

Desarrollo y evolución de la mecánica de la fractura para la determinación de esfuerzos residuales (El método de respuesta de grieta, CCM)

Beatriz Romero-Ángeles¹

Arafat Molina-Ballinas²

Víctor Fernando Verduzco-Cedeño²

John Durodola³

Neil Fellows³

Omar González-Cueto⁴

¹Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional. Av. de las Granjas, núm. 682, Col. Sta. Catarina, CP 02250, México, DF. MEXICO.

²Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos', Edif. 5, 2º piso, Col. Lindavista, CP 07738, México, DF. MEXICO.

³School of Technology, Oxford Brookes University, Headington Campus, Ox30BP, Oxford. REINO UNIDO.

⁴Universidad Central 'Martha Abreu' de las Villas, Carretera a Camajuaní km 5½, CP 50100, Santa Clara. CUBA.

correo electrónico (email): romerobeatriz97@hotmail.com
yased_83@hotmail.com
verduzcomx@yahoo.com.mx
omar@uclv.edu.cu

Recibido el 19 de junio de 2010; aceptado el 29 de enero de 2011.

1. Resumen

En el área de la Ingeniería Mecánica los esfuerzos residuales juegan un papel muy importante, ya que son insidiosos con respecto a la propagación de grietas. Así como tienden fácilmente a adicionarse a diversos efectos mecánicos y promover fallas en los componentes. Sin embargo, su determinación es en cierta manera complicada. En este artículo se presenta de manera general el desarrollo y evolución del método de respuesta de grieta (*Crack Compliance Method*, CCM). El CCM es una técnica destructiva que se utiliza para la determinación de esfuerzos residuales en componentes mecánicos. Asimismo, esta metodología se fundamenta en principios de mecánica de la fractura, por medio de la determinación del factor de intensidad

de esfuerzos que se produce al introducir un corte en el componente de estudio. El desarrollo del CCM puede realizarse por medio de soluciones directas e inversas, en este trabajo se presenta el desarrollo de una nueva técnica basada en la solución inversa y por medio de un polinomio global. También se presentan las ventajas y desventajas que el CCM tiene al ser comparado con otras técnicas. Donde se concluye, que en realidad el CCM es una metodología muy potente para la determinación de esfuerzos residuales, pero dependiendo de diversos factores materiales y externos puede ser que existan mejores alternativas.

Palabras clave: esfuerzos residuales, métodos de medición, método de respuesta de grieta.

2. Abstract (Development and Evolution of Fracture Mechanics for Residual Stress Measurement, Crack Compliance Method, CCM)

In the Mechanical Engineering field the role that residual stress play is a very important one, since they are unisonous with regard to the spread of cracks. As well as, they tend to easily incorporate to diverse mechanical effects and to promote failure in the components. Nevertheless, the determination of residual stress is, in a certain manner, very complicated. In this article, it is presented a general way the development and evolution of the crack compliance method CCM. The CCM is a destructive technique that is use for the determination of residual stress in mechanical components. Likewise, this methodology is based in Fracture Mechanic principles, by means of the determination of stress intensity factor that takes place by introducing a cut into the component. The development of the CCM can be perform by the application of direct and inverse solutions, in this work it is presented the improvement of this technique by the use of a inverse solution and by means of a global polynomial development. Also, they are presented the advantages and disadvantages that the CCM has and comparisons against other methodologies are shown. In this paper is conclude, that actually the CCM is a very powerful methodology for the determination of residual stress, nevertheless, depending diverse factors of the material and externals it could be other techniques better than the CCM approach.

Key words: residual stress, measurement method, crack compliance method.

3. Introducción

En el mundo ingenieril se encuentra muy bien definida la relación existente que conllevan los esfuerzos residuales y el desarrollo de la falla [1-2]. Asimismo, la intrincada correspondencia que el deterioro del componente puede presentar la existencia de los esfuerzos residuales al conjuntarse con fatiga, fluencia, desgaste, corrosión, fractura, flexión y fricción entre otros factores (figura 1) [3]. Además, la inducción de un campo de esfuerzos residuales a menudo puede causar inestabilidad estructural, lo que tiende a ocasionar una falta de ajuste en el ensamble de componentes [4].

Probablemente, la mayor desventaja que presentan los esfuerzos residuales radica en la dificultad en determinar su magnitud y configuración, ya que existen en el material sin la aplicación de un agente externo (carga, temperatura, etc.). Sin embargo, son consecuencia de la aplicación de casi cualquiera de los procesos para la fabricación de un componente [5]. Su característica más dañina es que se pueden añadir a las cargas aplicadas y son particularmente insidiosos, ya que satisfacen el equilibrio y por lo tanto no ofrecen evidencia externa de su existencia [6]. Debido a la importante contribución de los esfuerzos residuales a incrementar la posibilidad de que el componente falle y su presencia casi universal, el conocimiento sobre los esfuerzos residuales es fundamental para cualquier estructura de ingeniería donde los factores de seguridad liberales no son prácticos [7]. Por lo que un gran esfuerzo de investigación se centra en la tarea de cuantificarlos, sin embargo, el problema es muy complejo.

El desarrollo en el estudio de los esfuerzos residuales por lo regular implica el comportamiento no lineal del material, su remoción, transformaciones de fases, ensambles mecánicos y tratamientos térmicos, lo que genera múltiples dificultades [8]. Para la mayoría de los casos de estudio donde se encuentran involucrados los esfuerzos residuales, la capacidad técnica existente es insuficiente para presentar un conocimiento adecuado sobre los esfuerzos residuales.

En este sentido, la necesidad de establecer la forma y magnitud del campo de esfuerzos residuales inducido en un material es fundamental por tres aspectos ingenieriles [9]:

- Reducir al mínimo el efecto que este tipo de esfuerzos tienen con la incentivación de fallas.
- Incrementar el desarrollo de equipo técnico para la cuantificación de los esfuerzos residuales.
- Aplicación de nuevas metodologías donde la inducción de los esfuerzos residuales incrementen la resistencia del material.

Actualmente la gran cantidad de técnicas utilizadas para la determinación de los esfuerzos residuales se dividen en tres grandes grupos (destructivos, semidestructivos y no destructivos (figura 2) [5 y 10]. Los ingenieros, industriales y científicos prefieren todo tipo de medición y análisis que no involucren la destrucción del espécimen a estudiar, en este sentido las técnicas no destructivas y semidestructivas poseen desventajas muy importantes concernientes directamente en sus capacidades de medición.

