

EFFECTO DE LAS TENSIONES RESIDUALES SOBRE LAS PRESTACIONES DE DIVERSOS COMPONENTES

A. M. IRISARRI

INASMET – TECNALIA
Mikeletegi P. 2 20009 SAN SEBASTIÁN
E-mail airisar@inasmets.es

RESUMEN

En el presente trabajo se analizan brevemente diversos métodos utilizados para la medida de las tensiones residuales, centrándose principalmente en dos de ellos. El primero, difracción de rayos X, posee un carácter no destructivo por lo que es posible su aplicación sobre componentes sin requerir éstos ninguna reparación posterior. Sin embargo, cuenta con el inconveniente de que, por la técnica convencional, sólo permite valorar las tensiones residuales existentes en la superficie de los mismos. El segundo (taladro de un agujero ciego) ofrece la ventaja de permitir una valoración de las tensiones en una mayor profundidad pero induce un cierto daño en la pieza que precisa ser reparada, antes de poder volver a servicio, aunque generalmente esta reparación es sencilla. Finalmente, se exponen tres ejemplos de la aplicación de estas técnicas para la medida de las tensiones residuales en tres componentes reales.

ABSTRACT

This paper briefly analyses various methods used for the measurement of the residual stresses, mainly centred in two of them. The first one, X –Ray diffraction, possesses the advantage of its non destructive character, allowing to use it directly on the components, without requiring them any repair. However, it has the counterpart that, using the conventional technique, only allows to evaluate the residual stresses on the surface of the components. The second one (blind hole drilling) offers the advantage of allowing to evaluate the stresses deeper but induces a certain damage on the part, obliging to repair it before the part could be back in service, even if usually this repair is easily carried out. Finally, three examples of the use of these techniques for the measurement of residual stresses on real components are illustrated.

ÁREAS TEMÁTICAS PROPUESTAS: Aplicaciones Prácticas en Ingeniería

PALABRAS CLAVE: Tensiones residuales, Determinación, Prestaciones en servicio.

1. INTRODUCCIÓN

Las tensiones residuales suelen definirse como aquellas tensiones que permanecen en el núcleo de un cuerpo cuando no se aplica ninguna fuerza externa (incluida la gravedad) u otras fuentes de tensiones residuales tales como un gradiente térmico [1] Aunque es sobradamente conocido, conviene recalcar que en un cuerpo en reposo la consecución del equilibrio supone que la fuerza y el momento resultantes deben ser nulos. Es decir, la existencia de tensiones de tracción en una zona obliga a que otra parte del mismo se halle necesariamente solicitada a compresión y viceversa. Por tanto, cuando se elimina una capa de material que poseía una tensión residual de un signo el cuerpo deja de hallarse en equilibrio y se produce una distorsión.

Aunque, como el mismo señala en uno de sus artículos, la idea de generar una compresión en

la superficie de las piezas de acero para mejorar sus prestaciones es probablemente tan vieja como el propio acero, fue Almen [2] el primero en ofrecer a principio de los años 40 del pasado siglo una explicación razonada de la razón por la que se producía esta mejora. Muchos siglos antes los herreros y espaderos tras de forjar el producto a su forma lo martilleaban fuertemente al objeto de incrementar su resistencia pero ésta era una operación basada en un conocimiento totalmente empírico. Almen sugirió que puesto que los fallos por fatiga se generan únicamente por las tensiones de tracción la aplicación de tensiones de compresión disminuirá el nivel de aquéllas,, mejorando las prestaciones a fatiga del componente. Por otra parte, recalco que la consecución de una superficie de las piezas con un acabado excelente puede conducir a una falsa sensación de seguridad puesto que el proceso de retificado empleado para ello puede provocar la aparición de tensiones residuales de tracción,

lo que disminuye la vida a fatiga de la pieza. Por el contrario, un granallado de la superficie pese a ofrecer un acabado rugoso, menos atractivo, mejora el comportamiento frente a la fatiga. En su honor, la unidad de intensidad de granallado recibe el nombre de Almen.

