

DETERMINACION DE TENSIONES RESIDUALES EN DISCOS SOMETIDOS A GRANDES GRADIENTES TERMICOS DURANTE EL SERVICIO

César Luengo, Alberto Cardona, José Risso

*Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC-INTEC).
CONICET – Universidad Nacional del Litoral
Giemes 3450, (3000) Santa Fe, Argentina, acardona@intec.unl.edu.ar,
<http://www.cimec.org.ar>*

Palabras claves: tensiones residuales, termomecánica, métodos experimentales, máquinas térmicas.

Resumen. Existen componentes de máquinas térmicas que durante el servicio están sometidos a gradientes térmicos de magnitud suficiente para provocar la aparición de tensiones residuales importantes cuando son enfriados hasta la temperatura ambiente. Una situación similar se presenta a menudo en piezas obtenidas a través de procesos de fabricación que involucran fusión o solidificación localizada de material (soldadura, aportes por plasma, etc), donde las dilataciones o contracciones diferenciales producen deformaciones plásticas en el material que se traducen en esquemas de tensiones residuales de considerable magnitud.

En ciertos casos, si analizamos las piezas a temperatura ambiente podemos encontrar un patrón de tensiones residuales de signo opuesto a las que se generarían por la acción de los gradientes térmicos durante el funcionamiento, y que por lo tanto puede reducir las tensiones efectivas que se presentan cuando la máquina se encuentra operando. La determinación de la magnitud de dichas tensiones residuales es importante para conocer la aptitud de las piezas para el servicio al que serán sometidas, sobre todo en elementos vitales para el funcionamiento de equipos, sujetos a cargas térmicas importantes y esfuerzos mecánicos severos.

Los métodos utilizados habitualmente para determinar tensiones residuales (Difracción de Rayos X, Ruido de Barkhausen, “Hole Drilling”) requieren de instrumental y técnicas experimentales que no son habituales en la industria metalmeccánica. En este trabajo se propone un método para determinar el valor de dichas tensiones residuales en piezas axisimétricas, utilizando instrumental de metrología dimensional de uso corriente en la industria de autopartes, en conjunto con software de cálculo numérico.

1 INTRODUCCION

En la construcción de máquinas térmicas, existen numerosas piezas con geometría de revolución, que durante el servicio son sometidas a gradientes de temperatura tales que si se realiza un simple análisis termomecánico considerando el coeficiente de dilatación del material y la distribución de temperaturas usualmente aceptada para estos componentes, se obtienen como resultado tensiones circunferenciales muy elevadas.

No obstante, la experiencia indica que solo en casos excepcionales (asociados a la presencia de gradientes térmicos aun mayores) se producen roturas debidos a tensiones circunferenciales. Por lo tanto es de esperar que las tensiones durante el servicio sean inferiores a las calculadas en ese análisis básico.

Uno de los motivos que podría derivar en la reducción de las tensiones circunferenciales presentes durante el servicio es la existencia de un campo de tensiones iniciales (tensiones circunferenciales residuales) de signo opuesto de modo que la combinación de ambos campos de tensiones derive en tensiones circunferenciales efectivas de valor más reducido.

Los métodos utilizados habitualmente para determinar tensiones residuales requieren de instrumental y técnicas experimentales que no son habituales en la industria metalmeccánica.

Las técnicas de difracción de rayos X (XRD) (Prevey and Mason, 2004) o difracción de neutrones (ND) (Roy et al., 2005) son utilizadas para determinar tensiones residuales en la proximidad de la superficie de las piezas. Requieren equipamiento sofisticado y entrenamiento específico de los operadores.

Similares consideraciones merece el análisis de tensiones residuales mediante el ruido de Barkhausen (H.Allison and R. Hendricks, 1998, Lindgren and Lepisto, 2002).

El método de perforado o "Hole drilling" (Schaejer, 1998a, 1988b) posee inconvenientes similares; además de ser costoso, es un procedimiento complicado que necesita equipos especiales. La determinación de las deformaciones se lleva a cabo mediante rosetas de galgas extensométricas o procedimientos ópticos (Viotti and Kaufmann, 2004, Min et al., 2006). Una vez halladas las deformaciones, pueden determinarse las tensiones analíticamente en caso de geometrías sencillas (por ejemplo: placas) o con la ayuda de métodos numéricos en geometrías más complicadas.

Por esta razón el interés de este trabajo es diseñar un método basado en herramientas e instrumentos de uso corriente en la industria (cortadora metalográfica, rectificadora, máquina de medición por coordenadas) que nos permita determinar las tensiones residuales.

