



DETERMINACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES EN VÁLVULAS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

CÉSAR LUENGO, JOSÉ M. RISSO, ALBERTO CARDONA

Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería
CIMEC-INTEC / UNL-CONICET
Güemes 3450, Santa Fe, Argentina

(Recibido 28 de mayo de 2011, revisado 5 de agosto de 2011, para publicación 25 de abril de 2012)

Resumen – Los gradientes térmicos que se presentan durante el servicio de ciertos componentes de máquinas térmicas alcanzan en ocasiones magnitud suficiente como para generar deformaciones inelásticas que influyen sobre el estado tensional en condiciones de servicio, y se manifiestan como tensiones residuales al enfriar las piezas hasta temperatura ambiente. Una situación similar se presenta en piezas que son sometidas a tratamientos térmicos o fusión y solidificación localizados, tales como soldadura, aportes de metal fundido, temple por inducción, etc. Para determinar el estado tensional efectivo y la aptitud de la pieza para el servicio, es imprescindible conocer la magnitud de estas deformaciones inelásticas y sus tensiones residuales asociadas. Algunas de las técnicas experimentales disponibles en la actualidad (Difracción de Rayos X o neutrones, Ruido de Barkhausen) solo brindan información respecto del estado tensional en la superficie de las piezas. Otras, tales como las rosetas de galgas extensométricas, no pueden ser aplicadas con precisión en piezas de forma complicada. En este trabajo se presenta una metodología de remoción de capas para determinar tensiones residuales en piezas axisimétricas utilizando instrumental de metrología dimensional de uso corriente en la industria de autopartes, en conjunto con técnicas de cálculo numérico. Como caso de aplicación, se describe el análisis de tensiones efectivas durante el servicio de una válvula de un motor de combustión interna, evaluando previamente las tensiones residuales de origen térmico.

Palabras clave – Tensiones residuales, remoción de capas, deformaciones inelásticas.

1. INTRODUCCIÓN

La existencia de una diferencia de temperatura importante (superior a 200°C) entre la zona central y la zona externa de la cabeza de una válvula de motor de combustión interna produce una deformación térmica diferencial muy importante entre ambos sectores. Si esa deformación diferencial ocurriera puramente dentro del rango elástico, originaría tensiones circunferenciales muy elevadas en la periferia de la cabeza.

Analizando el comportamiento en servicio de las válvulas, y dada la escasa relevancia que suelen tener las tensiones circunferenciales dentro de los motivos usuales de falla de estos elementos, puede presumirse que las deformaciones de origen térmico se superponen con deformaciones iniciales (presumiblemente derivadas de deformaciones inelásticas producidas durante el proceso de fabricación o durante las primeras horas de marcha en el motor) que tienden a reducir el valor efectivo de las tensiones circunferenciales en la cabeza de las válvulas.

La determinación experimental de estas tensiones/deformaciones residuales mediante los métodos más citados en la bibliografía presenta dificultades para su utilización industrial. Las técnicas de Difracción de Rayos X/neutrones [1] o Ruido de Barkhausen [2] solo brindan información respecto del estado tensional en la superficie de las piezas. Una técnica ampliamente difundida para el estudio de tensiones residuales se basa en evaluar la respuesta (deformación) de la pieza frente a perturbaciones geométricas producidas por una acción mecánica. Un ejemplo de este tipo de técnicas es el método de *hole drilling*. Sin embargo, las rosetas de galgas extensométricas [3] o las técnicas de interferometría [4] utilizadas en este método, requieren instrumental y técnicas experimentales que no son habituales en la industria metalmeccánica [5].

Una técnica interesante desde el punto de vista de su aplicación industrial es el método de remoción de capas o *layer removal* [6].

El objetivo del presente trabajo es determinar, mediante el uso de técnicas metrológicas y de laboratorio usuales en la industria metalmeccánica, la magnitud de las tensiones iniciales (o residuales) presentes a temperatura ambiente en la válvula de escape de un motor diesel vehicular. Una vez determinadas estas tensiones residuales, podrá analizarse su efecto en el estado tensional que se presenta en la zona de la cabeza de las válvulas durante el funcionamiento del motor.

2. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS

2.1. Hipótesis utilizadas

La hipótesis principal en la que basaremos el análisis es la presencia de tensiones residuales, de componente principal circunferencial, en válvulas que han sido sometidas a una cierta cantidad de horas de funcionamiento en el motor.

Si bien en esta primera etapa de análisis no es imprescindible determinar el origen de estas tensiones, puede suponerse que una parte de las mismas puede provenir del proceso de fabricación, mientras que otra parte puede deberse a deformaciones inelásticas (presumiblemente de naturaleza elastoplástica o viscoplástica) generadas durante la primer etapa de la vida de servicio de la válvula.

