

SIMULACION DE LA DISTORSION DURANTE EL TRATAMIENTO TERMICO DE TEMPLE EN PIEZAS DE ACERO UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Simulation of distortion during the hardening heat treatment on valve lifters in automotive industry

RESUMEN

Se presenta un método innovador en el que se introducen las mediciones del esfuerzo residual, como condición inicial (condiciones de frontera) en un software de elemento finito para determinar la deformación dimensional en piezas templadas utilizadas en la industria automotriz. La distorsión fue simulada utilizando el análisis de elemento finito (ANSYS). Las variables consideradas fueron temperatura de austenización, temperatura del medio de temple, y condición de esfuerzos residuales. Los resultados mostraron que los esfuerzos residuales no tienen un efecto importante sobre la distorsión. Se detectó que a mayor temperatura de austenización y a menor temperatura del medio de temple la distorsión aumenta. Los esfuerzos residuales y la distorsión de las piezas a diferentes temperaturas fueron evaluados para obtener las condiciones óptimas de distorsión.

PALABRAS CLAVES: Análisis de Elemento Finito (AEF), Distorsión, Tratamiento Térmico, Temple, Simulación de esfuerzos térmicos.

ABSTRACT

An alternative method for determining dimensional distortion in parts used in automotive industry was shown. Dimensional distortion was simulated using finite element analysis (ANSYS). The main variables considered were: austenization temperature, quenching medium temperatures, and initial residual stresses. The results showed that initial residual stresses had no important effect on dimensional distortion. It was also shown that at higher austenization temperatures, and lower quenching media temperature, dimensional distortion was increased. Thermal stresses and valve lifter distortion at different austenization temperatures were evaluated to obtain optimal conditions for dimensional distortion.

KEYWORDS: Distortion, Finite Elements Analysis, (FEA), Heat treatment, Quenching, Thermal stresses simulation.

1. INTRODUCCION

El tratamiento térmico de temple es parte vital de los procesos de manufactura en piezas de acero utilizadas en la industria automotriz. Desafortunadamente es también una de las principales causas en el rechazo de las piezas. Este problema genera grandes pérdidas de energía, materiales y productividad. El tratamiento térmico de las piezas requiere de altas temperaturas que son mantenidas por largos periodos de tiempo y enfriadas súbitamente en el medio de temple. Es impredecible la deformación dimensional que ocurre en este proceso. Un importante

grupo de fabricantes de piezas de alta precisión y calidad esta entendiendo como se manifiesta la deformación dimensional en piezas de acero [1]. En la industria automotriz, el proceso de manufactura común de piezas de precisión se conforma de las siguientes etapas: Maquinado, Tratamiento Térmico y Rectificado. Cada etapa causa esfuerzos tanto de tensión como de compresión en el material, cambiando las propiedades mecánicas y las dimensiones de las piezas.

El maquinado es la etapa en donde la mayor parte del material de la materia prima es removido. Durante este proceso el material es suave y fácil de maquinar. Es necesario que en esta etapa se considere un

MIGUEL ANGEL NERI FLORES

Ingeniero metalurgico, Ph.D.
Investigador Titular "A"
Centro de Investigación en
Materiales Avanzados, S.C.
miguel.neri@cimav.edu.mx

HECTOR CASTILLO ESPINOSA

Ingeniero Químico Metalúrgico,
M.Sc.
Gerente de Laboratorio
HERRAMIENTAS TRUPER
hcastillo@truper.com

ANTONINO PEREZ HERNANDEZ

Físico Matemático, Ph.D.
Investigador Titular "B"
Centro de Investigación en
Materiales Avanzados, S.C.
antonino.perez@cimav.edu.mx

excedente de material, antes del rectificado, para compensar la deformación dimensional que ocurre durante el temple.

El tratamiento térmico de las piezas consideradas consiste en calentar las piezas a su temperatura de austenización en una atmósfera controlada o inerte. Durante esta etapa, el material experimenta una transformación de fase a austenita. El cambio en las posiciones de los átomos permite que se generen algunos esfuerzos residuales y cambios dimensionales. Cuando la etapa de temple ocurre, comienza la transformación de fase martensítica siendo introducidos nuevos esfuerzos residuales a las piezas, y por lo tanto nuevos cambios dimensionales y de esfuerzo ocurren. Factores como el de la temperatura de austenización y la temperatura del medio de temple, han sido también considerados en el problema del control de la deformación dimensional. [2].