Las tensiones residuales pueden dividirse en dos grandes grupos, macro y micro tensiones, pudiendo hallarse ambos presentes al mismo tiempo. Las macro tensiones, que a menudo se denominan tensiones Tipo I, varían dentro del material de la pieza a lo largo de una distancia mucho mayor que el tamaño de grano. Por el contrario, el origen de las micro tensiones se debe buscar en diferencias en la microestructura del material. A su vez estas tensiones suelen ser divididas en dos grupos; Tipo II y Tipo III. Las tensiones residuales Tipo II varían en la escala de un grano. Las de Tipo III corresponden a las tensiones generadas a nivel atómico, surgiendo dentro de un grano como consecuencia de la presencia de las dislocaciones u otros defectos cristalinos [3]. Estas micro tensiones a menudo tienen su origen en la presencia de diferentes fases o constituyentes en un material

Prácticamente todos los procesos de fabricación (moldeo, conformado, soldadura, tratamiento térmico o superficial, o mecanizado) introducen tensiones residuales en el componente, sea éste metálico o no, con el consiguiente efecto sobre sus prestaciones en servicio, mejorándolas en el caso de que las tensiones sean de compresión o empeorándolas cuando las tensiones generadas son de tracción. A la vista de este comentario es evidente que las tensiones residuales no deben ser consideradas únicamente como un parámetro dependiente del proceso de producción sino que constituyen un factor sobre el cual es posible actuar para conseguir una mejora del producto.

Pese a este indiscutible efecto de las tensiones residuales su medida no ha recibido la atención que merece, produciéndose, desgraciadamente, aún muchos fallos por haber tenido únicamente en cuenta las tensiones aplicadas. Por otro lado, es cierto que algunos códigos de construcción las incluyen en el cálculo de la máxima tensión que puede soportar un equipo pero en ausencia de una medida fiable de las mismas las valoran de una forma conservadora, obligando a utilizar componentes más robustos que los que serían realmente necesarios.

2. INFLUENCIA DE LAS TENSIONES RESIDUALES SOBRE LA VIDA EN SERVICIO DE LOS COMPONENTES.

Además de sobre la fatiga, ya comentada, las tensiones residuales ejercen un efecto sobre la resistencia frente a la corrosión bajo tensión, la adhesión de los recubrimientos al sustrato, la fricción, el desgaste, la estabilidad dimensional o la resistencia a tracción [1]. No obstante, en el presente trabajo tan sólo se analiza brevemente su influencia sobre la fatiga y la corrosión bajo tensión.

El diagrama de Goodman de la figura 1 ayuda a comprender el efecto de las tensiones residuales sobre las prestaciones a fatiga del componente. Cuando éste no presenta ningún tipo de tensión residual la curva que delimita una cierta vida a fatiga viene dada por la parábola de Gerber que se halla representada en la figura. Por tanto, si la tensión media aplicada es σ_{M0} , podrá soportar como máximo una tensión alternada de σ_{A0} . Si en el proceso de fabricación del componente se ha generado una tensión residual de tracción σ_R , la tensión media que realmente soporta la pieza será $\sigma_{MT} = \sigma_{M0} + \sigma_R$ con lo que se reduce la máxima tensión hasta un valor σ_{AT} . Cuando la tensión residual σ_R es de compresión la tensión media se reduce a $\sigma_{MC} = \sigma_{M0} - \sigma_R$ y la tensión alternada se incrementa hasta σ_{AC} .

