Avenida de la Universidad nº 30. 28911 Leganés.
Madrid, España

¹Tel: +34916249185

email: jlsanro@ing.uc3m.es; ²Tel: +34916249460 email: vdiaz@ing.uc3m.es

³Tel: +34916248790

email: calvarez@ing.uc3m.es; ⁴Tel: +34916248790 email: alejandro@ing.uc3m.es

RESUMO

El peso propio de un vehículo genera sobre la estructura del mismo unas tensiones que pueden dar lugar a fallos estructurales de diversa gravedad. Estas tensiones no pueden determinarse experimentalmente mediante ensayos clásicos de determinación de tensiones, pero la importancia de conocerlas y cuantificar el daño que pueden llegar a producir es clave para la seguridad del vehículo. Dada la similitud entre el comportamiento de las tensiones anteriormente mencionadas y el de las tensiones residuales internas de una estructura, en el presente trabajo se estudia la posibilidad de aplicar la técnica de liberación de tensiones por perforación, una de las más empleadas en el estudio de tensiones residuales, para la determinación de tensiones debidas al peso propio de una estructura.

1. INTRODUCCIÓN

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 ni siquiera ha habido anteriormente) sollicitaciones o cargas externas. Los procesos de conformado son las causas más comunes de su aparición, aunque también pueden ser introducidas a lo largo de la vida de la estructura por procedimientos de instalación o montaje, por sobrecargas ocasionales, etc...

Generalmente, las tensiones residuales son perjudiciales para la estructura,

pudiendo llegar a provocar fallos estructurales (fatiga, fallo bajo cargas estáticas aparentemente inofensivas, etc...) Este aspecto se ve agravado por el hecho de que su presencia no se detecta hasta después del fallo.

Un problema similar al generado por las tensiones residuales lo encontramos en las tensiones generadas por el peso propio en una estructura de un vehículo (por ejemplo un autocar), tensiones que igualmente pueden ser el origen de fallos estructurales y no pueden determinarse experimentalmente en los ensayos clásicos,

estáticos o dinámicos, de determinación de tensiones.

La medida de tensiones residuales en objetos opacos no puede llevarse a cabo por medio de procedimientos convencionales de análisis experimental de tensiones, ya que los sensores de deformación (galgas extensométricas, capa fotoelástica, etc...) sólo pueden medir cambios ocurrido en la pieza con posterioridad a la instalación del sensor. Algunas de las técnicas desarrolladas para el estudio de tensiones residuales son destructivas, mientras que aquellas que no lo son (difracción de rayos X, ultrasonidos, electromagnetismo...) presentan serias limitaciones. La técnica moderna más ampliamente utilizada se basa en la idea de aliviar las tensiones de la pieza por medio de la perforación de un agujero, de forma que sensores estándar como las galgas extensométricas puedan medir la diferencia de tensión producida, permitiendo el cálculo de la tensión inicial.

2. OBJETIVOS

- ✓ Utilizar el método de alivio de tensiones residuales para medir aquellas tensiones que no pueden determinarse experimentalmente a través de los ensayos clásicos, como por ejemplo las debidas al peso propio de un vehículo.
- ✓ Liberar la tensión que se produce en una pieza como resultado de la aplicación de carga, tomando como ejemplo el ensayo de viga en voladizo, mediante la perforación de un agujero en la pieza y la posterior relajación de dicha tensión, obteniéndose medidas de deformación de la tensión relajada empleando técnicas extensométricas. Para ello, la tensión inducida en la pieza como resultado de la aplicación del ensayos se tratará como la tensión residual que tiene el material. De dicha tensión, dadas las características del ensayo, puede obtenerse la carga de la pieza ensayada.
- ✓ El ensayo de viga en voladizo se realizará utilizando rosetas triaxiales y

galgas uniaxiales, con la intención de comparar los resultados obtenidos en ambos casos con los resultados analíticos, intentando justificar la viabilidad de simplificar la metodología.

3. METODOLOGÍA EMPLEADA

3.1. Descripción del equipo empleado

Para llevar a cabo los ensayos se han utilizado la guía RS-200 y el sistema de adquisición de datos 5000.