La siguiente etapa es el rectificado. Durante esta etapa es alcanzada la dimensión final especificada. Las tolerancias permitidas para las piezas consideradas son muy pequeñas, alrededor de $\pm 2.54 \times 10^{-6}$ m (1×10^{-4} plg.). La precisión es necesaria porque al tener piezas demasiado grandes puede ocasionar un mal ensamble ocasionando daño en el motor y si es demasiado pequeño tendría el riesgo de no alcanzar la presión suficiente para su correcto funcionamiento.

Llevar a cabo un estudio en la industria que considere las diferentes variables involucradas en la deformación dimensional sería costoso, ya que se realizaría por prueba y error, además de consumir mucho tiempo [3]. Se tendría que comprar material para cada muestra. El material entonces tendría que ser calentado agregando otro costo. Personal especializado tendría que ser contratado para poder llevar a cabo los estudios. Todo esto significa material extra, energía y costos de mano de obra. Por estas razones la industria ha optado por usar un exceso de material antes del tratamiento térmico para compensar la deformación dimensional en vez de invertir en estudios costosos que puedan predecir la cantidad de material adecuada. Obviamente, una simulación de este tipo de estudio tiene claramente sus ventajas identificadas.

En este trabajo, el principio de la difracción de los rayos-x fue utilizada para medir los esfuerzos residuales durante las diferentes etapas de fabricación de las piezas. Los resultados de estas mediciones fueron introducidos en el software ANSYS como condiciones iniciales o de frontera, para poder encontrar las condiciones óptimas en la etapa de temple, necesarias para minimizar la deformación dimensional en el proceso de manufactura de piezas de elevada precisión.

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterización

Las propiedades físicas y químicas del acero fueron caracterizadas en las condiciones iniciales de materia prima, para conocer las condiciones iniciales del material, e introducir estas como datos de alimentación al software.

La tabla 1 muestra la composición nominal del acero [4] usado en la manufactura de las piezas automotrices.

Elemento	Nominal
% C	0.12 – 0.18
% Mn	0.55 – 0.90
% Si	0.15 – 0.35
% Cr	0.85 – 1.25
% Mo	0.15 – 0.35
% P	< 0.03
% S	< 0.03

Tabla 1. Composición química del acero.

2.2 Esfuerzos residuales

Estos fueron medidos utilizando la técnica de difracción de rayos "X" sobre muestras obtenidas de las diferentes etapas del proceso de manufactura, en cinco diferentes puntos de cada muestra. Las mediciones de esfuerzos residuales fueron llevadas a cabo con un equipo de la serie X3000. En la Figura No 1 se muestran las posiciones de los puntos donde las mediciones de los esfuerzos residuales fueron realizadas.



Figura 1. Piezas de materia prima en condición inicial

2.3 Simulación

Considerando que las piezas se encuentran inicialmente a una temperatura de austenización uniforme, y que también es enfriada en forma uniforme desde todo el exterior de la superficie, la ecuación considerada para resolver la transferencia de calor durante el temple es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(Kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(Kr \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Asumiendo que $t = 0$ al momento en que la pieza es sumergida en el medio de temple, la condición inicial puede ser considerada como:

$$T(r,0) = T_i = 900^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

La pieza tiene simetría en el punto medio ($r = 0$). Entonces la condición de frontera en el <punto medio puede ser considerada como:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

La transferencia de calor por conducción hacia la superficie de la pieza, es perdida hacia el medio por convección.

Entonces la condición de frontera sobre la superficie puede ser considerada como:

$$-K \frac{\partial T(r,0,t)}{\partial r} = h[T(r,0) - T_{\infty}] \quad (4)$$

La Figura 2 muestra el dibujo de la parte utilizada en la simulación [5]. Las principales consideraciones de la simulación fueron concentradas en la no linealidad de las propiedades del material, tales como conductividad térmica, expansión térmica, capacidad calorífica y el coeficiente de transferencia de calor por convección.

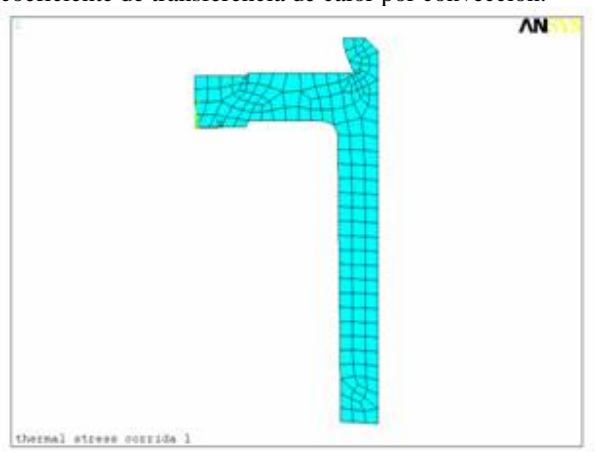


Figura 2. Simetría de la pieza utilizada en la simulación.