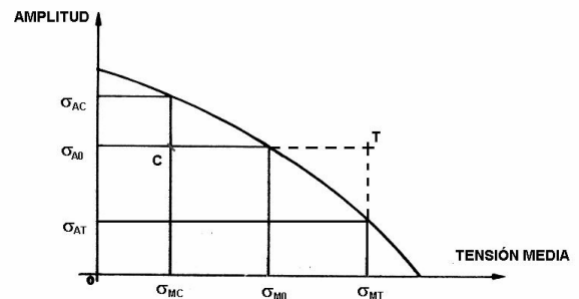


Figura 1. Efecto de las tensiones residuales sobre la vida a fatiga de un componente.

En el supuesto de que se mantuviera la misma tensión alternada la presencia de una tensión residual de tracción conduciría a que la parábola de Gerber de la figura no es la que delimita la vida a fatiga del componente sino aquella otra que pasa por el punto T, correspondiente a una vida menor. Por el contrario, cuando la tensión residual es de compresión será la parábola que pasa por el punto C la correspondiente a la vida (mayor) a fatiga del componente. Es evidente, por tanto, que las tensiones residuales ejercen un notable efecto sobre la vida a fatiga de los componentes.

Sin entrar en detalles conviene recordar que la aparición de un fallo por corrosión bajo tensión exige la presencia de tres factores; un material susceptible al ataque, un medio corrosivo y una tensión. Es precisamente en este último factor donde entran en juego las tensiones residuales puesto que se superponen a las aplicadas. No es raro el observar fallos por este mecanismo en piezas que no tenían ninguna tensión exterior aplicada pero presentaban un elevado nivel de tensiones residuales como consecuencia de su proceso de fabricación. Una vez más, el efecto de las tensiones residuales depende de su signo, acelerando el fallo las de tracción y retrasándolo las de compresión.

3. MÉTODOS DE MEDIDA DE LAS TENSIONES RESIDUALES

No es el objetivo del presente trabajo entrar a detallar los distintos métodos de medida de las tensiones residuales. En la referencia [4] puede hallarse una sucinta descripción de algunos de ellos así como un criterio para la selección del más adecuado para unas necesidades concretas. En las referencias [3], [5] y [6] se ofrece mayor detalle de los diferentes métodos.

Un factor a ser tenido muy en cuenta a la hora de optar por una técnica concreta es el carácter destructivo o no de la misma. En el supuesto de que el componente deba retornar al servicio en el supuesto de una valoración favorable, no es posible usar un método que provoque un daño irreparable a la pieza. El grado de accesibilidad del equipo a los puntos donde se desea medir las tensiones es otro factor a considerar. Cuando la geometría del componente no permite el acceso a la zona concreta en que se desea llevar a cabo las medidas puede ser necesario seccionarlo pero teniendo la seguridad de que este corte no provoque un cambio en la tensión a medir. Es evidente que en este caso el componente queda destruido por lo que este método es aplicable solamente para conocer el estado de otros que han sido fabricados en las mismas condiciones.

Finalmente, la posibilidad de desplazar a campo el equipo puede ser un factor determinante a la hora de seleccionar un método de medida puesto que en ocasiones se requiere efectuar la medida sobre una parte que no puede ser desmontada de la instalación para trasladarla al laboratorio. Sin llegar a este extremo la selección de un equipo relativamente fácil de transportar representa una ventaja si las medidas se deben realizar sobre piezas de grandes dimensiones de manipulación dificultosa.

En este punto tan sólo se comentan brevemente los métodos del taladro del agujero ciego y la difracción de rayos X que han sido los utilizados en los casos prácticos que se comentan en este trabajo. Existe una segunda razón que justifica centrarse en estos métodos. Una encuesta realizada entre las empresas del Reino Unido [7] los señala como los dos más ampliamente utilizados.

Se debe señalar que todos los métodos miden la deformación y no la tensión, obteniéndose ésta mediante cálculo a partir de las deformaciones medidas en un mínimo de dos direcciones y, en general, un máximo de nueve. Debe evitarse el medir la deformación en una única dirección salvo que razones geométricas o económicas aconsejen lo contrario [4]. En el supuesto de que sólo se mida una componente de la deformación (deformación uniaxial) se debe recalcar que este único valor del vector no constituirá la base para calcular la tensión.