A partir de esta hipótesis inicial, enunciaremos tres hipótesis simplificativas utilizadas para este análisis:

- a) Las tensiones circunferenciales presentan una distribución axisimétrica.
- b) Las tensiones circunferenciales tienen un valor constante en sentido axial.
- c) A lo largo del proceso de remoción de capas de material, la magnitud de las tensiones residuales se encuentra dentro del rango de respuesta elástica lineal del material.

La primera de estas hipótesis es claramente aceptable, suponiendo que la válvula gira durante el funcionamiento del motor y por ende la distribución de temperaturas es aproximadamente axisimétrica.

Por el contrario, la segunda hipótesis no debería cumplirse en la zona del asiento, donde las isoterms son aproximadamente paralelas al cono de asentamiento, produciendo dilataciones diferenciales en sentido axial. Esta hipótesis simplificativa deriva en un promediado axial de las tensiones residuales. En futuros análisis se plantearán estrategias de medición tendientes a determinar la variación axial de las tensiones residuales en la zona del asiento.

La tercer hipótesis se basa en que por definición las tensiones residuales iniciales se encuentran dentro del rango elástico del material, dado que si superaran ese límite se producirían plastificaciones que resultarían en una redistribución de las deformaciones residuales hasta alcanzar un estado donde toda la pieza se encuentre por debajo del límite de fluencia. Además, este tipo de aceros presenta una curva de carga donde el rango elástico lineal es seguido de una transición rápida al estado plástico, sin evidencias de comportamiento elástico no lineal. Por último, al perturbar la geometría de la pieza, todas las operaciones de mecanizado que se realizan van en el sentido de obtener una relajación de las tensiones residuales, por lo que podemos asumir que a lo largo del proceso, el estado tensional en todos los puntos de la pieza se va alejando del límite de fluencia, evolucionando dentro del rango de respuesta elástica lineal del material.

2.2. Esquema de análisis

El esquema propuesto para este análisis se basa en aproximar, mediante la aplicación de cargas térmicas en un modelo tridimensional de elementos finitos, los desplazamientos que se producen al perturbar mediante operaciones de mecanizado el estado tensional en la cabeza de la válvula [5]. Si asumimos que las tensiones residuales son producidas por deformaciones inelásticas $\varepsilon_{\text{plas}}$, el objetivo es aplicar un campo de deformaciones térmicas $\varepsilon_{\text{term}}$ que genere el mismo estado tensional inicial, de modo de aproximar la respuesta de la pieza frente a perturbaciones en su geometría.

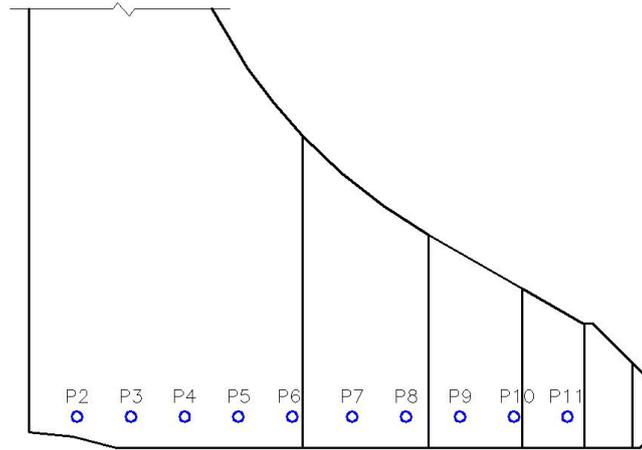


Fig. 1. Puntos de medición y capas mecanizadas.