La tabla 2 muestra las propiedades del material en función de la temperatura, previamente mencionadas [6], el coeficiente de transferencia de calor por convección para el medio de temple considerado.

Propiedad	473°K 200 °C	673°K 400 °C	873°K 600 °C	1073°K 800 °C	1273°K 1000 °C
Exp. Térmica (W/m °C)	12.2	13.7	14.6	15.5	16.4
Cond. Térmica (W/m °C)	41.65	38.95	34.35	33.18	28.1
Calor específico (J/Kg °C)	515	595	737	833	841
Coef. De Convección	500	1000	2000	40	----

(W/m ² °C)					
-----------------------	--	--	--	--	--

Tabla 2. Propiedades físicas dependientes de la temperatura. Los datos de temperatura de austenización fueron introducidos al software entre 850 y 900 °C, como una condición inicial de temperatura uniforme. Las mediciones de los esfuerzos residuales fueron introducidas al software como una condición interna del material. La simulación por computadora de los esfuerzos térmicos fue resuelta utilizando un método secuencial acoplado a una condición inestable [7].

El elemento considerado dentro de ANSYS fue el plano 42, que es utilizado para modelos de dos dimensiones en estructuras sólidas. El elemento puede ser utilizado también como un elemento plano (esfuerzos planos o deformación plana), o como elemento axisimétrico. Los perfiles de temperatura simulados de las piezas, fueron obtenidos corriendo el software de análisis de elemento finito ANSYS, utilizando temperaturas diferentes en el medio de temple, en el rango de 50 a 70 °C para determinar el efecto de la temperatura del medio de temple sobre la distribución de las temperaturas en las piezas templadas.

3. RESULTADOS

3.1. Distribución de temperaturas

Como se ilustra en la figura 3, la distribución de temperaturas dentro de la pieza no es uniforme porque esta se enfría más rápidamente en las áreas azules (paredes internas) y permanece mas caliente en las áreas rojas las cuales corresponden al centro de la pieza.

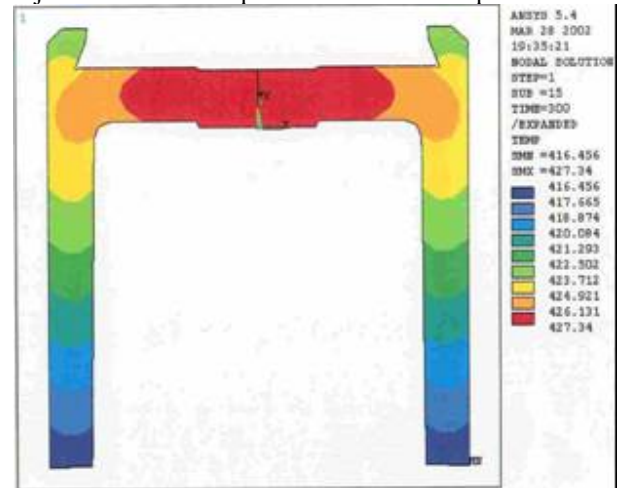


Figura 3. Perfil de temperaturas de la pieza templada a 70°C.

Si la temperatura del medio de temple es cambiada de 70 a 90°C (Figura 4), el perfil de temperatura dentro de la pieza cambia. Es importante notar que en la figura 3, la temperatura en las áreas azules no corresponde a la temperatura en las áreas azules de la figura 4. Lo mismo para las áreas rojas en ambas figuras, el área azul es simplemente el área más fría, y el área roja es simplemente el área más caliente de la pieza; es decir, en la figura 3 el área azul corresponde a una temperatura de

416 °C, y en la figura 4 el área azul corresponde a una temperatura de 680 °C.