Los diferentes métodos de medida se pueden clasificar en función de los tipos de tensiones que son capaces de medir o de que su carácter sea destructivo o no. También en función de la capacidad de trasladar a campo o no el equipo o del coste que suponen tanto el propio equipo como las medidas que se realizan pero las dos señaladas son las más habituales y son las que se utilizarán en el presente trabajo.

Desde el punto de vista de la capacidad de medida de los distintos tipos de tensiones, la mayoría de las técnicas posibilitan la medida de las tensiones residuales macroscópicas (las de Tipo I) pero sólo la difracción de rayos X o de neutrones, el sincrotrón que produce rayos X de alta energía o la piezo-espectroscopía Raman poseen la resolución necesaria para la medida de las micro - tensiones (Tipos II y III) que se generan en el la microestructura del material [3]. En el lado opuesto aquellos métodos que se basan en la eliminación de material remueven un volumen del mismo tan grande que las micro - tensiones que pudieran existir se compensan entre sí dando una resultante nula. Por tanto, no se pueden determinar las tensiones de los Tipos II y III por estos métodos.

Respecto al carácter destructivo o no de cada una de las técnicas resulta evidente que aquellas que implican eliminar material tienen carácter destructivo o, cuando menos, semidestructivo. La pieza analizada queda inservible o debe ser sometida a una reparación con el riesgo en este último caso de que en la operación se generen nuevas tensiones o se altere la microestructura, por lo que es preciso cuidar el proceso.

Sin embargo, aquellos métodos basados en la difracción (rayos X, sincrotrón, neutrones) y los magnéticos o ultrasónicos tienen un carácter no destructivo. La excepción a esta regla se halla en la difracción de rayos X cuando se acompaña de la eliminación de capas sucesivas de material para poder determinar las tensiones a una mayor profundidad.

El método de taladrado de un agujero ciego requiere el taladrar un pequeño orificio de una profundidad aproximadamente igual al diámetro de la broca utilizada para el taladrado. Por tanto, supone la eliminación de una pequeña porción de material poseyendo un carácter destructivo o, en el caso de reparar el daño, semidestructivo. La eliminación de material tensionado conduce a un alivio de la deformación en el adyacente y es la medida de esta deformación la que permite el cálculo de las tensiones que poseía la pieza antes de proceder al taladrado. La medida de la deformación se efectúa mediante una roseta de tres galgas extensométricas dispuestas alrededor del orificio. El método se halla normalizado en ASTM [8], aunque esta metodología se halla actualmente sometida a un cierto criticismo y únicamente se recomienda para medidas básicas donde el campo de tensiones es esencialmente uniforme [3]. Se han propuesto otros métodos de análisis para el cálculo de la distribución de las tensiones residuales en campos no uniformes en que la metodología propuesta por la norma no se puede aplicar estrictamente pero aún no han sido incluidos en la norma [9]

Entre las ventajas del método del taladro del agujero se han señalado el ser rápido, simple, ampliamente disponible, portátil, poder usarse en una gran variedad de materiales (metálicos, plásticos y cerámicos) y el permitir la medida de las tensiones en componentes de gran espesor mediante el taladro de un agujero profundo. A ello hay que añadir el bajo coste del equipo y el limitado nivel de conocimientos requerido para su empleo. No debe sorprender, por tanto, que éste sea el método más extensamente utilizado [7]. En el lado contrario se hallan la dificultad para interpretar los datos, su carácter destructivo o, cuando menos, semidestructivo, la limitada sensibilidad y resolución de la deformación y las incertidumbres asociadas a las dimensiones del agujero, rugosidad de la superficie, planitud y preparación de la muestra [3].