La guía RS-200 es un instrumento fijo para posicionar y perforar un agujero en el centro de una roseta de forma precisa. Se apoya sobre tres tornillos ajustables con patas giratorias que facilitan la sujeción en superficies curvas y han de ser pegados a la pieza a ensayar por medio de un adhesivo especial que requiere unos 15 minutos de curado.

El alineamiento de la guía con la roseta extensométrica se logra por medio de la inserción de un microscopio que permite localizar dicho centro con un error máximo de 0,038mm. Este microscopio se utiliza también para medir el diámetro del agujero una vez perforado.

Después del alineamiento, el microscopio es sustituido por una turbina de aire de alta velocidad o por la barra de la fresadora (para perforaciones a baja velocidad como la efectuada en este caso). La guía incorpora dos piezas de diferente diámetro para la perforación: de 1,6 y de 3,2 mm.

Asimismo, la guía incorpora un micrómetro que permite controlar la variación de la profundidad del agujero practicado

El sistema de adquisición de datos 5000 está formado por diversos componentes:

- Sensores: Bandas extensométricas, rosetas, sensores, etc... que recogen la información de la pieza.
- Escáneres y tarjetas de interfaz: trans-

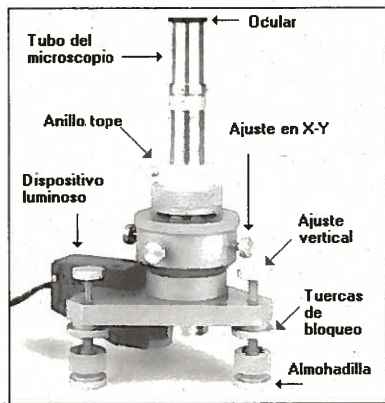


Fig 1: Montaje básico de la guía RS- 200

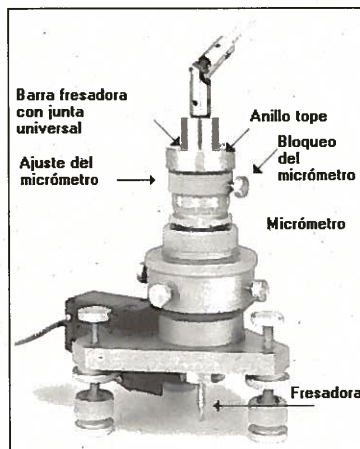


Fig 2: Guía RS- 200 con la barra fresadora instalada

forman la señal de los sensores para que pueda ser procesada por el computador.

- Microcomputador: equipo informático con suficiente capacidad para soportar el software de operación WIN5000.

3.2. Procedimiento

La metodología que se ha empleado en este trabajo es la de relajación de tensiones por medio de la perforación de un agujero. Esta técnica, destinada ante todo para aplicaciones en las que las tensiones residuales son uniformes a lo largo de la profundidad de perforación, puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Se coloca una galga extensométrica circular de tres elementos en el punto de las piezas donde se quieren determinar las tensiones residuales.

2. Se conecta la galga a un indicador de deformación estática a través de un canal de alimentación y balance.
3. Se coloca la guía de perforación de precisión sobre el punto a perforar, centrada en el círculo formado por la roseta.
4. Se colocan a cero los indicadores de las galgas y se perfora un pequeño agujero superficial en el centro de la roseta.
5. Debido a la relajación de tensiones producida por la perforación del agujero, se obtendrán unas lecturas a través de las cuales podrán obtenerse las tensiones residuales de acuerdo con las relaciones que se verán a continuación.

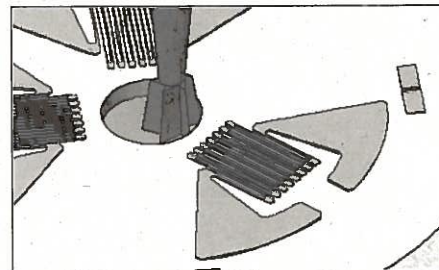


Fig 3: Perforación de un agujero en el centro de la roseta

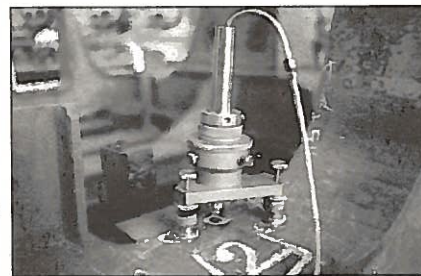


Fig 4: Guía de precisión RS- 200

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 superficie libre 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.