CONFIGURACION DE MEDICION DE LA PIEZA

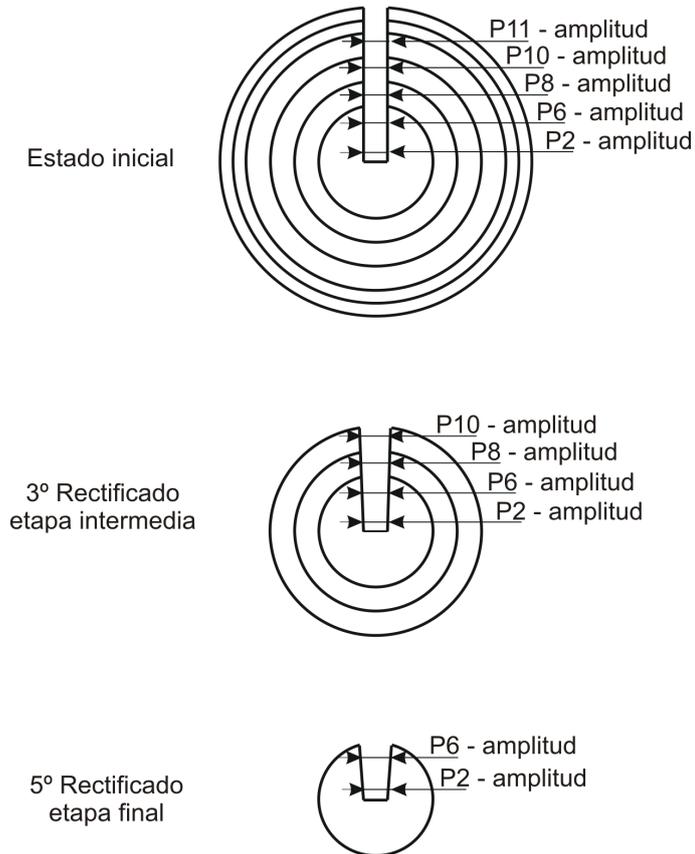


Fig. 2. Esquema de medición en la válvula real.

El análisis comprende una etapa inicial de remoción de capas de material y evaluación del desplazamiento en diferentes puntos de la pieza debido a esas perturbaciones, y una etapa final de reconstrucción del proceso en sentido inverso (es decir, agregando capas de material de modo de reproducir en sentido inverso las deformaciones medidas en la etapa inicial), utilizando modelos de elementos finitos.

A partir de la hipótesis de linealidad enunciada en el apartado precedente, puede justificarse que el análisis numérico se realice en sentido inverso al proceso experimental de remoción de capas.

2.3. Mecanizado y medición de deformaciones

El primer paso en el proceso de estudio es realizar una ranura radial en la cabeza de una válvula. De este modo, se obtiene una configuración geométrica que permite que los desplazamientos resultantes de las siguientes perturbaciones (extracción de capas de material) sean de magnitud suficiente como para medir la variación del ancho de la ranura en una máquina industrial de medición por coordenadas (CMM).

En esa configuración (válvula ranurada) se procede a medir el ancho de la ranura en una serie de puntos predeterminados, ver Fig. 1.

Posteriormente se realiza un rectificado exterior de la cabeza de la válvula, eliminando una capa de material, y se mide nuevamente el ancho de la ranura en los puntos predeterminados, registrando la variación que se produce al eliminar esa capa de material, Fig. 2.

Este proceso de eliminación de capas y medición de variación en el ancho de la ranura en los puntos establecidos se repite hasta llegar a un diámetro reducido, del orden del doble del diámetro de vástago de la válvula. En la Fig. 3 se observa el diámetro final del plato de la válvula.

Teniendo en cuenta que pueden existir errores en el proceso de medición (posicionamiento de la pieza luego de cada rectificado exterior, perturbaciones por vibraciones generadas por los equipos de forja, etc.) del orden de algunas milésimas de milímetro, se realiza un suavizado de los datos para asegurar su consistencia y evitar que los errores de medición distorsionen los resultados del análisis.

La tabla 1 muestra valores obtenidos luego del suavizado en el caso de una válvula de un motor de combustión interna diesel vehicular, utilizada aproximadamente durante 1000 hs.



Fig. 3. Válvula con ranura radial y rectificada hasta la última etapa de medición.

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

Identificación punto medido	1° Rectif.	2° Rectif.	3° Rectif.	4° Rectif.	5° Rectif.
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			

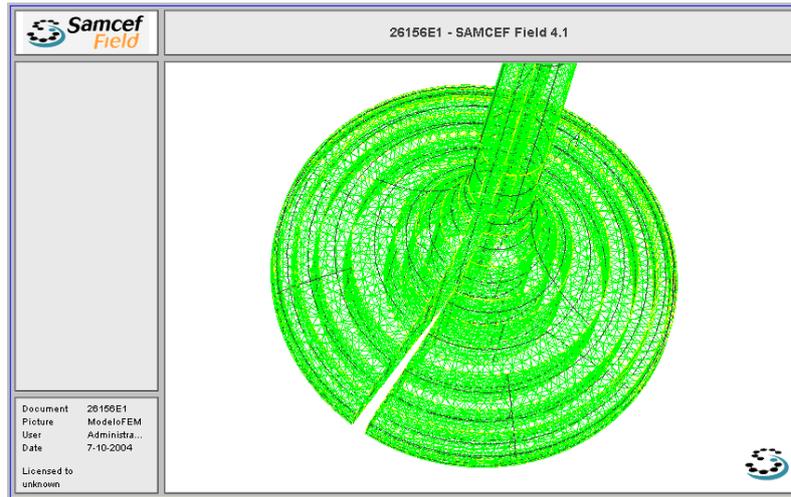


Fig. 4. Modelo de elementos finitos utilizado para el análisis.