El segundo método más utilizado, de acuerdo con la mencionada encuesta [7] es la difracción de rayos X. Presenta respecto al anterior las ventajas de poseer un carácter no destructivo y permitir la medida tanto de las macro como de

las micro – tensiones. El mayor inconveniente se halla en la restricción de las medidas, por la técnica convencional a la superficie de la pieza, aunque esta limitación es relativa en la mayoría de las situaciones puesto que la totalidad de los fallos producidos por corrosión bajo tensión y la mayor parte de los de fatiga tienen su origen en la periferia del componente por lo que el interés se centra en conocer el estado tensional en esa zona. En el caso de requerirse una medida en mayor profundidad hay que recurrir al uso del sincrotrón, de la difracción de neutrones o a la eliminación de capas y realización de medidas sucesivas, calculando las tensiones realmente existentes en el punto antes de que se produjera la eliminación de material. Los dos primeros métodos, además de resultar notablemente más caros que un difractor de rayos X, tienen el inconveniente de que los equipos no pueden ser desplazados a campo. Por su parte la valoración de las tensiones por el método de eliminación de capas no se puede considerar sencilla.

Aunque la difracción de rayos X se puede usar en principio en cualquier material cristalino sea metálico o cerámico surgen dificultades cuando el material posee un tamaño de grano grande, una textura muy acusada o en el constituyente minoritario de un material con microestructura bifásica (por ejemplo la medida de tensiones en la fase beta de las aleaciones de titanio alfa – beta es casi imposible).

Sin entrar en detalles conviene señalar que el método se basa en la medida del parámetro de red cristalina mediante la ley de Bragg. Cuando el material presenta tensiones (deformaciones) residuales se produce una distorsión de la red y el parámetro varía. Una comparación entre los valores de este parámetro de red en el material libre de tensiones y tensionado permite calcular la deformación sufrida y a partir de ella, el valor de la tensión residual. Es evidente que para lograr una medida precisa de esta tensión se debe establecer la comparación con un material totalmente libre de tensiones, utilizándose para ello material en polvo. En la referencia [5] se puede hallar una descripción detallada de esta técnica así como de la metodología propuesta para solventar las dificultades en algunos casos y las ecuaciones que permiten obtener la tensión a partir de la medida del parámetro de red. En la práctica el programa de ordenador incorporado al equipo efectúa este cálculo.

4. CASOS PRÁCTICOS

En este apartado se analizan algunos casos en que se midieron las tensiones residuales para explicar algunos resultados anómalos, mejorar

las prestaciones de un componente o ahorrarse una operación costosa y compleja. El primero de ellos corresponde a un conjunto de probetas de fatiga de una aleación base níquel en las cuales se había provocado distintos niveles de daño. Estas probetas se ensayaron con control por deformación a dos temperaturas; 300 y 600° C. Los ensayos realizados a la temperatura más alta condujeron al resultado esperado de que un mayor daño provoca una disminución de la vida a fatiga. Sin embargo, en los efectuados a 300° C no se observó un efecto apreciable del daño sobre la vida a fatiga hasta que aquél adquirió una magnitud considerable. Aún más, el examen de las probetas puso de manifiesto que el inicio del fallo se había producido en una zona alejada de la entalla, introducida en la probeta con el fin de simular el daño de servicio.

La observación de las superficies de fractura en el microscopio electrónico de barrido reveló que el origen de la rotura se hallaba en los ángulos redondeados de las probetas y se asoció con la presencia de carburos de niobio, de titanio y niobio y, en menor medida, partículas con un alto contenido en hierro que fueron identificadas como fases de Laves. Ante la posibilidad de que existiera una mayor concentración de estas fases en la zona donde se situó el inicio del fallo que pudiera haberlo promovido se decidió efectuar un estudio metalográfico. Este estudio demostró que la distribución de estas fases era homogénea en todo el material, no existiendo una mayor concentración en los puntos de origen por lo que no justificaba la localización del mismo. Otra comprobación que se llevó a cabo fue la relativa al alineamiento de las probetas en la máquina de ensayos. Caso de haber sido éste defectuoso se hubieran generado tensiones de flexión, con la consiguiente influencia negativa sobre la vida a fatiga. Se pudo comprobar que el alineamiento era correcto por lo que esta posibilidad debía de ser también descartada.