3.3. Fundamento teórico.

La figura 3 representa un área local del interior de una placa que está sujeta a una tensión residual uniforme σ_x antes y

después de perforar un pequeño agujero pasante en ella.

Se utilizarán para el ensayo galgas extensométricas dispuestas de la forma indicada en la figura 4.

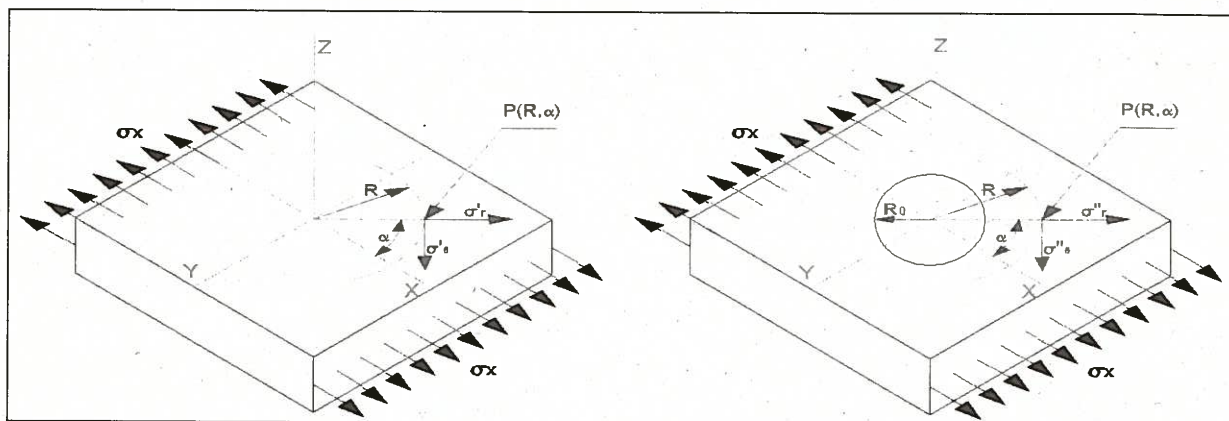


Fig 5: Estados de tensión antes y después de la perforación del agujero

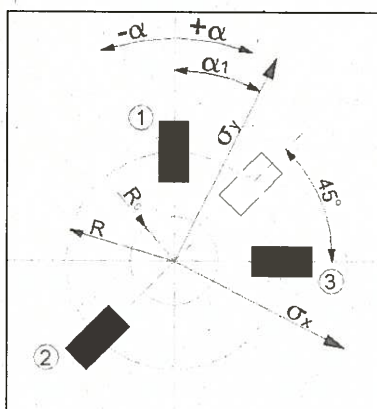


Fig 6: Disposición de la roseta de galgas extensométricas.

Las ecuaciones (1) permiten obtener las tensiones principales y su dirección en función de unos coeficientes \bar{A} y \bar{B} (o \bar{a} y \bar{b}) que deben ser determinados experimentalmente. La relación entre ambos pares de coeficientes se recoge en las ecuaciones (2).

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

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

Siendo α el ángulo que forma la galga 1 con el eje principal más cercano.

Si la tensión no es uniforme con la profundidad, los valores obtenidos podrían arrastrar un error considerable. En esos casos se calculan, para cada incremento de profundidad, las tensiones residuales equivalentes uniformes (E- U). Por definición, la tensión (E- U) es aquella que, de estar uniformemente distribuida, produciría la misma deformación aliviada total, a cualquier profundidad de perforación del agujero.

Para calcularlas debe disponerse de los coeficientes \bar{a} y \bar{b} de tensión uniforme, que han sido determinados por Schajer basándose en estudio de elementos finitos, y utilizarlos en las ecuaciones (1).

4. REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

Se ha realizado un ensayo de viga en voladizo. A pesar de que teóricamente no se trata del ensayo ideal para probar esta metodología, ya que las tensiones no están uniformemente distribuidas con la

profundidad, se ha optado por este tipo de procedimiento ya que es fácil calcular su solución teórica, lo que permite comparar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos con un valor patrón.