CONFIGURACION DE AJUSTE
DE TEMPERATURAS DEL
MODELO NUMERICO

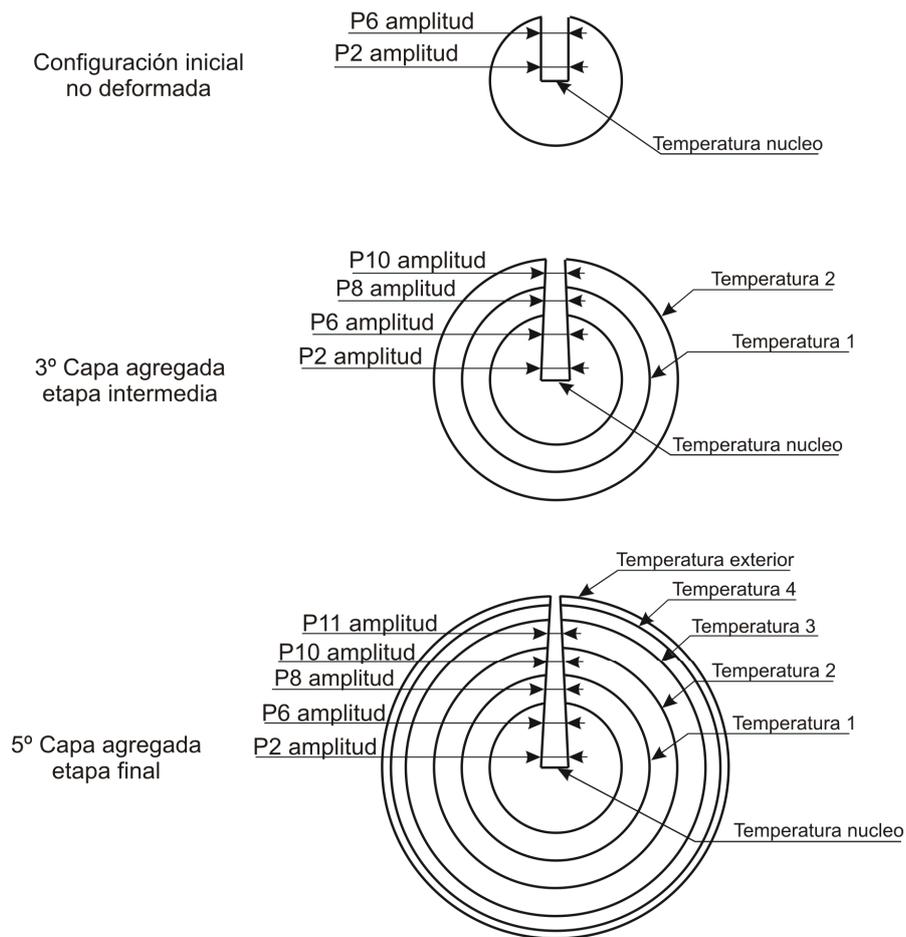


Fig. 5. Esquema de ajuste de desplazamientos por imposición de temperaturas en el modelo FEM.

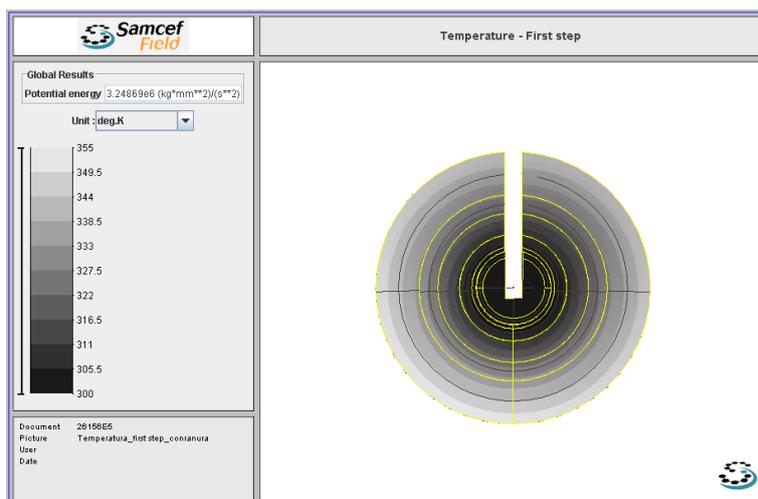


Fig. 6. Distribución de temperaturas luego del agregado de la primera capa.