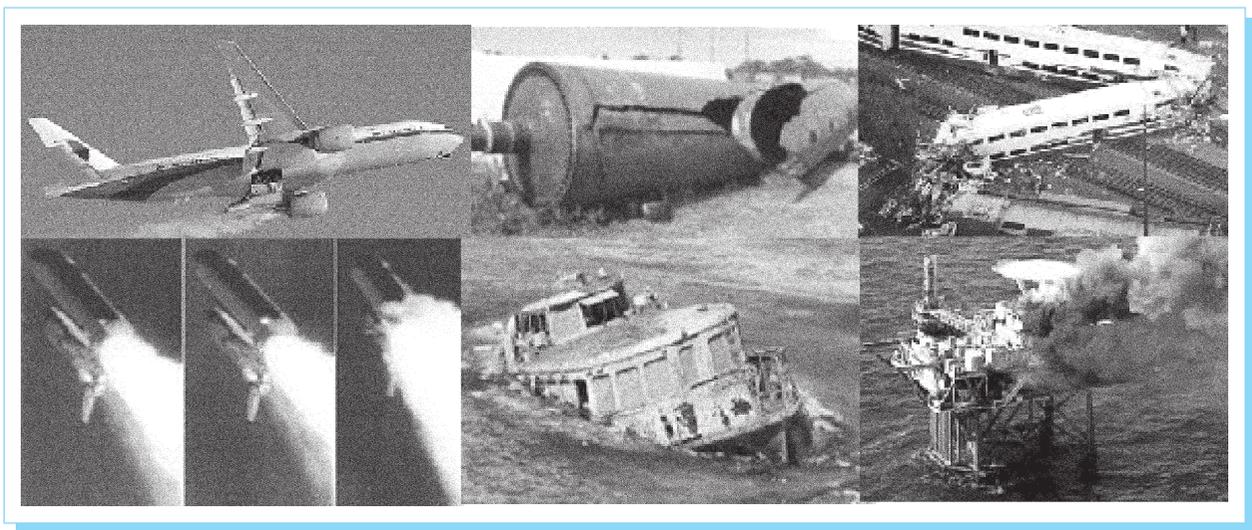


Fig. 1. Posibles fallas ocasionadas por los esfuerzos residuales.

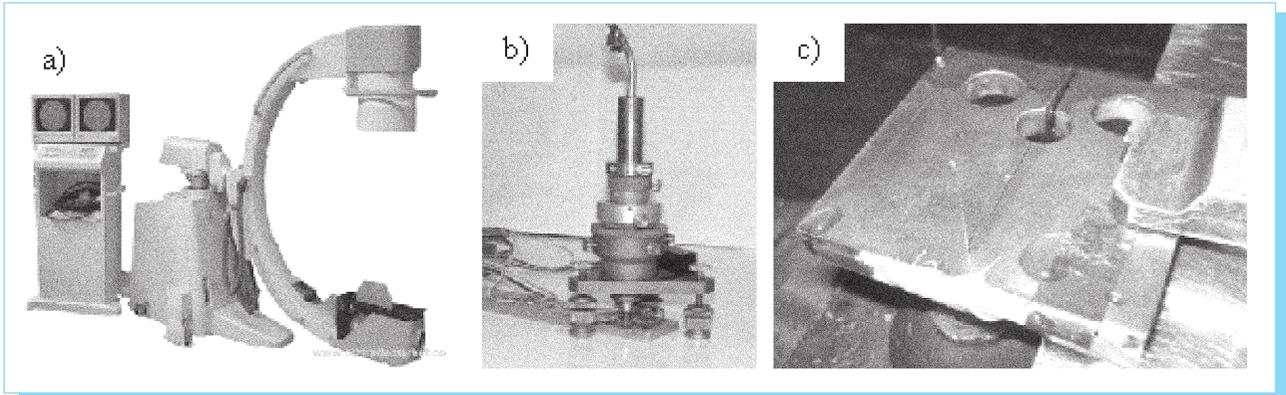


Fig. 2. Técnicas para la determinación de esfuerzos residuales: a) no destructivas, b) semidestructivas y c) destructivas.

Por ejemplo, las técnicas fundamentadas en la difracción (rayos X y neutrones) o retroesparcimiento (*Rutherford Backscattering Spectrometry*) como las que se utilizan para estudiar efectos ópticos no lineales [11 y 12], tienen una restricción en la profundidad de la medición, frecuentemente no distinguen entre discontinuidades propias del material con el efecto del campo de esfuerzos residuales, sensibilidad al tamaño de grano y textura del material, sólo se pueden aplicar a materiales cristalinos y planos, así como, largos periodos para obtener las mediciones [13]. Mientras que las metodologías semidestructivas, también carecen de la capacidad de medir a grandes profundidades y requieren de procesos de trabajo en frío para remover material e incrementar la profundidad de la medición, lo que induce o altera el campo de esfuerzos a medir [14]. Las técnicas destructivas no presentan las desventajas de las dos técnicas anteriores, tienen la capacidad de determinar esfuerzos residuales en grandes profundidades, en muy diversos materiales y no dependen de texturas o tamaño de grano en el material [8].

En este artículo se presenta una técnica destructiva basada en la teoría de la mecánica de la fractura y que puede ser aplicada para la determinación de esfuerzos residuales [15-17]. El soporte científico de la metodología que aquí se presenta es una técnica destructiva, que es capaz de medir la variación en la magnitud del campo del esfuerzo residual con respecto a la profundidad al incorporar paulatinamente una ranura o corte en una zona afectada.

La relajación del campo de esfuerzos residuales, al autoequilibrarse por la acción de la inducción del corte, produce una deformación en el material que puede ser medida por medio de galgas extensométricas y este dato es utilizado para determinar el estado original del estado de esfuerzos residuales

en el material. Por lo regular, el esfuerzo normal en el componente que se encuentra perpendicular a la dirección del desarrollo del corte es el que se determina. Asimismo, la práctica aquí utilizada es de naturaleza inversa y es conocida mundialmente como método de respuesta de grieta (*Crack Compliance Method*, CCM).

4. Evolución histórica del CCM

Los primeros intentos para introducir un corte y determinar el campo de esfuerzos residuales en un materiales se realizaron en 1964 por Schwaighofer [18], quien maquinó dos cortes en un componente y fue capaz de determinar el efecto en el campo de esfuerzos residuales en la superficie por medio de las mediciones de las deformaciones entre los cortes. Sin embargo, la realización de esta metodología no requiere de la incrementación del corte, tan sólo se realizan los cortes a cierta profundidad y se determina el esfuerzo residual en la superficie. Este primer intento no contempla en su totalidad el procedimiento del CCM como ahora lo conocemos.

En este sentido, desde el trabajo realizado por Schwaighofer, han existido un gran variedad de técnicas implementadas para la determinación de esfuerzos residuales que utilizan la introducción sucesiva de una ranura y son conocidos por muy diversos nombres, como; método de respuesta de grieta, método de corte, desarrollo de la mecánica de la fractura, método rectilíneo de ranurado, etc. [19]. Para 1985, el nombre acuñado y aceptado internacionalmente por la sociedad científica es el de método de respuesta de grieta (CCM) que fue desarrollado por Cheng y Finnie [20]. Probablemente, el nombre se debe a la respuesta que produce la introducción de una grieta (simulada) en un material con un campo de esfuerzos residuales. Sin embargo, la primera vez que se uti-

lizó originalmente como CCM fue en 1971 en un trabajo presentado por Vaidyanthan y Finnie [21]. Ellos fueron capaces de medir los esfuerzos residuales en una placa soldada por medio de la introducción de un agujero en el componente y extender el corte. Primero calcularon el factor de intensidad de esfuerzos por cada incremento en el corte y utilizaron una técnica inversa para determinar una solución cercana al campo de esfuerzos actuante en el material. La gran problemática en estos primeros intentos de utilizar el CCM fue la manera de realizar la inducción y extensión del corte, ya que se realizaba por medio de procesos de manufactura que utilizan trabajo en frío. Lo que altera el campo de esfuerzos residuales que se pretendía medir [22].

Posteriormente, surgieron adelantos tecnológicos que permitieron nuevos desarrollos y la consolidación en esta tipo de investigación, así como, grandes avances en el desarrollo del CCM [23]. Posiblemente, los dos grandes adelantos tecnológicos que más beneficiaron al CCM fue el óptimo desarrollo del maquinado por electro erosión, con lo que se garantiza la inducción y extensión del corte sin adicionar otro campo de esfuerzos residuales al ya existente. Asimismo los progresos computacionales han facilitado la solución de la problemática de la mecánica de sólidos necesaria para su aplicación en diversas geometrías [24].