Dado que la flecha aplicada en cada caso sobre la viga es conocida (5 milímetros), puede calcularse la tensión equivalente de Von Mises, que será la que se utilice para validar los resultados experimentales obtenidos a profundidad máxima de perforación. La medida que se obtiene a dicha profundidad a través de la metodología expuesta anteriormente debe corresponderse con la flecha aplicada, que es la "tensión residual" que se quiere determinar.

Para la medida de las deformaciones se han utilizado rosetas triaxiales modelo EA-06-125RE-120. Dado que el diámetro del círculo formado por dichas galgas es $D = 10,26$ mm, y con el fin de mantener la relación más favorable entre dicho diámetro y el del agujero practicado ($0,3 < D_0/D < 0,5$) se ha utilizado una fresa de 1,6 mm (para garantizar que el diámetro del agujero estuviese comprendido entre 3 y 4,6)

El espesor de la pieza debía ser mayor que 1,2 veces el diámetro del círculo que

forman las galgas de la roseta, esto es, superior a 12,3 mm.

Se perforaron tres agujeros en el eje Z de la pieza a una profundidad final de 0,4 veces D, es decir, 4,1 mm. Dichas perforaciones se efectuaron de forma incremental, con el fin de obtener datos relativos a la variación de la tensión con la profundidad.

La probeta empleada y sus dimensiones pueden verse en la figura siguiente:

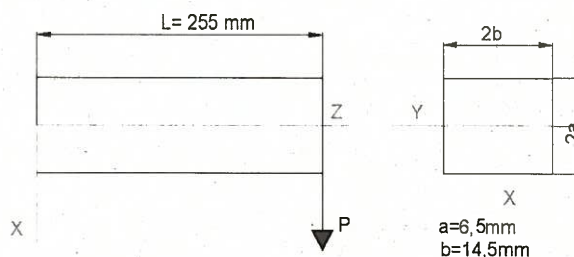


Fig 7: Dimensiones de la probeta utilizada en los ensayos

En la tabla 1 se recogen los resultados obtenidos en este ensayo, así como los valores de los parámetros para los tres puntos. Las unidades de ϵ_1, ϵ_2 y ϵ_3 son microdeformaciones (ue), las tensiones están en Pascales y la posición en el eje Z en milímetros.

Tabla 1: Resultados obtenidos en el ensayo con una roseta EA-06-125RE-120

Posición	D_0/D	\bar{a}	\bar{b}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_{equivVM}
102	0,3	0,1	0,2	33	21	8	$-7,08 \cdot 10^6$	$-1,34 \cdot 10^7$	$6,30 \cdot 10^6$
132	0,3	0,1	0,2	26	12	1	$-3,57 \cdot 10^6$	$-9,91 \cdot 10^6$	$6,33 \cdot 10^6$
202	0,3	0,1	0,2	11	15	8	$-3,31 \cdot 10^6$	$-6,18 \cdot 10^6$	$2,87 \cdot 10^6$

En segundo lugar, se han llevado a cabo los mismos ensayos utilizando bandas uniaxiales en lugar de rosetas. Los valores tensionales se han obtenido a partir de las deformaciones utilizando las ecuaciones de Lamé.

Las tablas 2 y 3 recogen los valores del ensayo uniaxial y de la resolución teórica.

Tabla 2: Resultados del ensayo con galgas uniaxiales

Posición	ϵ_1	σ_{equivVM}
102	26	$1,43 \cdot 10^6$
132	19	$1,04 \cdot 10^6$
202	5	$2,74 \cdot 10^5$

Puede comprobarse que el ensayo con roseta arroja unos resultados mucho más próximos a los teóricos que el uniaxial. Por tanto, no parece técnicamente viable la simplificación del método de medida de tensiones residuales consistente en sustituir la roseta por la galga uniaxial en casos de carga uniaxial.