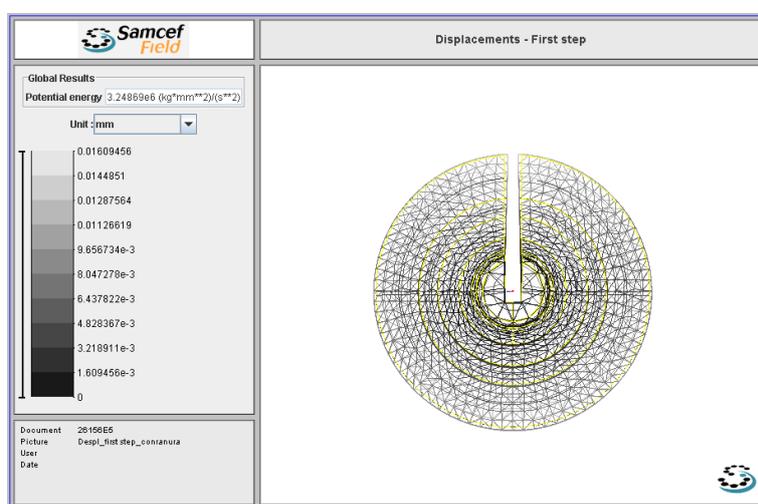


Fig. 7. Deformada luego del agregado de la primera capa.

2.4. Reproducción del proceso en sentido inverso utilizando análisis numérico

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

La Fig. 4 presenta la topología de la malla del modelo de elementos finitos utilizado para el ajuste de deformaciones.

Teniendo en cuenta que los desplazamientos son de pequeña magnitud, y el comportamiento del material es lineal, se toma como configuración inicial (no deformada) la correspondiente a la última etapa de mecanizado, y se invierten los signos de las variaciones de ancho registradas durante el proceso de eliminación de capas.

En la configuración inicial (núcleo de la válvula) se postula el equilibrio de tensiones, suponiendo que todo el material se encuentra a una temperatura uniforme (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 del núcleo en 300 K, y se ajusta la temperatura de la cara exterior de la capa agregada, de modo de aproximar la variación en el ancho de la ranura que se produjo durante esa última etapa de rectificado, Fig. 5.

Las figuras 6 y 7 muestran la distribución de temperaturas y la deformada obtenida luego la primer etapa de ajuste.

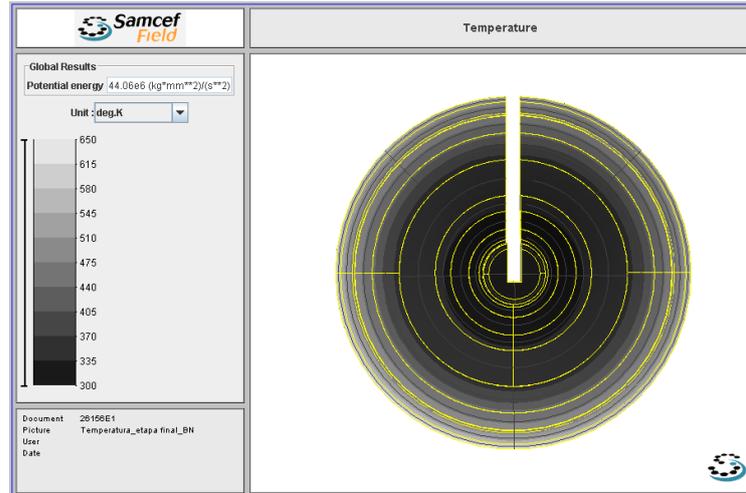


Fig. 8. Distribución de temperaturas al final del análisis.

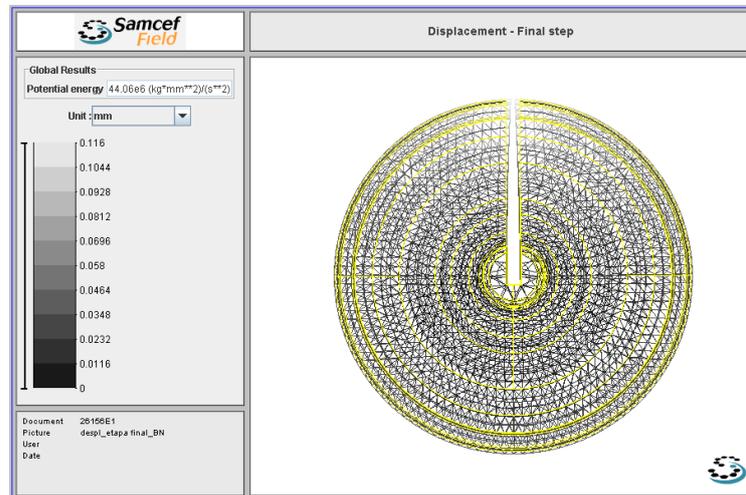


Fig. 9. Deformada al final del análisis.

En los sucesivos agregados de capas al modelo se sigue un esquema similar, consistente en mantener 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. Las Figuras 8 y 9 muestran la distribución final de temperaturas y la deformada final obtenida.

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 (generadoras de tensiones residuales) en la cabeza de la válvula.