La hipótesis principal en la que basamos este estudio, es la presencia de tensiones residuales de componente principal circunferencial luego de haber sometido a la pieza a una cierta cantidad de horas de funcionamiento normal. Se supone que parte de estas tensiones provienen del proceso de fabricación (gradientes de temperatura, aporte localizado de metales, etc); mientras que el resto se debe a deformaciones inelásticas (presumiblemente de naturaleza viscoplástica) generadas durante la primer etapa de servicio de la pieza. Por otra parte las tensiones residuales radiales y axiales se presumen despreciables.

En la sección 2, se describe el método propuesto para la determinación de las tensiones residuales. La sección 3 detalla su aplicación a un componente de un motor de combustión interna. Por último, la sección 4 enumera las principales conclusiones de este trabajo.

2 DESCRIPCION DEL METODO

2.1 Presentación

Una técnica ampliamente difundida para la determinación de tensiones residuales se basa en evaluar la respuesta (deformación) de la pieza frente a perturbaciones geométricas producidas por acción mecánica (remoción de material). Posteriormente se analizan esas deformaciones para determinar el estado tensional (tensión residual) que les dio origen. Un ejemplo de este tipo de técnicas es el método de “Hole drilling”.

El esquema propuesto para este análisis se basa en determinar las deformaciones que se producen al perturbar mediante operaciones de mecanizado (remoción de capas concéntricas) el estado tensional presente en el material, y reproducir esas deformaciones mediante la aplicación de cargas térmicas en un modelo de elementos finitos.

Si asumimos que las tensiones residuales son producidas por un campo de deformaciones inelásticas ϵ^{plas} , el objetivo es encontrar un campo de deformaciones térmicas ϵ^{term} que genere el mismo estado tensional, de modo de aproximar la respuesta de la pieza frente a las perturbaciones producidas por los sucesivos mecanizados.

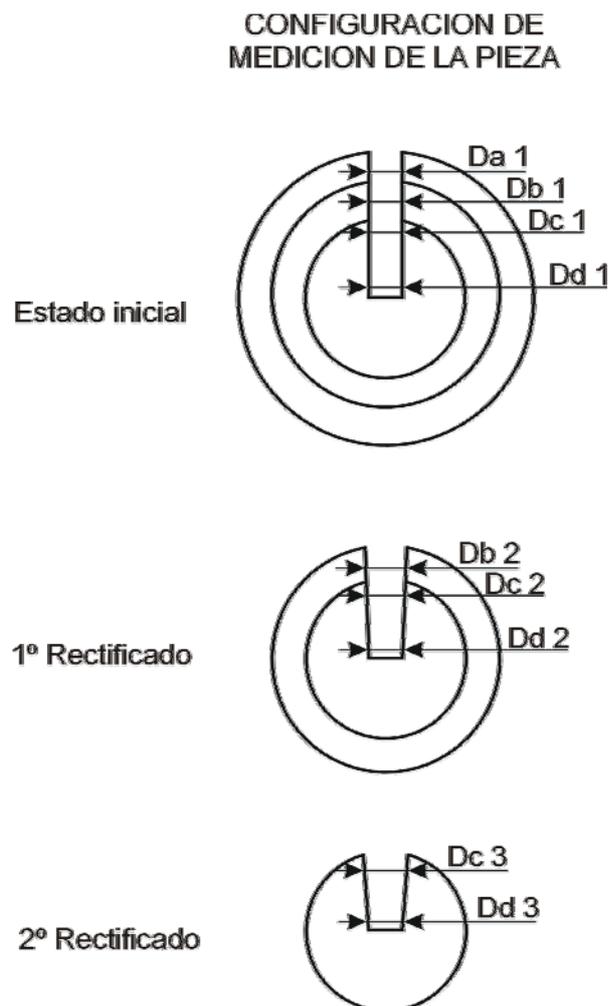


Figura 1: Puntos de medición y capas mecanizadas

2.2 Mecanizado y medición de deformaciones

El primer paso en el proceso de medición es realizar una ranura radial en la pieza. De este modo, se cambia la configuración geométrica permitiendo que los desplazamientos resultantes de las siguientes perturbaciones sean de magnitud suficiente como para ser medidos en una máquina industrial de medición por coordenadas (CMM).

En esa configuración (pieza ranurada) se procede a medir el ancho de la ranura en una serie de radios predeterminados $Da1$, $Db1$, etc (ver figura 1).

Posteriormente se realiza un rectificado exterior de la pieza eliminando una capa de material, y se vuelve a medir el ancho de la ranura en la serie de radios predeterminados, registrando la variación que se produce al eliminar la nueva capa ($Db2$, $Dc2$, etc).

Este proceso de eliminación de capas y medición de variación en el ancho de ranuras se repite hasta llegar a un diámetro reducido.

La figura 2 muestra la distribución de puntos de medición y la secuencia de capas eliminadas por rectificado en una sección diametral de un modelo genérico.