Durante la evolución del CCM, claramente se ha podido observar que este método puede ser dividido en varios componentes distintos y comunes. Se incluyen estudios analíticos, experimentales y numéricos, con una variedad de diferentes y

diversas aplicaciones. Asimismo, existen ventajas y desventajas entre la exactitud, precisión y facilidad de aplicación en las variadas posibilidades de aplicación (figura 3) [25-26].

En general, desde el punto de vista analítico, existen dos componentes en el análisis del CCM que permiten su aplicación la solución directa y la solución inversa. La solución directa es la obtención de las deformaciones unitarias al incrementar la extensión del corte que se introduce en un cuerpo con un campo de esfuerzos residuales. Esta sección de la solución del CCM por lo regular se soluciona por medio de diversa teorías, como mecánica de la fractura método de elemento finito y técnicas de simulación numérica [22 y 27]. Mientras que la solución inversa se enfoca a establecer el campo de esfuerzos residuales que mejor simula al campo originalmente existente por cada incremento que se realiza de corte [8].

En cuanto al análisis experimental existen muy diversas opciones que se deben de efectuar antes de realizar el ensayo. Como primer punto se debe decir cómo se realizará el corte en el material. Aunque existen diversas maneras de hacerlo, se ha demostrado que la mejor forma es por medio de una máquina de electro erosión (EDM) (Figura 3) [28]. Una vez seleccionado el equipo de corte, es necesario determinar la manera de sujeción del componente y el instrumental a utilizar para recolectar los datos de las deformaciones unitarias al relajarse el campo de esfuerzos residuales por inducir el corte. La sujeción del componente se debe realizar con mucho cuidado, ya que se debe permitir (en lo posible) que el

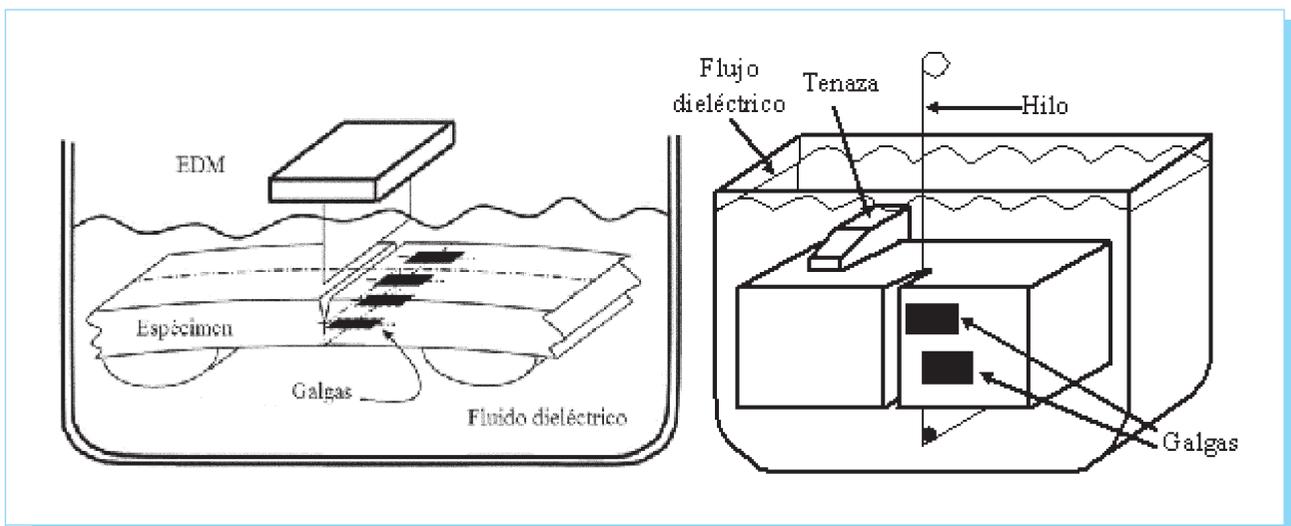


Fig. 3. Corte por medio de electroerosión EDM.

espécimen se mueva de algún modo, ya que la relajación del campo de esfuerzos residuales produce las deformaciones unitarias, así como desplazamiento del espécimen. Si al espécimen no se le permite el movimiento, las relajaciones internas no se presentarán y por consiguiente no habrán deformaciones unitarias que medir [29]. Además, en la actualidad, las galgas extensométricas siguen siendo la mejor opción. Sin embargo, queda pendiente la mejor posición en la cual se debe realizar la medición [26] (figura 4).

Los análisis y simulaciones numéricas poco a poco han cobrado gran importancia en el desarrollo de esta técnica, ya que pueden preestablecer el mejor lugar para aplicar la galga extensométrica y la óptima manera de sujetar el espécimen para obtener los datos de las deformaciones unitarias. Asimismo, la aplicación numérica puede establecer condiciones de la mecánica de la fractura como el factor de intensidad de esfuerzos, la función de respuesta y la función Z, que por medios analíticos demoran mucho tiempo. También las simulaciones numéricas, ayudan a predecir el rango de exactitud que puede tener una implementación experimental del CCM (figura 5) [8 y 26].

5. Método inverso global polinomial para la obtención de esfuerzos residuales

El método de respuesta de grieta que aquí se presenta fue desarrollado por Urriolagoitia-Sosa [8] y ha sido ampliamente aplicado en casos de estudios por parte de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco y Azcapotzalco del Instituto Politécnico Nacional. El método se fundamenta de la siguiente manera. La solución analítica que emplea el CCM sólo se puede realizar cuando se tienen las lecturas de las deformatorias relajadas que han sido obtenidas de cortar un componente con esfuerzos residuales inherentes. En general, el análisis para la determinación del campo de esfuerzos residuales por medio de los datos de las deformaciones unitarias obtenidas es realizado en dos etapas; la etapa de solución directa, seguida de la etapa de solución inversa. Estas soluciones están basadas en consideraciones lineales-isotrópicas materiales. Si se supone que la distribución de esfuerzos residuales no conocida en un componente puede ser representada por la sumatoria de una serie de orden polinomial n^{th} como:

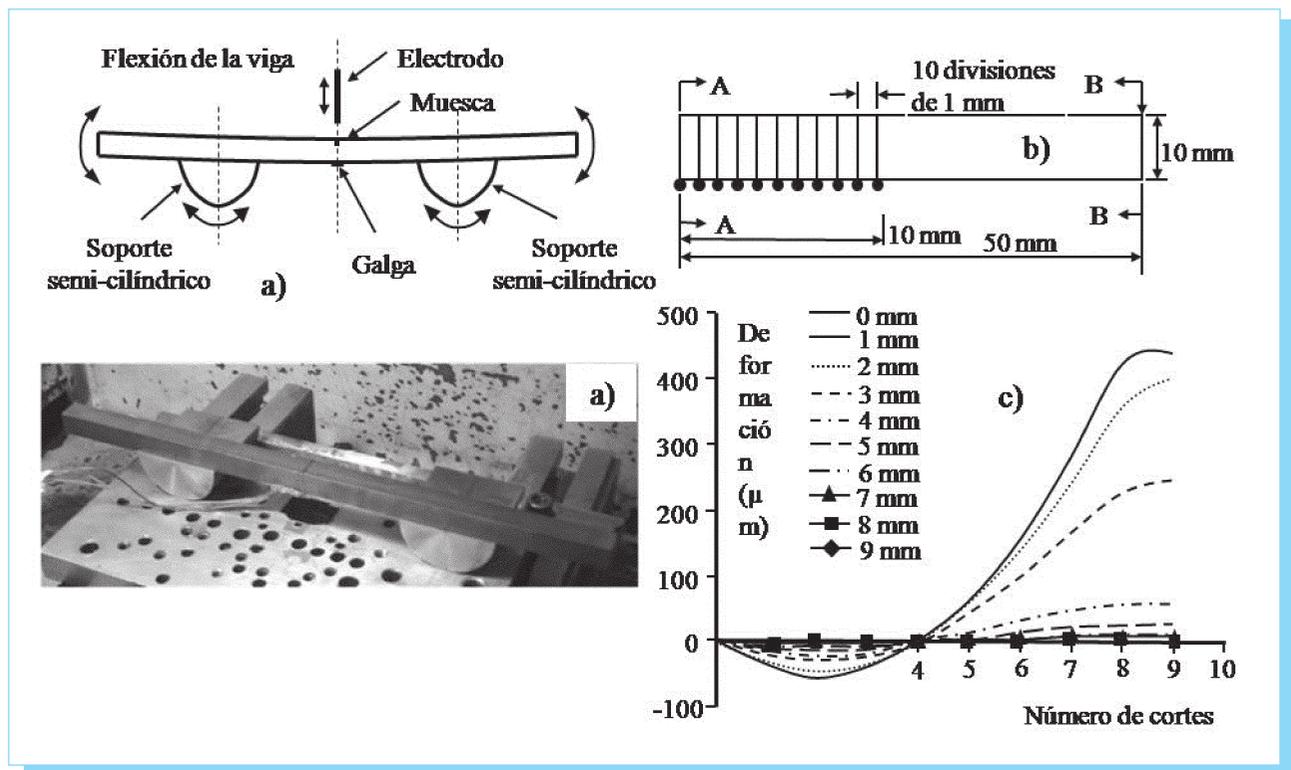


Fig. 4. Procedimiento del EDM: a) soporte de viga para libre relajación, b) ubicación de galgas y c) lectura de relajación en diversas ubicaciones.

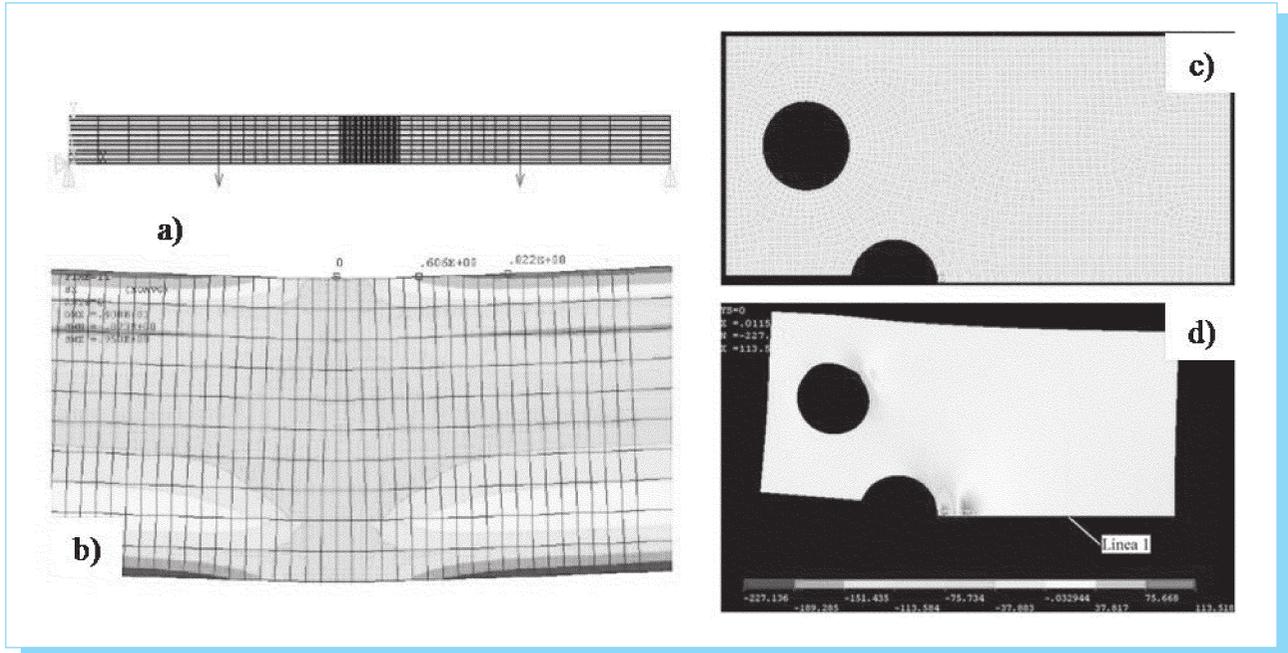


Fig. 5. Desarrollos en simulación numérica del CCM: a) viga, b) simulación de corte en viga, c) espécimen SEN modificado, d) simulación de corte en SEN modificado.

$$\sigma_y(x) = \sum_{i=0}^n A_i P_i(x) \quad (1)$$

donde A_i son los coeficientes que tiene que ser obtenidos y la P_i son series a la potencia, $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$, etc. Polinomios de Legendre también son usados para la solución. Sin embargo, el CCM incluye un paso que asumen que se conoce la distribución del campo de esfuerzos $\sigma_y(x) = P_i(x)$ que interactúa recíprocamente con la grieta. Este campo de esfuerzos no conocido es utilizado para obtener la función de respuesta de grieta C por medio del desarrollo de Castigliano. Cheng, Prime y Finnie [30] presentan el desarrollo para obtener el cambio de la energía de deformación unitaria debido a la presencia de la grieta y una fuerza virtual de apertura, como:

$$U = \frac{1}{E'} \int_0^a (K_I + K_{IF})^2 da \quad (2)$$

donde K_I es el factor de intensidad de esfuerzos debido al campo de esfuerzos conocido y K_{IF} es el factor de intensidad de esfuerzos debido a la fuerza virtual la F . Aplicando el teorema de Castigliano, el desplazamiento $u(a,s)$ puede ser determinado, derivando la energía de deformación unitaria con respecto a la fuerza virtual, como [22]:

$$u(a,s) = \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial F} \Big|_{F=0} = \frac{1}{E'} \int_0^a K_I \frac{\partial K_{IF}(a,s)}{\partial F} da \Big|_{F=0} \quad (3)$$

Diferenciando con respecto a la distancia s , la deformación unitaria en la dirección x está dada por [22]:

$$\epsilon(a_j, s) = \frac{1}{E'} \int_0^a K_I(a) \frac{\partial^2 K_{IF}(a, s)}{\partial F \partial s} da \Big|_{F=0} \quad (4)$$

La deformación unitaria $\epsilon(a,s)$ (donde a es la longitud de la grieta y s es la distancia que separa la posición de la toma de lectura y el plano de propagación del corte o grieta) debida al campo de esfuerzos $P_i(x)$, que es conocido como la función de respuesta $C_i(a_j, s)$ y está dada por:

$$C_i(a_j, s) = \frac{1}{E'} \int_0^{a_j} K_I(a) \frac{\partial^2 K_{IF}(a, s)}{\partial F \partial s} da \quad (5)$$