Según lo expuesto en el apartado 3 y a fin de disponer de una mejor comparación entre los resultados de la roseta y los teóricos, la figura 8 recoge las tensiones residuales principales equivalentes uniformes (E-U) para los tres agujeros practicados y diferentes profundidades de perforación. Puede observarse que la tensión varía con la profundidad, por lo que los valores reflejados en la gráfica son inferiores a los valores de tensión reales a profundidad máxima. Asimismo, se ve que

los valores más próximos a la solución real son los obtenidos para el primer incremento de profundidad. Esto es así porque la deformación aliviada acumulativa en cualquier profundidad está afectada de forma compleja por las tensiones relajadas en todas las profundidades inferiores. En la tabla 4 se compararán, por tanto, las tensiones (E-U) teóricas con las obtenidas del ensayo.

Tabla 3: Comparación entre la tensión residual equivalente y la teórica

Posición	$\sigma_{equivVM}$ (Roseta)	$\sigma_{equivVM}$ (Teórica)
102	$7,31 \cdot 10^7$	$6,26 \cdot 10^7$
132	$6,87 \cdot 10^7$	$5,04 \cdot 10^7$
202	$3,46 \cdot 10^7$	$2,17 \cdot 10^7$

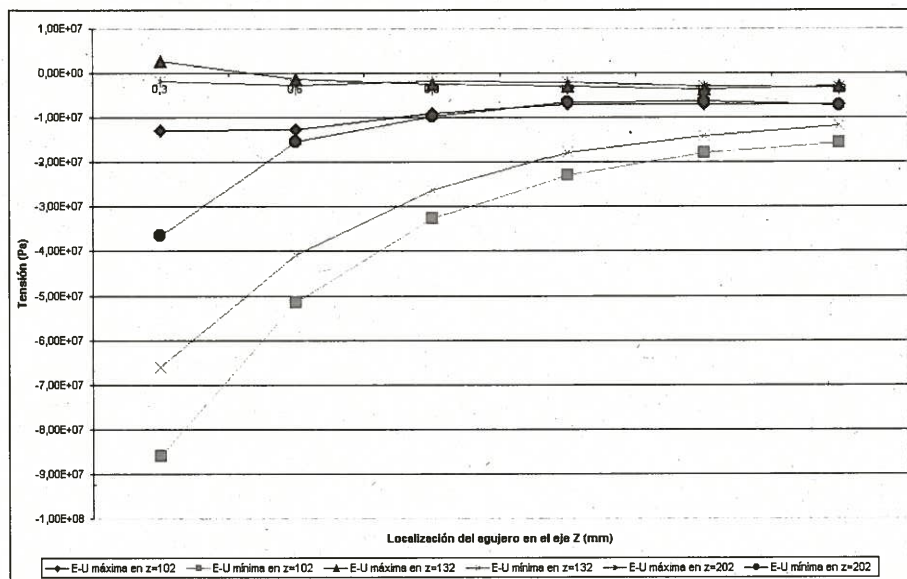


Figura 8: Tensiones residuales equivalentes máxima y mínima

5. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos:

- ✓ Se ha demostrado la necesidad del empleo de rosetas triaxiales en los ensayos, comprobándose que los resultados obtenidos por medio de galgas de extensometría eléctrica uniaxiales, en el caso de cargas uniaxiales, no son suficientemente fiables.

- ✓ Dado que en el ejemplo seleccionado la distribución de tensiones no es uniforme con la profundidad, los resultados cuantitativos no son todo lo próximos a los teóricos que cabría desear, pero se ha conseguido determinar con una fiabilidad razonable la tensión soportada por la viga por medio de métodos de medida de tensiones residuales.

- ✓ Esto permite pensar que para casos en los que la tensión sea uniforme con la profundidad la metodología arrojará mejores aproximaciones.
- ✓ Se abre por tanto una atractiva línea de desarrollos futuros encaminada a emplear el procedimiento presentado en el cálculo de tensiones que no se pueden determinar directamente, como es el caso de las debidas al peso propio de un vehículo.

6. REFERENCIAS

Designation Z 837-94a Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole- Drilling Strain Gauge Method.

Flaman, M.T; Manning, B.H: *Determination of Residual Stress Distribution by the Incremental Hole Drilling.* 1985.

Measurements Group, Inc: TN-503-5 Residual stress measurement – Measurement of Residual Stresses by the Hole- Drilling Strain Gauge Method. Measurements Group, Inc. USA. 1993.

Shajer, G.S: *Measurement of Non- Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method.* 1988.