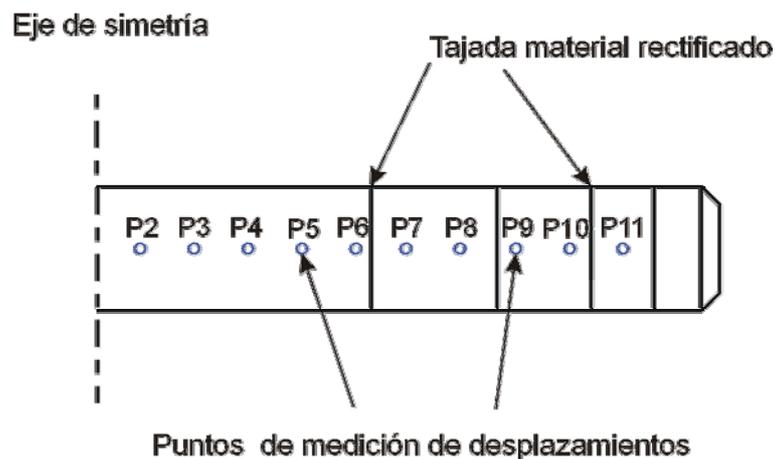


Figura 2: Distribución de puntos de medición

Debemos tener en cuenta que pueden existir errores en el proceso de medición (posicionamiento de la pieza luego de cada rectificado exterior, perturbaciones por vibraciones, etc.). Por lo tanto, es conveniente realizar un suavizado de los datos para asegurar su consistencia y evitar que esos errores de medición distorsionen los resultados del análisis.

2.3 Modelo numérico

Para realizar los análisis se construyeron modelos de elementos finitos, con diferentes capas que representan los sectores de material que fueron eliminándose mediante la operación de rectificado.

Teniendo en cuenta que los desplazamientos son de pequeña magnitud, y el comportamiento del material es elástico, se toma como configuración inicial (no deformada) la correspondiente a la última etapa de mecanizado, intentando reproducir con el agregado de cada capa de material una deformación opuesta a la generada por la remoción de dicha capa durante el rectificado.

La figura 3 muestra la secuencia de la operación de ajuste de deformaciones por imposición de temperaturas.

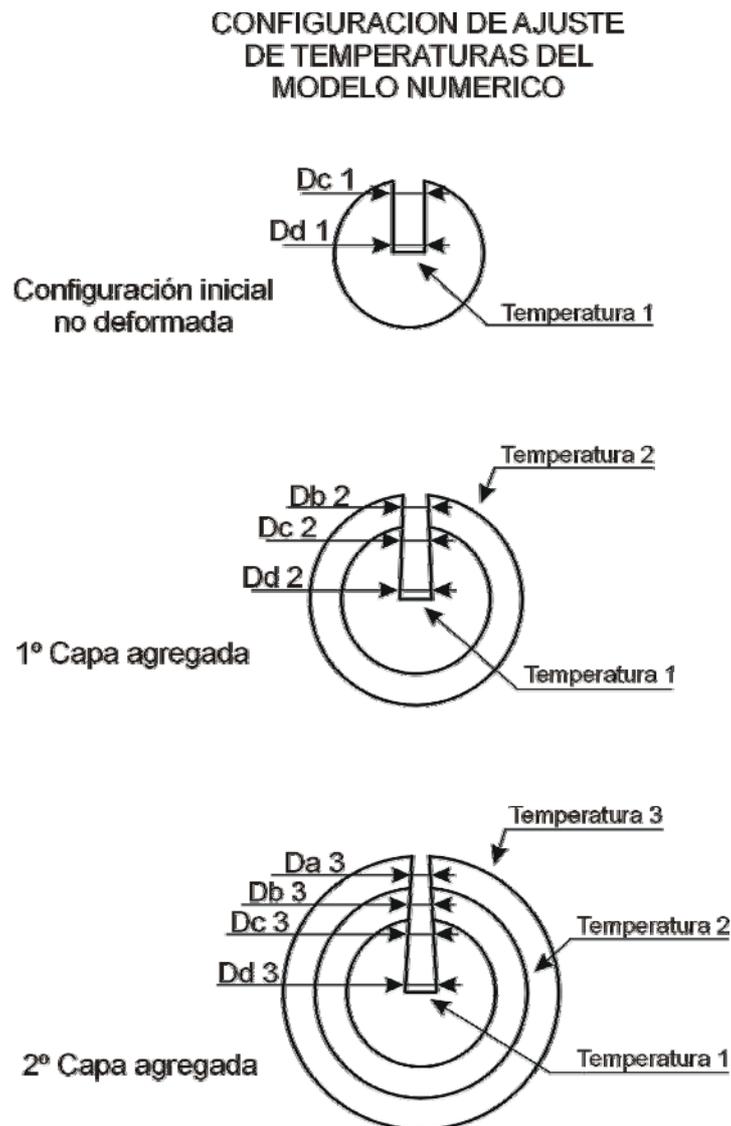


Figura 3: Procedimiento de ajuste de desplazamientos

En la configuración inicial (eje del disco) se postula el equilibrio de tensiones y una temperatura uniforme de 300 K, que se utilizará como temperatura de referencia para el cálculo de expansiones térmicas en el material.