Debido a la linealidad de K_{IF} con F , el segundo término en la integral es el mismo que la función geométrica del componente $Z(a)$, como:

$$Z(a) = \frac{B}{F} \left[\frac{\partial K_{IF}}{\partial s} \Big|_{s=0} \right] \quad (6)$$

con $B = 1$, por lo que se puede expresar como:

$$C_i(a_j, s) = \frac{1}{E'} \int_0^{a_j} K_I(a) Z(a) da \quad (7)$$

$K_I(a)$ es el factor de intensidad de esfuerzos debido al campo de esfuerzos residual cuando la profundidad de la grieta o corte en igual a a y $K_{IF}(a)$ es el factor de intensidad de esfuerzos correspondiente a la misma profundidad de corte pero debido a un par de fuerzas virtuales F aplicada tangencialmente a la posición del componente donde se tomaran las medidas de las deformaciones unitarias durante el corte del proceso del CCM (donde la $Z(a)$ es una función de dependiente de geometría (ecuación (3)):

$$Z(a) = \frac{\partial^2 K_{IF}(a,s)}{\partial F \partial s} \quad (8)$$

Desarrollando la función de peso, $K_I(a)$ y $K_{IF}(a)$ pueden expresarse como [31]:

$$K_I(a) = \int_0^a h(x,a) \sigma_y(x) dx \quad (9)$$

$$Z(a) = 4.283 \int_0^a h(x,a)(1-2x) dx \quad (10)$$

donde $\sigma_y(x) = P_I(x)$ y $h(x,a)$ es conocida como la función de peso [32]. Así, la función $\sigma_{yF}(x)$ es el campo de esfuerzos debido a la fuerza virtual F . Una vez que se determinan las soluciones de $C_i(a,s)$ las deformaciones unitarias que se esperan debido al efecto del campo de esfuerzos residuales (ecuación 1) se pueden obtener:

$$\varepsilon(a_j,s) = \sum_{i=0}^n A_i C_i(a_j,s) \quad (11)$$

Los términos desconocidos A_i son determinados de modo que las deformaciones unitarias dadas por la ecuación 11 concuerdan con aquellas deformaciones unitarias medidas de manera experimental durante el desarrollo del corte del espécimen, esto es $\varepsilon(a_j,s)_{actual}$. Para reducir al mínimo el error promedio sobre todos los puntos de datos de la función de la deformación unitaria para una aproximación de orden n^{th} , se utiliza el método de últimas potencias cuadradas para obtener los valores de A_i . Por lo tanto el número de incrementos de cortes m es seleccionado para ser mayor que el orden del polinomio, ejemplo $m > n$. La solución del método es obtenida reduciendo al mínimo el cuadrado del error en relación con la constante A_i desconocida [33]:

$$\frac{\partial}{\partial A_i} \sum_{j=1}^m \left[\varepsilon(a_j,s)_{actual} - \sum_{k=0}^n A_k C_k(a_j,s) \right]^2 = 0 \quad (12)$$

$i = 0, \dots, n$

Esto proporciona $[H]\{A\}=\{J\}$ donde $[H]=[C]^T[C]$ and $\{J\}=[C]^T\{\varepsilon_j\}_{actual}$ [34] produciendo un conjunto lineal de soluciones simultáneas donde los valores de A_i son determina-

dos por la ecuación 1 y después son aplicadas para determinar la distribución y magnitud del campo de esfuerzos en el componente.

6. Reseña de las aplicaciones del CCM

Es a mediados de la década de los años de 1980 cuando se presenta el inicio mundial por el interés en la aplicación del CCM. A continuación se presentan algunos de los más brillantes investigadores que lo aplican alrededor del mundo [19]:

- En Estados Unidos de América: Cheng, Finnie y Prime.
- En Holanda; Ritchie.
- En el Reino Unido: Leggat, Hills, Nowell, Reid, Durodola y Fellows.
- En Alemania: Fett, Munz y Thun.
- En Corea del Sur: Kang, Song y Earmme.
- En México: Urriolagoitia-Sosa, Urriolagoitia-Calderón, Hernández-Gómez y Sandoval-Pineda.
- En Suiza: Schindler.
- En Italia: Galatolo y Laciotti.
- En Polonia: Orkisz y Skrzat.
- En China: Lai, Oh, Siew y Nee.

En esta sección se revisan algunos de las aplicaciones experimentales más importantes que se han desarrollado por el CCM. La mayoría de las aplicaciones del CCM se han desarrollado en metales comunes (aceros de alto, medio y bajo carbón, aceros inoxidables, metales biocompatibles, aleaciones de aluminio, etc.) [35-37]. Sin embargo, investigaciones divulgados por Fett [38] presentan resultados en Poli Metil Metacrilato (PMMA) y PoliCloruro de Vinilo (PVC). Mientras que Herman [39] aplicó con éxito el CCM en materiales compuestos con matriz de metal.

Con respecto a la generación del corte, en un principio la selección dependía de la geometría del espécimen, pero con el paso del tiempo la técnica más recomendada fue establecida para inducir el corte por medio de electro erosión EDM con alambre [40] o placa [8]. Sin embargo, también se han desarrollado trabajos donde se utilizaron; corte por seguetas de joyero [21], agujero por taladrado [41], corte con seguenta [10], cortadores de fresado y cortadores para pulido. Asimismo, la manera de soportar o sujetar el espécimen se basaba (y se sigue basando) en la geometría del material. No obstante la mayoría de los trabajos de investigación sujetaban o empotraban al componente [40]. En este sentido Urriolagoitia-Sosa [8, 9, 42 y 43] propone, con respecto a la geometría y con base en el desarrollo de una simulación numérica, dispositivos de sujeción diversos que permiten el libre movimiento del espécimen al relajarse el campo de esfuerzos residuales.

Durante varias décadas, los componentes que se examinan han sido inducidos con un campo de esfuerzos residuales por diferentes procesos mecánicos. Ejemplo de esto se presenta en trabajos en inducción de esfuerzos residuales en; componentes bajo cargas térmicas [44], cilindros de pared delgada soldados [45], vigas flexionadas [8], espécimen con falla por fatiga [1], piezas desarrolladas vaciadas por fundición en molde [46], piezas granalladas [27], espécimen SEN [47] y SEN modificada [42 y 43], componentes con historia previa de carga (endurecimiento por deformación y efecto Bauschinger) [48], en flechas de transmisión de potencia [49], cilindros extruidos [20], piezas con depósitos por láser [50], vías de ferrocarril y ruedas de vagones [51] y muchos más.

7. Comparación con otros métodos

En esta sección, se presenta de manera general una comparación cualitativa del CCM contra otras técnicas empleadas para la determinación de esfuerzos residuales. En este sentido Prime [19] realiza un análisis general, sin embargo Lu y colaboradores [52] presentan una comparación más en detalle. En realidad este tipo de comparación, según Prime [19], revela que no existe un método óptimo para la determinación de los esfuerzos residuales, sino que dependiendo las características del material, la geometría del componente, la forma en que los esfuerzos residuales fueron introducidos, entre otros, se deberá seleccionar el método para realizar la determinación del campo de esfuerzos actuante. Es muy similar al desarrollo de programas y teorías para la detección de fallas en componentes mecánicos, donde dependiendo del caso de estudio se deberá de aplicar la técnica que mejor acomode al caso [53].

El CCM es un método destructivo y se encuentra en desventaja contra las técnicas no-destructivas,

ya que el espécimen al serle aplicado el CCM quedará inservible para continuar con su servicio, lo que no sucede con las técnicas no-destructivas. Asimismo, el CCM tiene gran alcance en la profundidad, lo que los métodos de difracción no manejan, además que con el CCM no son desventajas los micro defectos en el componente. También es de considerar que algunos de los métodos no destructivos requieren de la aplicación de solventes o ácidos para la preparación de la superficie, no así el CCM.