El hecho de que las probetas ensayadas a mayor temperatura no mostraran la misma tendencia llevó a pensar en la posibilidad de que la causa se hallara en las tensiones de mecanizado. A la temperatura más alta éstas podían aliviarse por la acción térmica pero cuando los ensayos de fatiga se realizaban a la temperatura más baja no se llegaba a aliviar dichas tensiones. Se debe hacer constar que las probetas fueron tan sólo mecanizadas sin ser sometidas a ningún pulido posterior. Por ello se realizó una medida de las tensiones residuales de varias probetas mediante difracción de rayos X en un punto alejado de la rotura, obteniendo valores de tracción muy altos (superiores a la mitad del límite elástico a 300° C). La superposición de esta tensión residual y

la aplicada en el ensayo aceleraban el fallo. Así y todo restaba el explicar la razón por la cual la concentración de tensiones que debía provocar la entalla no era suficiente para que el origen del fallo se localizara en ese punto.

Desgraciadamente no fue posible efectuar una medida de la tensión residual existente en el fondo de la entalla pero si se pudo constatar que su extremo no era tan agudo como se suponía sino que se hallaba bastante redondeado con lo que el factor de concentración de tensiones no sería tan elevado como el esperado. Por otra parte, una medida de las tensiones residuales existentes a una mayor profundidad reveló que éstas se hacían nulas e incluso pasaban a ser de compresión. A la vista de estos resultados se consideró que la entalla provocaba un alivio de las elevadas tensiones residuales de tracción del mecanizado. Esto supone que la tensión en otros en el fondo de la entalla y el origen del fallo pasa a situarse en esos puntos. A la temperatura más alta, al producirse un alivio de las tensiones de mecanizado por el calentamiento que sufre la probeta la concentración de tensiones que se genera en el fondo de la entalla es suficiente para que el fallo se produzca en ese punto.

El segundo caso práctico es el referente a unos cuadros de bicicleta. La enorme competencia en este sector lleva a la necesidad de fabricar cuadros más ligeros, resistentes y con adecuada rigidez pero sin olvidar, a su vez, que tengan un precio razonable. Ello condujo a la elección de las aleaciones de aluminio de alta resistencia pero que en este caso, contrariamente a lo que sucede en la industria aeronáutica incluyen soldaduras en el proceso de fabricación. No es necesario señalar que las soldaduras constituyen una de las principales fuentes de generación de tensiones residuales y que habitualmente el fallo de los componentes soldados se inicia en los puntos donde existe una alta tensión residual de tracción. Por tanto, una mejora de la vida a fatiga de los cuadros debe pasar lógicamente por la ausencia de defectos en las uniones soldadas pero sin olvidar la influencia de estas tensiones. Si se lograra disminuir las tensiones de tracción de la unión en estado bruto de soldadura o, lo que sería muchísimo mejor, transformar estas tensiones de tracción en otras de compresión se habría logrado una notable mejora en la calidad de los cuadros, consolidando la posición de la empresa en el mercado.

En estado bruto de soldadura las uniones poseen las esperadas tensiones residuales de tracción que ejercen un efecto negativo sobre la vida a fatiga de los cuadros. La vida a fatiga en estas condiciones es bastante pobre aunque rebase el

nivel mínimo exigido. El pulido y limado de las juntas mejora las prestaciones elevando la vida a fatiga en más de seis veces la conseguida con el material en estado bruto. Una mejora similar se consigue con la aplicación del granallado (shot peening) pero cuando se consigue la máxima mejora es cuando las juntas soldadas son pulidas y limadas antes de proceder al granallado. En este caso la mejora se cifra en nada menos que veinte veces como media y quince veces en el peor de los casos. La medida de las tensiones residuales en la unión soldada reveló que éstas eran de compresión en la periferia de toda ella (metal aportado, zonas afectadas y tubos de las aleaciones base). Al restarse esta tensión de las aplicadas en servicio la tensión total que soporta realmente la junta resulte más baja y la vida a fatiga, consecuentemente, más larga.