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.

2.5. Estimación de tensiones residuales

Aplicando la distribución de temperaturas calculada en los análisis descriptos anteriormente sobre la cabeza de una válvula en condiciones de funcionamiento (o sea, sin ranurar), podemos obtener una aproximación a la distribución de tensiones residuales en la cabeza de una válvula usada.

Las Figuras 10 y 11 muestran los gráficos de tensiones residuales en la zona de la cabeza.

Tabla 2. Comparación entre valores medidos y valores calculados.

Identif. pto. medido	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Paso 1	T nucleo: 300 K, T1: 337 K							
Valor deseado (μm)	5.0	8.0	8.0					
Cierre Total (μm)	4.9	7.0	9.0					
Diferencia (μm)	0.1	1.0	-1.0					
Paso 2	T nucleo: 300 K, T1: 337 K, T2: 370 K							
Valor deseado (μm)	11.0	15.0	18.0	22.0	31.0			
Cierre Total (μm)	10.2	13.9	18.3	23.9	30.1			
Diferencia (μm)	0.8	1.1	-0.3	-1.9	0.9			
Paso 3	T nucleo: 300 K, T1: 327 K, T2: 370 K, T3: 400 K							
Valor deseado (μm)	16.0	22.0	26.0	32.0	42.0	51.0	63.0	
Cierre Total (μm)	14.9	20.4	26.3	34.0	42.8	52.6	63.5	
Diferencia (μm)	1.1	1.6	-0.3	-2.0	-0.8	-1.6	-0.5	
Paso 4	T nucleo: 300 K, T1: 337 K, T2: 370 K, T3: 400 K, T4: 455 K							
Valor deseado (μm)	21.0	28.0	34.0	42.0	55.0	65.0	79.0	96.0
Cierre Total (μm)	19.4	26.2	33.9	43.4	54.5	66.5	80.5	94.8
Diferencia (μm)	1.6	1.8	0.1	-1.4	0.5	-1.5	-1.5	1.2
Paso 5	T nucleo: 300 K, T1: 337 K, T2: 370 K, T3: 400 K, T4: 455 K, T5: 650 K							
Valor deseado (μm)	23.0	31.0	37.0	46.0	59.0	70.0	85.0	104.0
Cierre Total (μm)	21.5	29.3	37.9	48.1	59.4	71.6	85.6	100.7
Diferencia (μm)	1.5	1.7	-0.9	-2.1	-0.4	-1.6	-0.6	3.3

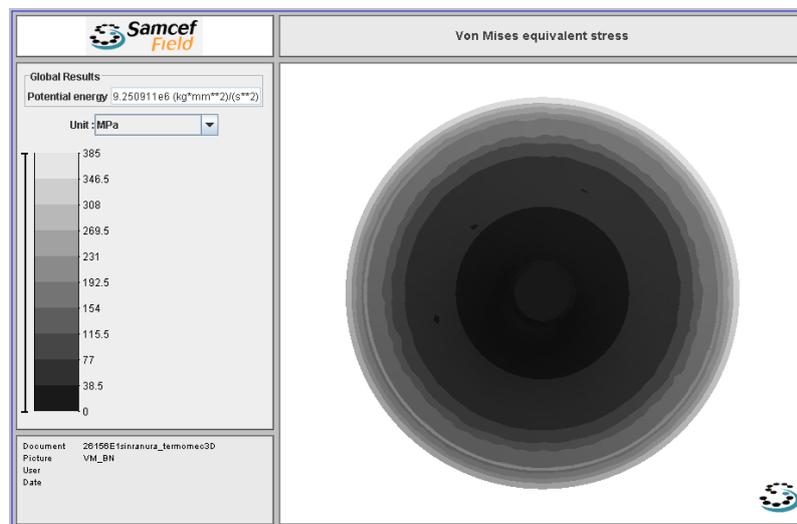


Fig. 10. Tensiones equivalentes de Von Mises.

Puede apreciarse que en la zona del asiento 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 del motor.

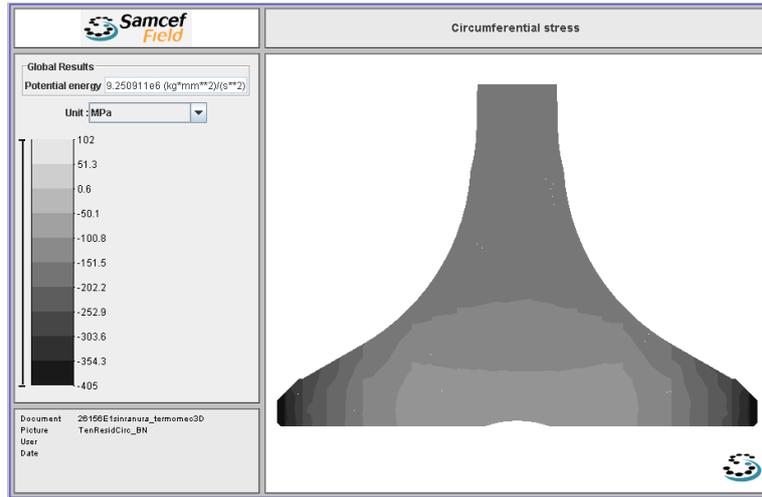


Fig. 11. Tensiones residuales en la cabeza – Componente circunferencial.