En cuanto a la sensibilidad de cada una de las técnicas para determinar esfuerzos residuales, los métodos más sensibles son los mecánicos (destructivos). Los métodos destructivos son capaces de medir deformaciones de bajo nivel para determinar esfuerzos muy pequeños, pero la exactitud de estos métodos depende en el espesor del componente a analizar. Las técnicas que utilizan difracción y remoción de capas, así como las técnicas semidestructivas, no son muy sensibles ya que sólo determinan esfuerzos residuales a poca profundidad. Prime [19] desarrolla una figura donde se presentan el rango de profundidad que algunas de estas técnicas pueden alcanzar (figura 6).

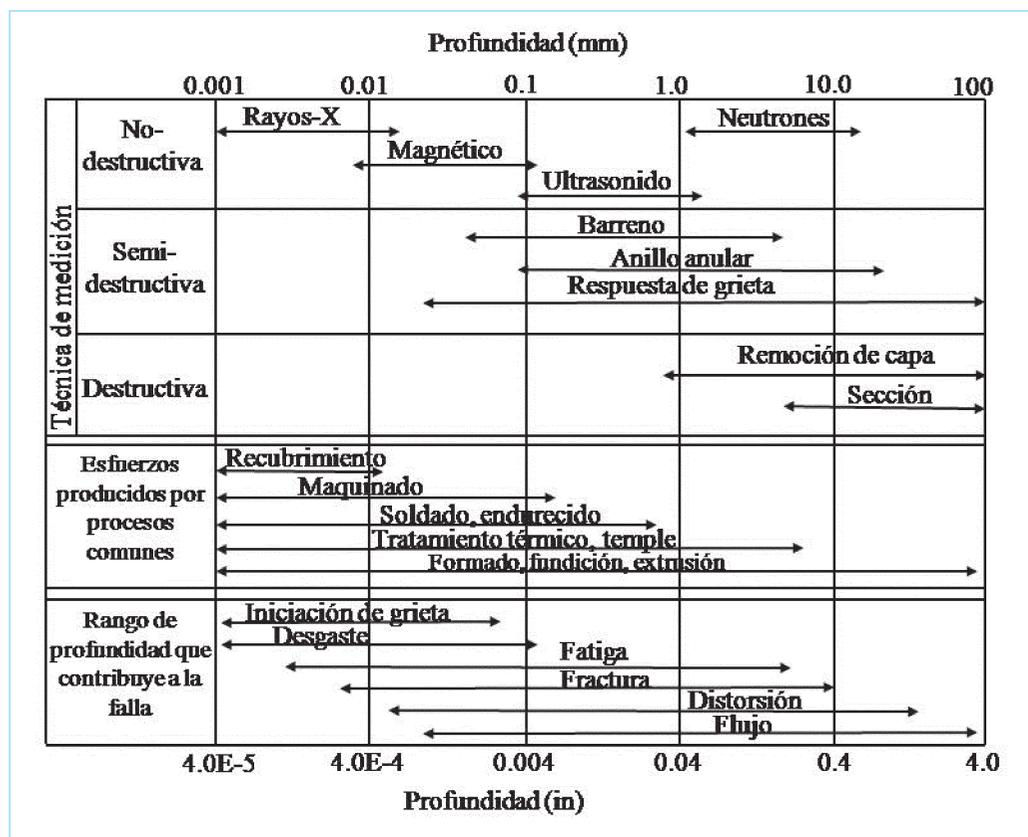


Fig. 6. Descripción de la profundidad por cada método.

En cuanto al tiempo para desarrollar cada una de las técnicas, éste dependerá de la complejidad de los procedimientos, así como las bases teóricas en las que se fundamentan. Por ejemplo, las técnicas mecánicas (semidestructivas y destructivas) dependen en su desarrollo de arreglos y montajes experimentales. Asimismo como de los equipos, herramientas y dispositivos. También es muy importante considerar la accesibilidad que se puede tener a la utilización de ciertos equipos o máquinas, por ejemplo los equipos de difracción están disponibles en un número muy reducido de universidades, ya que sus costos de adquisición y operación son muy elevados. Mientras que los procesos para determinar esfuerzos residuales de manera mecánica (semidestructivos y destructivos) se encuentran a la disposición de los investigadores en casi todos los talleres y laboratorios de los centros de educación e investigación.

simula la inducción controlada de un corte en el material como si fuera el desarrollo de una grieta en un componente, lo que produce el reacomodo del campo de esfuerzos residuales ocasionando una relajación y produciendo deformación en el material. El método de respuesta de grieta CCM, añade nuevas capacidades únicas a la corriente en el estado de técnicas para determinar esfuerzos residuales. Comparado a otros métodos destructivos, el CCM ofrece un aumento con respecto a la resolución y sensibilidad al ser comparado con casi todos los demás métodos. Otras ventajas del CCM incluyen que es una técnica de simple análisis, sencilla utilización y puede ser aplicado fácilmente con el equipo comúnmente disponible en talleres o laboratorios.

Existe evidencia, por medio de todas las investigaciones realizadas por el CCM, que todavía hay mucho espacio para

Con respecto a la exactitud del método, se reconocen una diversidad de factores que la pueden alterar. No existe una técnica que pueda considerarse como la más exacta. Por lo que probablemente no es conveniente adentrarse mucho en este tema. Sin embargo, sí es importante mencionar que la selección de la técnica considerando los puntos anteriores presentará una exactitud aceptable para el análisis.

En resumen Kandil y asociados [54] presentan una serie de tablas donde se ilustran las capacidades de cada uno de los métodos más utilizados para la determinación de esfuerzos residuales, así como una ayuda para la mejor selección de la técnica que se empleará. La tabla 1 es una de las más utilizadas en este campo científico.

8. Conclusiones

La técnica destructiva para la determinación de esfuerzos residuales que en este artículo se presenta se fundamenta en cuestiones teóricas de la mecánica de la fractura. En cierto modo es un desarrollo muy ingenioso, ya que

Tabla 1. Comparación de métodos para la evaluación de esfuerzos residuales [53]

Método	Métodos de evaluación de esfuerzos residuales									
	Tamaño del espécimen	Contacto	Destructivo	Laboratorio o portable	Disponibilidad de equipo	Velocidad	Estandarización	Costo de equipo	Costo de la medición	Nivel de experiencia requerido
Método del barreno	Estructuras, artefactos y recubrimientos	Si	Semi	Ambos	Generalizado	Rápido/medio	ASTM E837-99	Bajo	£50-200	Bajo / medio
Rayos-X	Estructuras y artefactos recubrimientos	No	No (3)		Generalmente disponible		No	Medio		Medio
Difracción de Neutrones			Artefactos	No	Laboratorio	Especialista	Medio / despacio	No	Facilidades del gobierno	£10-1500
Curvatura y remoción de capas	Estructuras y recubrimientos	Si	Si	Laboratorio	Generalmente disponible	Medio		Bajo	£50-200	Bajo / medio
Magnético	Estructuras y artefactos	No	No	Ambos	Generalmente disponible	Rapido	No	Medio	Rango exacto no está disponible	Bajo
Ultrasonido		Si					Medio	Medio		