Al agregar la primera capa de material, se conserva la temperatura en el eje (300 K), y manteniendo una condición adiabática en las caras planas superior e inferior se ajusta la temperatura prefijada para la superficie cilíndrica exterior de modo de aproximar la variación en el ancho de la ranura que se produjo durante esa última etapa de rectificado.

En los pasos sucesivos, debe mantenerse la distribución de temperaturas ajustadas en los pasos previos, y aproximar la temperatura externa de la nueva capa para lograr la variación deseada en el ancho de la ranura.

Debe observarse que este esquema de imposición de temperaturas, aplicado a cada una de las capas agregadas, resulta en una variación radial de la temperatura de tipo lineal por tramos, que deriva en deformaciones térmicas que pueden considerarse como una primera aproximación a la distribución real de deformaciones inelásticas (asociadas a las tensiones

residuales) en el disco.

2.4 Estimación de tensiones residuales

Aplicando la distribución de temperaturas calculada en los análisis descriptos anteriormente sobre el modelo sin ranurar, podemos obtener una aproximación a la distribución de deformaciones y tensiones residuales en el disco original.

Posteriormente, se puede realizar un análisis termomecánico donde se apliquen estas deformaciones residuales como una condición inicial del análisis, obteniendo las tensiones efectivas a las que está sometida la pieza durante el servicio.

3 CASO DE APLICACION

A continuación presentamos los resultados obtenidos en un disco sometido a altos gradientes térmicos durante su operación..

Debido a la geometría de esta pieza (sólido de revolución, sometido a condiciones térmicas axisimétricas), es posible aplicar este método y determinar las tensiones circunferenciales efectivas, utilizando una combinación de modelos bidimensionales y tridimensional de elementos finitos (aun cuando la pieza originalmente tiene simetría de revolución, debido al ranurado radial es necesario un modelo tridimensional para determinar las tensiones residuales existentes).

3.1 Mecanizado y medición de deformaciones

La tabla 1 muestra los valores obtenidos de la medición luego de haber realizado el correspondiente suavizado y promediado de datos (en cada etapa se realizaron 3 mediciones para cada punto relevado).

Identificación Punto Medido	Rectif.1	Rectif.2	Rectif.3	Rectif.4	Rectif.5
P2	0.001	0.003	0.005	0.007	0.008
P3	0.002	0.005	0.008	0.013	0.014
P4	0.002	0.007	0.012	0.018	0.023
P5	0.003	0.009	0.016	0.023	0.031
P6	0.003	0.011	0.019	0.029	0.037
P7	0.004	0.014	0.024	0.034	
P8	0.004	0.017	0.029	0.044	
P9	0.005	0.019	0.032		
P10	0.006	0.022	0.040		
P11	0.008	0.030			

Tabla 1: Variación en el ancho de la ranura durante la eliminación de capas [mm]

3.2 Determinación de deformaciones residuales

Las figuras 4 y 5 muestran el modelo de elementos finitos utilizado y la distribución de temperaturas finales necesaria para poder obtener los desplazamientos indicados en la tabla 1. La figura 6 muestra la configuración deformada correspondiente a dichos desplazamientos.