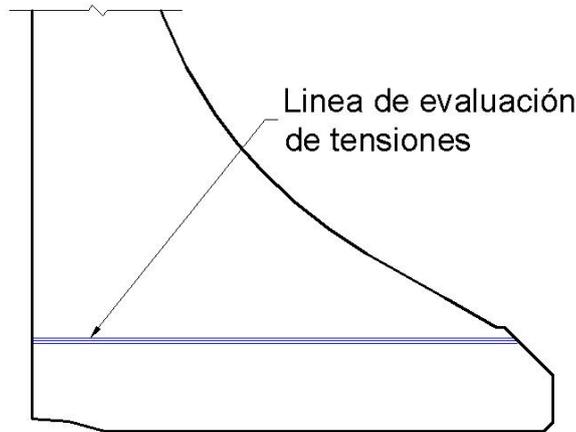


Fig. 12. Posición de la línea de evaluación de tensiones efectivas (residuales + aparentes).

3. INFLUENCIA EN EL ESTADO TENSIONAL DURANTE EL SERVICIO

3.1. Modelo utilizado

Para analizar la influencia de las tensiones residuales en el estado tensional durante el servicio de la válvula, se superpusieron las deformaciones ϵ_{res} asociadas al análisis de tensiones residuales (deformaciones iniciales) con las determinadas inicialmente para la válvula en servicio ϵ_{ap} , asumiendo que luego del período inicial de funcionamiento, todas las deformaciones que se desarrollan durante los ciclos operativos del motor (desde el arranque hasta la detención) se encuentran dentro del rango lineal del material.

Finalmente, el estado tensional real en condiciones de servicio se obtiene mediante:

$$\sigma = E_{(T)} : \epsilon = E_{(T)} : (\epsilon_{res} + \epsilon_{ap}) \tag{1}$$

Nota: No es posible realizar dicha superposición operando directamente sobre las tensiones, dado que el módulo elástico del material es mucho menor a las temperaturas de servicio que a la temperatura ambiente a la que se determinan las tensiones residuales.

El estudio se realizó sobre un modelo axisimétrico, intentando determinar el nivel de tensiones a lo largo de una línea radial en la cabeza de la válvula, según se indica en la Fig. 12.

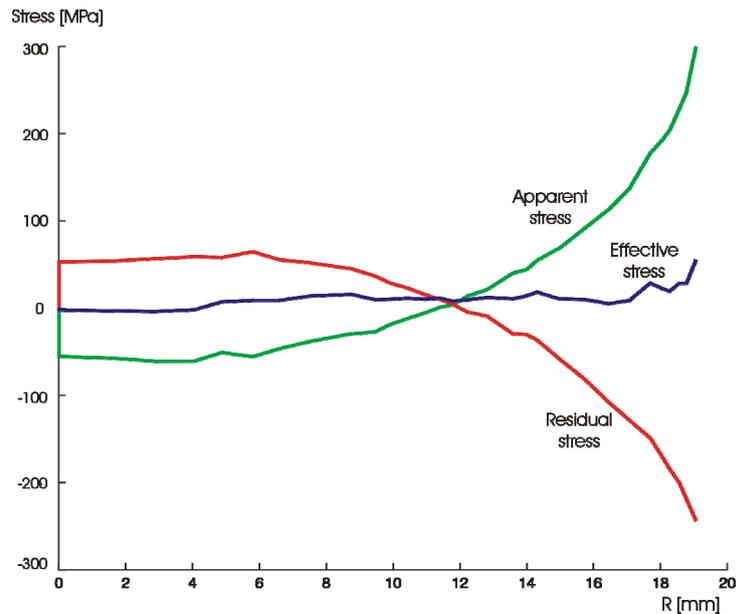


Fig. 13. Variación de las tensiones circunferenciales en función del radio.