mejorar el desarrollo de esta técnica. Por ejemplo, en el área del análisis numérico del CCM existen diversas simulaciones que se pueden realizar sobre la inducción de la grieta o corte y los efectos de éste, y así, mejorar el análisis experimental. También se encuentra un amplio campo de estudio en el fenómeno de la relajación que se produce en el cuerpo al introducir el corte. En el campo experimental, es necesario desarrollar nuevas técnicas para la obtención de datos concerniente a las deformaciones unitarias, posiblemente los equipos ópticos puedan ser una gran alternativa. Así como, desarrollar procedimiento con un mayor acercamiento a obtener esfuerzos residuales más cercanos a la superficie del componente. También se deben de desarrollar técnicas para ser aplicadas en especímenes con espesores muy pequeños y materiales no metálicos. Asimismo, la aplicación de nuevos procedimientos para introducir el corte, como lo puede ser el láser frío u otras formas de EDM. En general, los campos de avance mencionados con anterioridad, son oportunidades de crecimiento no sólo para el desarrollo del CCM, sino también para un mejor entendimiento de los efectos que producen los esfuerzos residuales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Azcapotzalco, Unidad Profesional Adolfo López Mateos y al CONACYT, por todas las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo. Asimismo al doctor E. A. Merchán-Cruz y al doctor R. G. Rodríguez-Cañizo por el apoyo técnico para el desarrollo y finalización del presente artículo.

9. Referencias

- [1] Galatolo, R., y Laciotti, A., "Fatigue Crack Propagation in Residual Stress Fields of Welded Plates", *International Journal of Fatigue*, vol. 19, núm. 1, pp. 43-49, enero, 1997.
- [2] Granda, L.E., Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., Urriolagoitia-Sosa, G., y Merchán-Cruz E. A., "Cumulative Damage Evaluation under Fatigue Loading", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 13-14, pp. 141-150, julio, 2008.
- [3] Bhadeshia, H. K. D. H., *Material factors, Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, Ed. ASTM, 2002, pp. 3-10.
- [4] Gill, S. C., y Clyne, T. W., "Investigation of Residual Stress Generation during Thermal Spraying by Continuous Curvature Measurement", *Thin Solid Films*, vol. 250, núm. 1-2, pp. 172-180, octubre, 1994.
- [5] Parlane, A. J. A., "The Determination of Residual Stresses: A Review of Contemporary Measurement Techniques", *Proc. Conf. on Residual Stresses in Welded Construction and Their Effects*, pp. 63-78, 1978.
- [6] Treuting, R. G., *The Nature, Origin and Effects of Residual Stresses*, 1952.
- [7] Masubushi, K., *Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and their Consequences*, Oxford: Pergamon Press, 1980, pp. 92-94.
- [8] Urriolagoitia-Sosa, G., "Analysis of Prior Strain History Effect on Mechanical Properties and Residual Stress in Beams", tesis (PhD), Oxford Brookes University, Reino Unido, 2005.
- [9] Urriolagoitia-Sosa, G., Molina-Ballinas A., Urriolagoitia-Caderón, G., Hernández-Gómez, L. H., y Sandoval-Pineda, J. M., "Characterization of Strain Hardening Behavior and Residual Stress Induction Used for Crack Arrest in a Biocompatible Material", *Material Research Society Symposium Proceedings*, vol. 1242, pp. 16-21, agosto, 2009.
- [10] Ruud, C. O., "A Review of Selected Nondestructive and Semi-Destructive Methods for Residual Stress Measurement", *Residual Stress Effects in Fatigue*, vol. 15, núm. 1, pp. 15-23, febrero, 1982.
- [11] Trejo-Valdez, M., Torres-Martínez, R., Peréa-López, N., Santiago-Jacinto, P. y, Torres-Torres C., "Contribution of the Two-Photon Absorption to the Third Order Nonlinearity of Au Nanoparticles Embedded in TiO₂ Films and in Ethanol Suspension", *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 114, núm. 22, pp. 10108-10113, mayo, 2010.
- [12] Torres-Torres, C., López-Suárez, A., Tamayo-Rivera, L., Rangel-Rojo, R., Crespo-Sosa, A., Alonso, J.C. y, Oliver, A., "Thermo-Optic Effect and Optical Third Order Nonlinearity in nc-Si Embedded in a Silicon-Nitride Film", *Optics Express*, vol. 16, núm. 22, pp 18390-18398, octubre, 2008.
- [13] Lu, J., James, M. y, Roy, G., *Handbook of Measurement of Residual Stress*, Lilburn (EU): Fairmont Press, 1996.
- [14] Kelsey, R. A., "Measuring Non-Uniform Residual Stresses by Hole Drilling Method", *Proceeding of the Society of Experimental Stress Annals*, vol. 14, núm. 1, pp. 181-194, 1956.
- [15] Sandoval-Pineda, J. M., "Análisis del efecto de predeformado en el comportamiento de vigas sometidas cargas cíclicas", tesis de doctorado, SEPI ESIME Zacatenco IPN, México, 2008, pp. 50-107.
- [16] Romero-Ángeles, B., "Aplicación de multicargas para el arresto de grietas", tesis de maestría, SEPI ESIME Zacatenco IPN, México, 2009, pp. 114-127.
- [17] Molina-Ballinas A., "Evaluación y determinación experimental-numérica del endurecimiento por deformación y el efecto Bauschinger en las propiedades mecánicas