Figura 4: Modelo de elementos finitos utilizado para el análisis

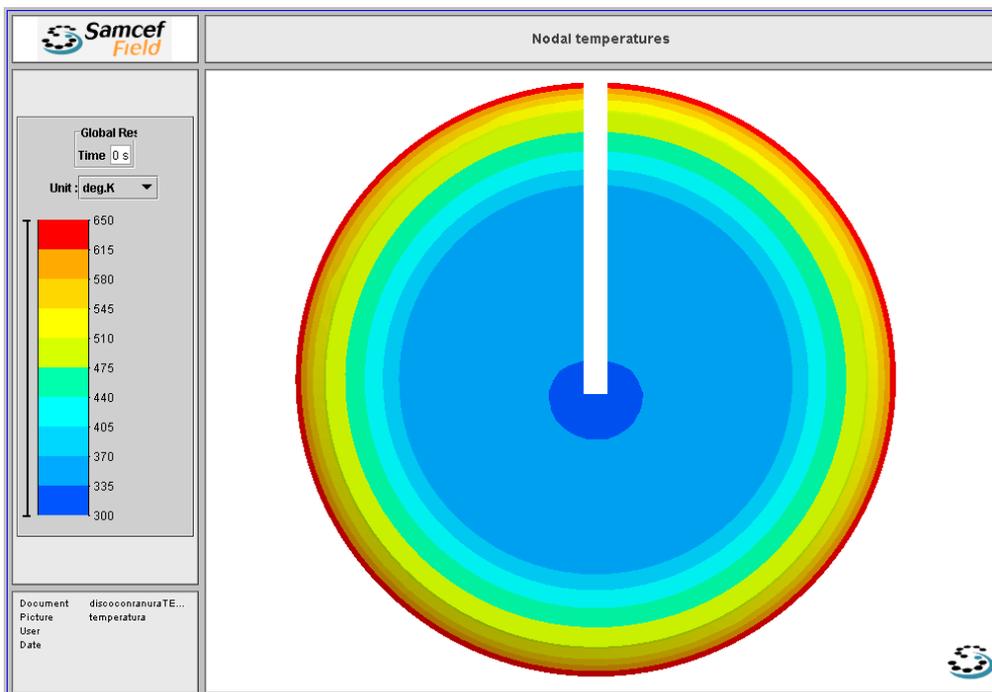


Figura 5: Distribución de temperaturas al final del análisis

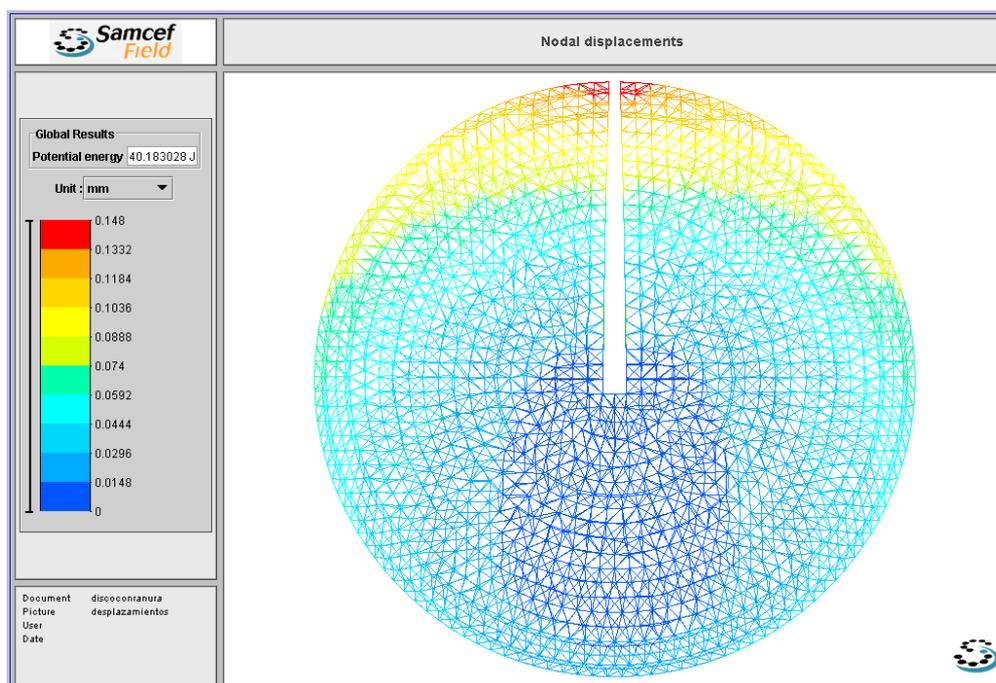


Figura 6: Deformada al final del análisis

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos a lo largo de cada una de las etapas del análisis, y el ajuste entre los resultados numéricos y las mediciones realizadas (expresadas en micrómetros).

Identif. Punto medición	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paso 1	Tnúcleo: 300 K, T1: 360 K							
Desplazamiento medido	5.0	8.0	8.0					
Desplaz. calculado	5.0	7.0	8.0					
Diferencia	0.0	1.0	0.0					
Paso 2	Tnúcleo: 300 K, T1: 360 K, T2: 450 K							
Desplazamiento medido	11.0	15.0	18.0	19.0	26.0			
Desplaz. calculado	9.0	13.0	16.0	20.0	26.0			
Diferencia	2.0	2.0	2.0	-1.0	0.0			
Paso 3	Tnúcleo: 300 K, T1: 360 K, T2: 450 K, T3: 500 K							
Desplazamiento medido	16.0	22.0	26.0	29.0	38.0	43.0	55.0	
Desplaz. calculado	13.0	18.0	24.0	30.0	34.0	44.0	55.0	
Diferencia	3.0	4.0	2.0	-1.0	4.0	-1.0	0.0	
Paso 4	Tnúcleo: 300 K, T1: 360 K, T2: 450 K, T3: 500 K, T4: 580 K							
Desplazamiento medido	21.0	28.0	34.0	39.0	51.0	57.0	71.0	88.0
Desplaz. calculado	17.0	24.0	30.0	39.0	44.0	56.0	71.0	86.0
Diferencia	4.0	4.0	4.0	0.0	7.0	1.0	0.0	2.0
Paso 5	Tnúcleo: 300 K, T1: 360 K, T2: 450 K, T3: 500 K, T4: 580 K, Texter.: 650 K							
Desplazamiento medido	23.0	31.0	37.0	43.0	55.0	62.0	77.0	96.0
Desplaz. calculado	19.0	26.0	33.0	42.0	48.0	61.0	76.0	93.0
Diferencia	4.0	5.0	4.0	1.0	0.7	1.0	1.0	3.0