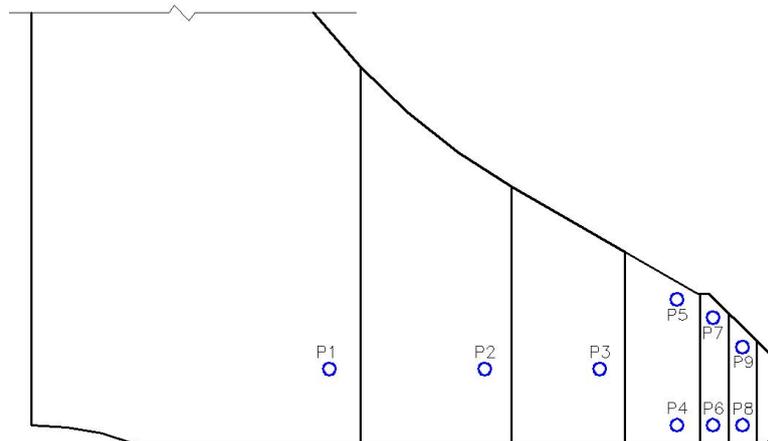


Fig. 14. Futuros puntos de medición y capas mecanizadas.

Al superponer los patrones de tensiones circunferenciales aparentes y tensiones circunferenciales residuales (Fig. 13), se observa que las tensiones efectivas resultantes tienen un valor más bajo que el de las tensiones aparentes, siendo dicha disminución más notoria en la zona periférica de la válvula.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

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

- Esta técnica de determinación de tensiones residuales posee una sensibilidad satisfactoria para el tipo de piezas analizadas.
- Con un mínimo suavizado de los resultados de las mediciones (para filtrar los errores de medición), pueden obtenerse resultados consistentes y completamente lógicos desde el punto de vista de la distribución esperada de tensiones y deformaciones.
- Las tensiones circunferenciales efectivas representan aproximadamente un 20% de las tensiones circunferenciales aparentes. Esta reducción permitiría justificar la escasa frecuencia de aparición de fallas debidas a fisuración radial de la cabeza de las válvulas.

- 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.

Como trabajos futuros en este área pueden enunciarse:

- Definir un esquema más refinado para el posicionamiento de los puntos de medición y la determinación de los espesores de capa a rectificar.
- Analizar la variación de las tensiones internas en válvulas nuevas y con diferentes cantidades de horas de uso, para determinar la evolución temporal de las mismas.
- Analizar la variación axial de las tensiones residuales, definiendo una distribución apropiada de puntos de medición en los sectores donde se esperen gradientes axiales importantes en la distribución de tensiones residuales, Fig. 14.

REFERENCIAS

- [1] Prevey, P., Mason, P., "The use of X-ray diffraction to determine the triaxial stress state in cylindrical specimens", in C. Ruud (ed.) *Practical Applications of Residual Stress Technology*, American Society for Metals, 77-81 (2004)
- [2] Allison, H.D., Hendricks, R.W., "Correlation of Barkhausen noise signal and X-Ray residual stress determinations in grinding-burned 52100 steel", Virginia Polytechnic Institute and State University - Blacksburg, Virginia 24061-0237 <http://www.eng.vt.edu/eng/material/faculty/hendricks/publications/publication.html>
- [3] Hecker, R.L., Guzman, J.A., Flores, G.M., Vicente, D.A., "Fabricación y ensayo experimental de un dinamómetro para torneado", 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cuzco (2007)
- [4] Viotti, M., Kaufmann, G., "Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stress", *Optics and Lasers in Engineering*, **41**, 297-305 (2004)
- [5] HBM – Medición y análisis de tensiones residuales - <http://www.hbm.com/es/menu/aplicaciones/analisis-experimental-de-tensiones/como-medir-tensiones/tensiones-residuales-tensiones-internas>
- [6] Bendek, E., Lira, I., Francois, M., Vial, C., "Uncertainty of residual stresses measurement by layer removal", *International Journal of Mechanical Sciences*, **48**, 1429-1438 (2006)

RESIDUAL STRESSES MEASUREMENT IN ENGINE VALVES

Abstract – Engine components can develop important thermal gradients during service, producing high inelastic strains that modify the stress state and induce residual stresses when the components are cooled down to room temperature. A similar process is developed in components subjected to heat treatment or to localized melting and solidification, such as during induction heating for tempering, welding, brazing, etc. In order to obtain the real stress state, and to assess the capability of the components to sustain loads, it is mandatory to determine the magnitude of the inelastic strains and the resulting residual stresses. Experimental methods such as X-ray or neutron diffraction and Barkhausen noise, give information only for residual stresses in a thin superficial layer. Other methods, such as strain-gauges rosettes, require cannot be applied with confidence in parts with complicated shapes. In this work, a layer-removal methodology is presented to determine residual stresses in axisymmetric components. This method requires measurement instruments commonly used by engine component manufacturers, combined with analysis by numerical methods. An application case is presented in order to determine the residual stresses at room temperature and the effective stresses, in an internal combustion engine valve during its service.

Keywords – Residual stresses, Layer removal, Inelastic strains.