- de una acero inoxidable”, tesis de maestría, SEPIESIME Azcapotzalco IPN, México, 2010, pp. 43-74.
- [18] Schwaighofer, J., “Determination of Residual Stresses on the Surface of Structural Parts”, *Experimental Mechanics*, vol. 4, núm. 2, pp. 54-56, 1964.
- [19] Prime, M. B., “Residual Stress Measurement by Successive Extension of a Slot: The Crack Compliance Method”, *Applied Mechanics Reviews*, vol. 52, núm. 2, pp. 75-96, 1999.
- [20] Cheng, W. y, Finnie, I., “A Method for Measurement of Axisymmetric Residual Stresses in Circumferentially Welded Thin-Walled Cylinders”, *Journal of Engineering Material Technology*, vol. 107, pp. 181-185, julio, 1985.
- [21] Vaidyanathan, S. y Finnie, I., “Determination of Residual Stresses from Stress Intensity Factor Measurements”, *Journal of Basic Engineering*, vol. 93, pp. 242-246, 1971.
- [22] Cheng, W., y Finnie, I., “An Overview of the Crack Compliance Method for Residual Stress Measurement”, *Proceedings Fourth International Conference in Residual Stress, Society for Experimental Mechanics*, pp. 449-458, 1994.
- [23] Urriolagoitia-Sosa, G., Durodola, J. F. y, Fellows, N. A., “Effect of Strain Hardening on the Residual Stress Distribution in Beams Measured by using the Crack Compliance Method”, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 42, núm. 2, pp. 115-121, 2007.
- [24] Urriolagoitia-Sosa, G., Urriolagoitia-Calderón, G., Hernández-Gómez, L. H., Romero-Ángeles, B., Torres-Torres, C., Rodríguez-Martínez, R., “Evaluación numérica del proceso de granallado y determinación del campo de esfuerzos residuales por medio del método de respuesta de grieta”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 26, núm. 3, pp. 203-206, julio-septiembre, 2010.
- [25] Urriolagoitia-Sosa, G., Sandoval-Pineda, J. M., Merchán-Cruz, E. A., Rodríguez-Cañizo, R.G., Urriolagoitia-Calderón, G., Hernández-Gómez, L. H., Rodríguez-Martínez, R. y, Torres-Martínez, R., “Experimental Application of the Crack Compliance Method in Beams with Hardened Surface”, *Revista Mexicana de Física S*, vol. 55, núm. 1, pp. 30-33, mayo, 2009.
- [26] Sandoval-Pineda, J. M., Urriolagoitia-Sosa, G., Urriolagoitia-Calderón, G., Hernández-Gómez, L. H., García-Lira, J., Beltrán-Fernández, J. A. y, Rodríguez-Martínez, R., “Numerical and Experimental Evaluation and the Influence Zone Due to Application of the Crack Compliance Method”, *Journal of Physics, Conference Series*, Vol. 181, pp 1-8, 2009.
- [27] Urriolagoitia-Sosa, G., Zaldivar-Gonzalez, E., Sandoval-Pineda, J. M. y, García-Lira, J., “Assessment of the Crack Compliance Method and the Introduction of Residual Stresses by Shot Peening Using the Finite Element Method”, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 15, pp. 109-114, agosto, 2009.
- [28] Prime, M. B., “Plasticity Effects in Incremental Slitting Measurement of Residual Stresses”, *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, núm. 10, pp. 1552-1566, julio, 2010.
- [29] Urriolagoitia-Sosa, G., Urriolagoitia-Calderón, G., Sandoval-Pineda, J. M., Hernández-Gómez, L. H., Merchán-Cruz, E. A., Rodríguez-Cañizo, R. G. y Beltrán-Fernández, J. A., “Residual Stresses in Beams (with and without Prior History) Numerical Assessed by the Crack Compliance Method”, *Strain*, vol. 47, suplemento s1, pp. e595-e604, junio, 2011.
- [30] Cheng, W., Prime, M. B., y Finnie, I., “Measurements of Residual Stresses through the Thickness of a Strip Using the Crack Compliance Method, Residual Stress III—Science and Technology”, *Proceedings 3rd International Conference of Residual Stress*, vol. 2, pp. 1127-1132, 1997.
- [31] Schindler, H. J., Cheng, W. y Finnie, I., “Experimental Determination of Stress Intensity Factors due to Residual Stresses”, *Journal of Experimental Mechanics*, vol. 37, núm. 3, pp. 272-277, 1997.
- [32] Wu, X. R., y Carlsson, A. J., *Weight Function and Stress Intensity Factor Solutions*, Oxford (Reino Unido): Pergamon Press, 1991.
- [33] Cheng, W., y Finnie, I., “The Crack Compliance Method for Residual Stresses Measurements”, *Welding in the World*, vol. 28, núms. 5-6, pp. 103-110, 1990.
- [34] Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., y Vetterling, W. T., *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, 1987.
- [35] Jones, K. W., y Dunn, M. L., “Fatigue Crack Growth through a Residual Stress Field Introduced by Plastic Beam Bending”, *Journal Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 31, núm. 10, pp. 863-875, 2008.
- [36] Nervi, S., Szabó, B. A., y Young, K. A., “Prediction of Distortion of Airframe Components Made from Aluminum Plates”, *AIAA Journal*, vol. 47, núm. 7, pp. 1635-1641, 2009.
- [37] Prime, M. B., Prantil, V. C., Rangaswamy, P., y Garcia, F. P., “Residual Stress Measurement and Prediction in a Hardened Steel Ring”, *Materials Science Forum*, vols. 347-349, pp. 223-228, 2000.
- [38] Fett, T., y Thun, G., “Residual Stresses in PVC-Cylinders Determined with the Weight Function Method”, *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, vol. 55, núm. 5, pp 859-863, 1996.
- [39] Hermann, R., “Crack Growth and Residuals Stress in Al-Li Metal Matrix Composites under Far-Field Cyclic Compression”, *Journal of Material Science*, vol. 30, núm. 15, pp. 3782-3790, 1995.

- [40] Nowell, D., Hills, D. A., y Tochilin, S., "Use of the Crack Compliance Method for the Measurement of Residual Stress", *Proceedings of the Sixth International Conference on Residual Stresses*, pp. 845-852, 2000.
- [41] Soete, W., y Van-Crombrugge, R., "Determination of Residual Stresses below the Surface", *Residual Stresses in Metals and Metal Construction*, Reinhold Publishers, vol. 8, núm. 1, pp. 17-28, 1954.
- [42] Urriolagoitia-Sosa, G., Romero-Ángeles, B., Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., Beltrán-Fernández, J. A., y Torres-Torres, C., "Evaluation of the Impact of Residual Stresses in Crack Initiation with the Application of the Crack Compliance Method; Part I, Numerical Analysis", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 24-25, pp. 253-259, 2010.
- [43] Urriolagoitia-Sosa, G., Romero-Ángeles, B., Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., Beltrán-Fernández, J. A., y Torres-Torres, C., "Evaluation of the Impact of Residual Stresses in Crack Initiation with the Application of the Crack Compliance Method; Part II, Experimental Analysis", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 24-25, pp. 261-263, 2010.
- [44] Perl, M., y Aroné, "An Axisymmetric Stress Release Method for Measuring the Autofrettage Level in Thick Walled; Part I and II", *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 116, pp. 384-395, 1994.
- [45] Cheng, W., y Finnie, I., "A Method for Measurement of Axisymmetric Residual Stresses in Circumferentially Welded Thin Walled Cylinders", *Journal of Engineering Materials Technology*, vol. 107, pp. 181-185, 1985.
- [46] Cheng, W., y Finnie, I., *An experimental method for determining residual stresses in welds, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes*, Ed. The Minerals, Metals and Materials Society, 1991.
- [47] Bucci, R.J., "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Rate Measurements", *Fracture Mechanics; Thirteenth Conference, ASTM STP 743*, Ed. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 28-47, 1981.
- [48] Urriolagoitia-Sosa, G., Durodola, J. F., y Fellows, N. A., "Determination of Residual Stress in Beams under Bauschinger Effect Using Surface Strain Measurements", *Strain*, vol. 39, núm. 4, pp. 177-185, 2003.
- [49] Cheng, W., y Finnie, I., "The Single Slice Method for Measurement of Axisymmetric Residual Stresses in Solid Rods of Hollow Cylinders in the Region of Plane Strain", *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 120, pp. 170-176, 1998.
- [50] Finnie, S., Cheng, W., Finnie, I., Drezet, J. M., y Gremaud, M., "The Computation and Measurement of Residual Stresses in Laser Deposited Layers", *Proceeding Four European Conference Residual Stress*, Francia, vol. 1, pp. 183-192, 1996.
- [51] Joerms, M. W., "Calculation of Residual Stresses in Railroad Rails and Wheels from Saw Cut Displacement", *Residual Stress in Design; Process and Material Selection, Proceedings ASM's Conference on Residual Stress*, pp. 205-209, 1987.
- [52] Lu, J., James, M., y Roy, G., *Handbook of measurement of residual stress*, Ed. Fairmont Press, 1996.
- [53] Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., Urriolagoitia-Sosa, G., Sandoval-Pineda, J. M., Merchán-Cruz, E. A., y Guardado-García, J. F., "Assessment of the Structural Integrity of Cracked Cylindrical Geometries Applying the EVTUBAG Program", *Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad de Zulia*, vol. 32 núm. 3, pp. 190-199, 2009.
- [54] Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, T. A., y Grant, P. V., "A Review of Residual Stress Measurements Methods: A Guide to Techniques Selection", *Project CPM 4.5, Measurement of residual stress in components, NPL Report MAT(A) 04*, Feb, 2001.

DOAJ

Directory of Open Access Journals

20% of peer-reviewed articles are now freely available

<http://www.doaj.org>