Tabla 2: Comparación entre valores medidos y valores calculados [μm]

Debe destacarse que aun cuando el ajuste de temperatura para aproximar la deformación en cada etapa del análisis se realizó solo sobre la cara exterior de la última capa agregada, la variación calculada del ancho de la ranura en los radios menores siguió en forma casi natural a la variación medida, sin necesidad de corrección de las temperaturas intermedias. Esta observación constituye un dato positivo acerca de la aptitud del modelo elegido para representar el estado tensional existente en la pieza.

La figura 7 muestra los resultados obtenidos para el estado tensional existente en la pieza a temperatura ambiente.

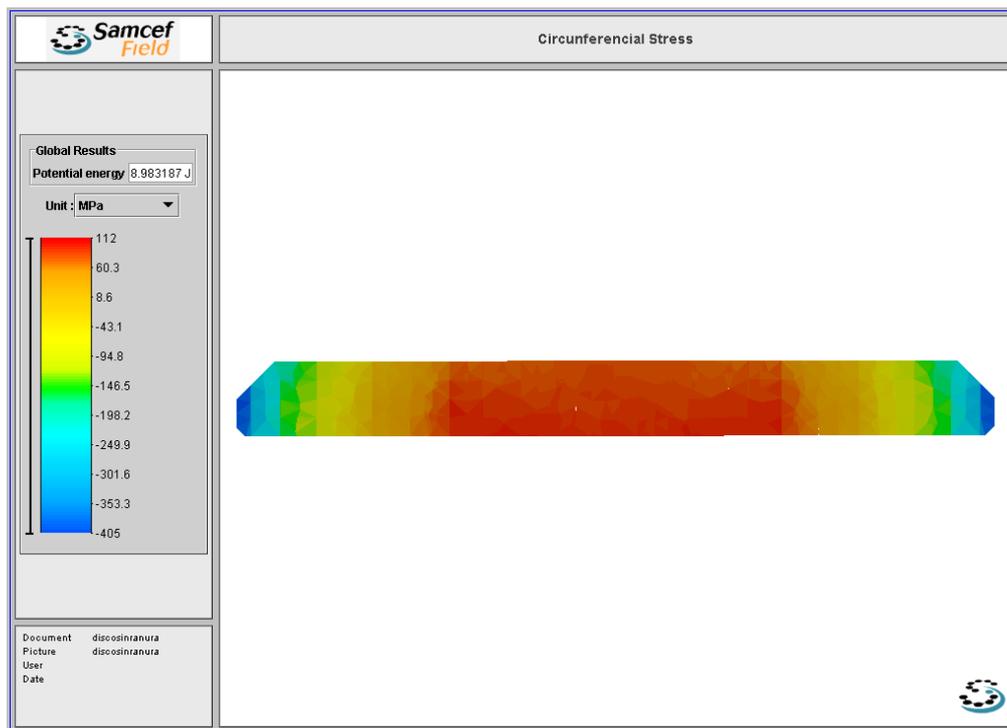


Figura 7: Tensiones circunferenciales residuales [MPa]

3.3 Comparación entre deformaciones aparentes y deformaciones residuales

Una vez determinadas las deformaciones y tensiones residuales a temperatura ambiente, se intentó cuantificar la influencia de estas deformaciones residuales sobre el estado tensional real que sufre la pieza durante el servicio.

Como puede apreciarse en la figura 8, si se realiza un cálculo termomecánico sencillo, utilizando una distribución de temperaturas usual para estas piezas (Yang et al., 2000), aparecen tensiones circunferenciales de importante magnitud (teniendo en cuenta la temperatura a la que se encuentra la pieza), que son además muy superiores al resto de las componentes de la tensión (por ejemplo tensiones radiales debidas a flexión del plato).

Para analizar la influencia de las tensiones residuales en el estado tensional durante el servicio de la pieza, se compararon las deformaciones ϵ_{res} asociadas al análisis de tensiones residuales con las determinadas inicialmente para la válvula en servicio ϵ_{ap} . Debe tenerse en cuenta que no es posible realizar dicha comparación directamente sobre las tensiones calculadas, dado que el módulo elástico del material es mucho menor a las temperaturas de servicio que a la temperatura ambiente a la que se determinaron las tensiones residuales.