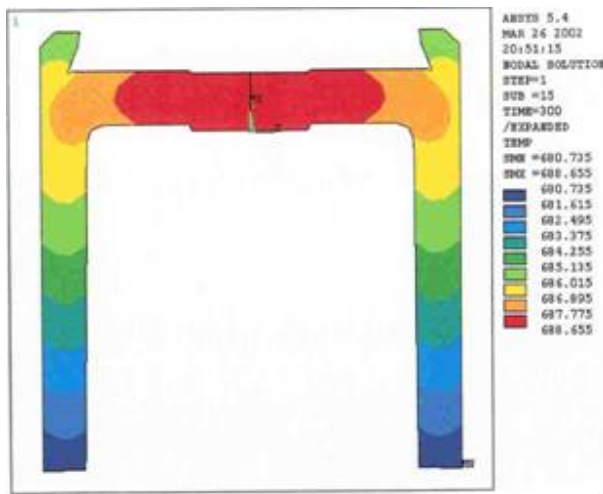


Figura 4. Perfil térmico de la pieza templada a 90 °C.

3.2 Esfuerzos térmicos

El resultado de la simulación mostró que la máxima distorsión dimensional en el área crítica después del templado fue de 1.04×10^{-5} m. Con un esfuerzo interno de $5,514 \text{ KN/m}^2$. Este cambio en dimensión no permite la operación completa de rectificadora en el diámetro interno de la pieza.

Si la condición del esfuerzo residual de tensión es cambiada a un esfuerzo de compresión con un valor de $-145,138 \text{ KN/m}^2$, el máximo cambio de distorsión dimensional calculado fue de 0.34×10^{-5} m en el área crítica del rectificado (Figura 5).

Con una condición de esfuerzo residual inicial de $-3.4 \times 10^3 \text{ KN/m}^2$, en cada etapa del proceso, es posible obtener la mínima distorsión en el área de rectificadora. Las figuras 5 y 6 muestran el campo de esfuerzos térmicos con los valores de esfuerzo inicial de $-145,138 \text{ KN/m}^2$, y $-34,323 \text{ KN/m}^2$, respectivamente.

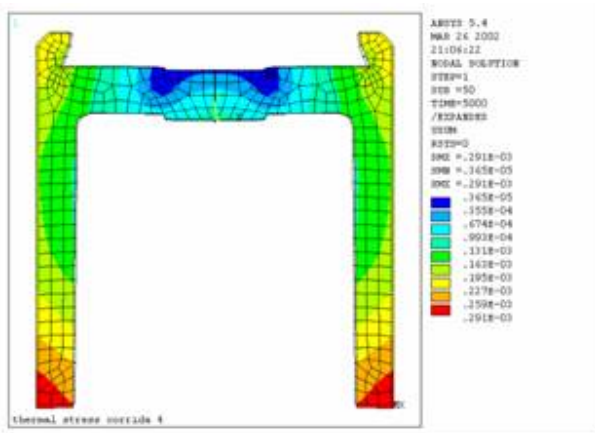


Figura 5. Cambios dimensionales de la pieza, con un esfuerzo inicial de $-145,138 \text{ KN/m}^2$

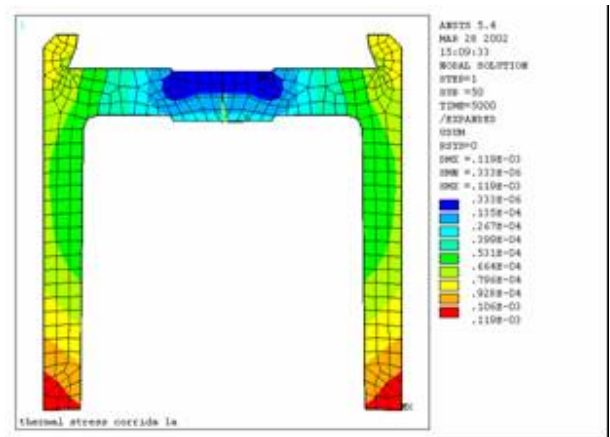


Figura 6. Cambios dimensionales de la pieza, con esfuerzo inicial de $-34,323 \text{ KN/m}^2$

3.3 Efecto de la temperatura de austenización sobre la máxima deformación

Cuando cambiamos la temperatura de austenización desde 880 a 925 °C, manteniendo los esfuerzos residuales constantes a ambas temperaturas, son obtenidos los valores máximos de deformación para cada temperatura de austenización. Las gráficas de temperatura de austenización contra máxima deformación a 3 diferentes niveles de esfuerzo residual son mostradas en la Figura 7a y 7b. Como se muestra en la gráfica, a altas temperaturas de austenización corresponden altos valores en el máximo de deformación, cuando templamos a 50 °C, comparado con el templado a 70 °C.