En el tercer ejemplo práctico la preocupación máxima no se hallaba en el comportamiento frente a la fatiga del equipo sino en garantizar que ofrecería la adecuada resistencia frente a la corrosión bajo tensión. Se trataba de uniones circunferenciales entre tubos de gran espesor de un acero resistente a la fluencia tipo P22 con un inoxidable austenítico estabilizado con niobio del tipo AISI 347. El metal de aporte usado fue lógicamente también inoxidable. El problema surge por las dificultades de dar un tratamiento post-soldadura adecuado a esta junta. En el caso de elegir los parámetros óptimos para el primero se podría producir una indeseada precipitación de carburos de cromo en el inoxidable, con el riesgo de que perdiera este carácter. Si se opta por aplicar el tratamiento aconsejado para el inoxidable el acero resistente a la fluencia se vería negativamente afectado. Además, no se debe olvidar que la aplicación de un tratamiento térmico consume tiempo y dinero.

La geometría del tubo soldado no permitía el acceso a la zona de raíz de la junta, aquella donde pudieran surgir problemas. Ello obligó a cortar una apreciable longitud de tubería para evitar que estos cortes estuvieran próximos a la unión soldada y a seccionar el trozo cortado en cuatro sectores de 90° cada uno. Las medidas de las tensiones residuales se efectuaron, primero por difracción de rayos X y posteriormente por el método del taladro del agujero ciego en el punto medio de estos cortes. Los valores fueron muy similares en ambos casos, la que otorga fiabilidad a las medidas. El único riesgo se halla en el posible alivio de tensiones al efectuar el corte. Sin embargo, las medidas realizadas en el la superficie exterior del tubo (cara de la unión)

antes y después del corte fueron prácticamente coincidentes. Ello apunta a que no se produjo ningún alivio apreciable de tensión en el corte, otorgando validez a los valores registrados. En el metal depositado y la zona afectada de la raíz de la junta se midieron tensiones de tracción pero los niveles de la misma fueron considerados aceptables por la ingeniería permitiendo evitar la aplicación del tratamiento post-soldadura con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero.

REFERENCIAS

- [1] Lu J. *Handbook on Residual Stresses. Volume I.* Society for Experimental Mechanics, Inc., pag. XIII - XXIV, 2005
- [2] Almen J. O. *Peened Surfaces Improve Endurance of Machine Parts.* Metal Progress, February, pag. 209 – 215, 1943.
- [3] Kandil F. A., Lord J. D., Fry A. T y Grant P. *A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection* NPL Report MATC(A)04, February 2001.
- [4] Walker D. *Residual Stress Measurements Techniques* Advanced Materials & Processes. August, pag. 30 – 33.
- [5] *Handbook of Measurement of Residual Stresses.* Society for Experimental Mechanics, Inc., 1996.
- [6] Borland D. W. *Residual Stress Measurement – Methods, Limitations and Significance. Quality Control and Assurance in Advanced Surface Engineering.* Inst. Of Materials, pag. 113 – 125, 1997.
- [7] Kandil F. A., Lord J. D., Mummery P. y Webster G. A. *U. K. Needs for Residual Stress Measurements.* NPL Report CMMT(D) 177, December 1998.
- [8] ASTM E837-99 *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method.* ASTM Annual Book of Standards.
- [9] Petrucci G y Zuccarello B. *A New Calculation Procedure for Non-uniform Residual Stress Analysis by the Hole-Drilling Method.* Journal of Strain Analysis Vol. 33. N° 1, pag. 27-37, 1998.