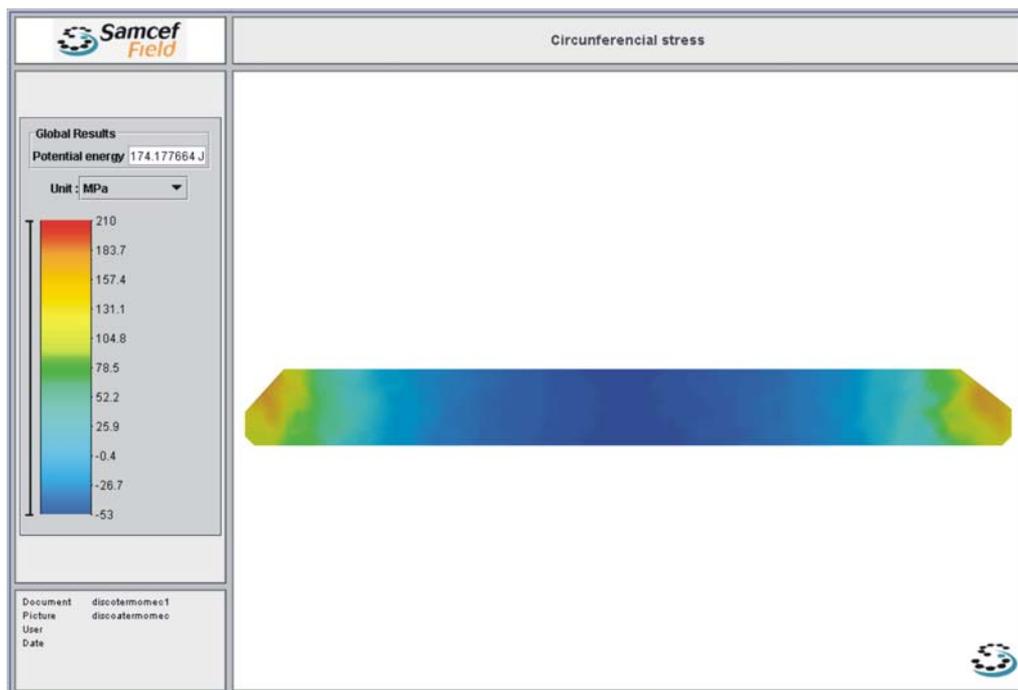


Figura 8: Tensiones circunferenciales debido al gradiente térmico[MPa]

Con el propósito de representar gráficamente la relación entre tensiones debidas a gradientes térmicos y tensiones residuales, la figura 10 muestra los perfiles de tensiones circunferenciales calculadas sobre la línea radial indicada en la figura 9. Puede apreciarse que en la zona periférica las tensiones residuales circunferenciales son de compresión, y por lo tanto de sentido contrario a las tensiones circunferenciales de origen térmico que se desarrollan durante el funcionamiento.

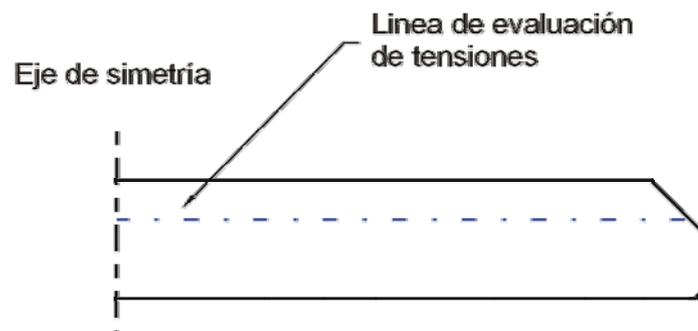


Figura 9: Posición de la línea de evaluación de tensiones efectivas (residuales + debidas a gradiente térmico)

La superposición de ambos estados de deformación deriva en que las tensiones circunferenciales efectivas durante el funcionamiento sean casi un orden de magnitud inferiores a las calculadas sin tener en cuenta el estado inicial de deformación de la pieza. Esta observación es consistente con el hecho de que sea ampliamente aceptado que las tensiones circunferenciales constituyan una componente secundaria dentro del estado tensional al que están sometidas este tipo de piezas.