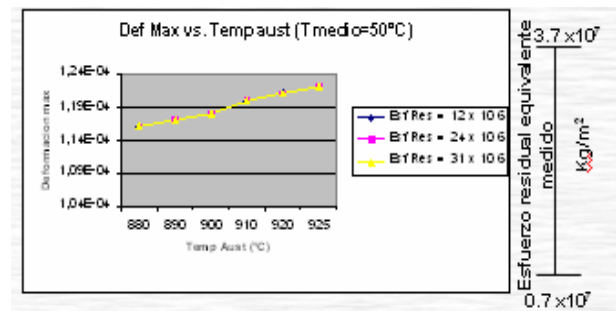


Figura 7a Grafico de Deformación Máxima vs. Temperatura de austenización, con tres valores de esfuerzo residual propuesto., y temperatura del medio de 50°C.

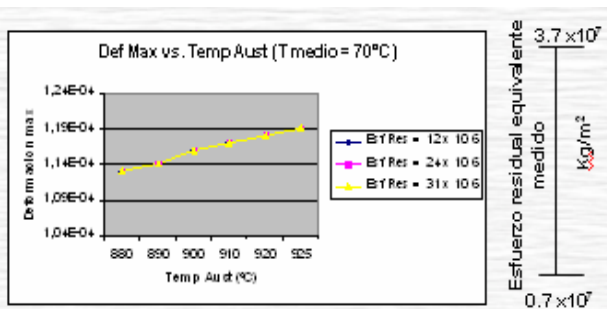


Figura 7b Grafico de Deformación Máxima vs. Temperatura de austenización, con tres valores de esfuerzo residual propuesto, y temperatura del medio de 70°C.

3.4 Efecto de la temperatura del medio de temple sobre la máxima deformación

Cuando la temperatura del medio de temple cambia desde 50 a 70 °C, manteniendo los esfuerzos residuales constantes a ambas temperaturas, se obtienen los valores de máxima deformación para cada temperatura del medio de temple. Las gráficas de la temperatura del medio de temple vs. la máxima deformación, son ilustradas en las Figuras 8a y 8b a tres diferentes niveles de esfuerzo residual. Se observa que a la menor temperatura del medio de temple, se obtienen los valores de máxima deformación.

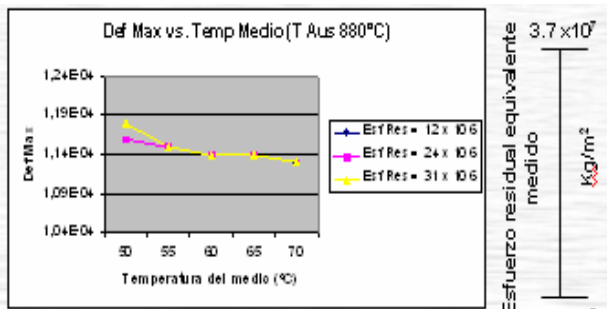


Figura 8a. Grafico de Deformación Máxima vs. Temperatura del medio de temple, con tres valores de esfuerzo residual propuesto, a una temperatura de austenización de 880 °C.

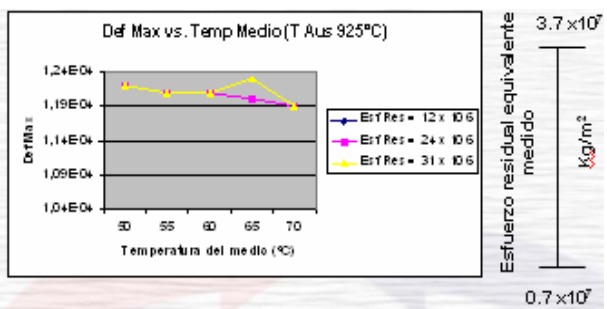


Figura 8b. Grafico de Deformación Máxima vs. Temperatura del medio de temple, con tres valores de esfuerzo residual propuesto, a una temperatura de austenización de 925 °C.

3.5 Efecto del esfuerzo residual sobre la máxima deformación

Cuando el esfuerzo residual cambia desde 117,679 KN/m², a 304,006 KN/m², manteniendo la temperatura del medio de temple constante, se obtienen los valores de deformación máxima que corresponden a cada esfuerzo residual. Las gráficas de Esfuerzo residual vs. Deformación Máxima a tres diferentes temperaturas del medio de temple son mostradas en las figuras 9 a y 9b. Se observa que las deformaciones máximas no son afectadas por los valores de esfuerzo residual.

Sin embargo a valores de temperaturas del medio de temple más bajos, los valores de deformación máxima son más altos, comparados con estos obtenidos a una mayor temperatura del medio de temple.