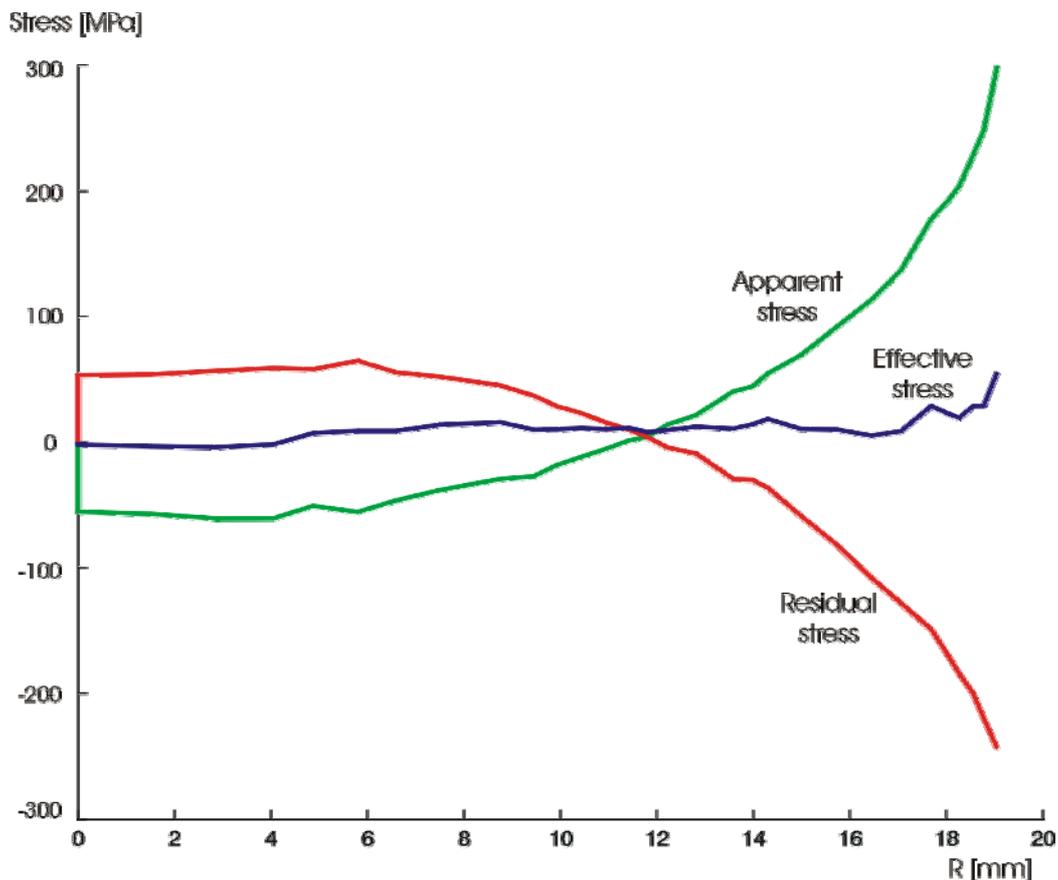


Figura 10: Variación de las tensiones circunferenciales en función del radio

4 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que pueden obtenerse de este análisis son las siguientes:

Esta técnica de determinación de tensiones residuales posee una sensibilidad muy satisfactoria, al menos para el tipo de piezas analizadas.

Pueden obtenerse resultados consistentes y completamente lógicos desde el punto de vista de la distribución esperada de tensiones y deformaciones.

Concentrando los puntos de medición en la zona de mayor diámetro, y afinando el espesor de las capas rectificadas de mayor diámetro puede mejorarse la calidad de los resultados (se concentrarían los puntos de la aproximación lineal por tramos en la zona de mayor gradiente de deformaciones) sin aumentar el número de puntos de medición ni la cantidad de capas a rectificar.

5 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió apoyo económico del Consejo Nacional de Investigación Científicas y Tecnológicas y Universidad Nacional del Litoral.

6 REFERENCIAS

- P. Prevey and P. Mason. The use of X-Ray diffraction to determine the triaxial stress state in cylindrical specimens. *Practical Applications of Residual Stress Technology*, C.Ruud (ed.), American Society for Metals, Materials Park, OH, pp.77-81, 2004.
- A. Roy, A. Venkatesh, V.Marthandam, S. Dronavalli, D. Wells and R. Rogge. Residual stress characterization in structural materials by destructive and nondestructive techniques. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14(2): 203-211, 2005.
- H.Allison and R. Hendricks, Correlation of Barkhausen noise signal and X-ray residual stress determination in grinding-burned 52100 steel. In: T. Ericsson, M. Odén and A. Andersson (eds.) *Proceedings of Fifth International Conference on Residual Stresses, 1997, Linköpings Universitet*, Linköping, Sweden, 640-645, 1998.
- G. Schajer. Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method, part I, stresses calculation procedures. *J.Eng.Mater.Technology*, 110(4):338-343, 1988a.
- G. Schajer. Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method, part II, practical applications of the integral method. *J.Eng.Mater.Technology*, 110(4):344-349, 1988b.
- M. Viotti and G.Kaufmann. Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses. *Optics and Lasers in Eng.*, 41: 297-305, 2004.
- Y. Min, M. Hong, Z. Xi and L. Jian. Determination of residual stresses by use of phase shifting moiré interferometry and hole-drilling method. *Optics and Lasers in Eng.*, 44(1): 68-79, 2006.
- L. Yang, A.Hamada and K.Ohtsubo. Engine valve temperature simulation system. *SAE Paper 2000-01-0564*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 2000.