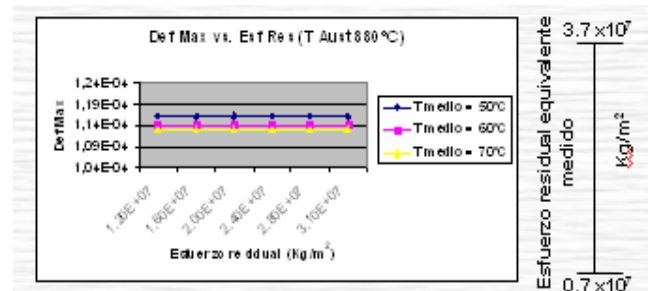


Figura 9a. Efecto del esfuerzo residual sobre la deformación máxima a tres diferentes temperaturas del medio de temple, y Temperatura de austenización de 880°C.

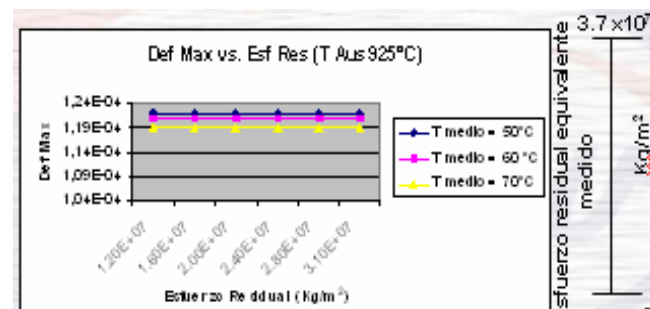


Figura 9b. Efecto del esfuerzo residual sobre la deformación máxima a tres diferentes temperaturas del medio de temple, y Temperatura de austenización de 925°C.

4. CONCLUSIONES

La simulación por computadora usada para el control de la distorsión dimensional fue utilizada para predecir la distribución de esfuerzos y perfiles de temperatura en piezas tratadas térmicamente.

Los puntos que se observan fuera del perfil, corresponden al nivel de esfuerzo cercano al límite de cedencia del material, y al uso de propiedades tales como el modulo de Young en función de la temperatura.

Los valores de esfuerzos obtenidos en las simulaciones, corresponden al rango de los valores medidos en el equipo de rayos X, por lo que podemos concluir que la aproximación por medio del modelo es adecuada.

La cantidad de piezas rechazadas después del rectificado puede ser considerablemente reducida por el

conocimiento de los esfuerzos residuales, y por el control de las condiciones correctas de la materia prima.

Se determinó que con temperaturas del medio de temple más bajas, la distorsión dimensional será mayor en las piezas templadas cuando la temperatura de austenización sea la misma.

Se determinó que con mayores temperaturas de austenización, la distorsión dimensional será mayor en las piezas templadas cuando la temperatura del medio de temple sea la misma.

Se determinó que con diferentes esfuerzos residuales, la distorsión dimensional no será afectada, cuando se temple a la misma temperatura.

Se determinó que la distribución de temperaturas en las partes templadas no es uniforme, y que las secciones más delgadas de la pieza se enfrían más rápidamente, incrementando la distorsión dimensional en dichas secciones.

Agradecimientos

El autor principal agradece al CIMAV y al CONACYT el apoyo recibido.

References

- [1] A.K. Sinha, Defects and Distortion in Heat-Treated Parts, ASM Handbook vol.4, Heat Treating, ASM (Ed.), Metals Park OH: American Society for Metals, 1995, pp.601.
- [2] H.W. Walton, Understanding and Controlling Distortion in Large Bearings Rings - Some Practical Aspects (Paper presented at the Second International Conference on Quenching and the Control of Distortion, Cleveland, Ohio, 4-7 November 1996, pp.143-148.
- [3] L. Zichao, E.V. Grandhi, and S. Raghavan, Distortion minimization during gas quenching process, Journal of Materials Processing Technology, 172 (2006), pp.249-257.
- [4] ASM (Eds.), Classification and Designation of Carbon and Low-Alloy Steels, ASM Handbook Vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys, Metals Park OH: American Society for Metals, 1995, pp.181.
- [5] ANSYS, Thermal Analysis Guide, read you 5.4, Conoburg, PA, 1999.
- [6] H.S. Carlow and J.C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, 1959, pp. 497.
- [7] X.L. Chen, L. Meekisho, Computer Simulation of Temperature and Thermal Stress Fields During Quenching Process (Paper presented at the Second International Conference on Quenching and the Control of Distortion, Cleveland, Ohio, 4-7 November 1996), pp.241-247.