

MODELADO DE LA DISTORSIÓN DURANTE EL TEMPLE DE PROBETAS C-RING DE ACERO AISI-SAE 4340

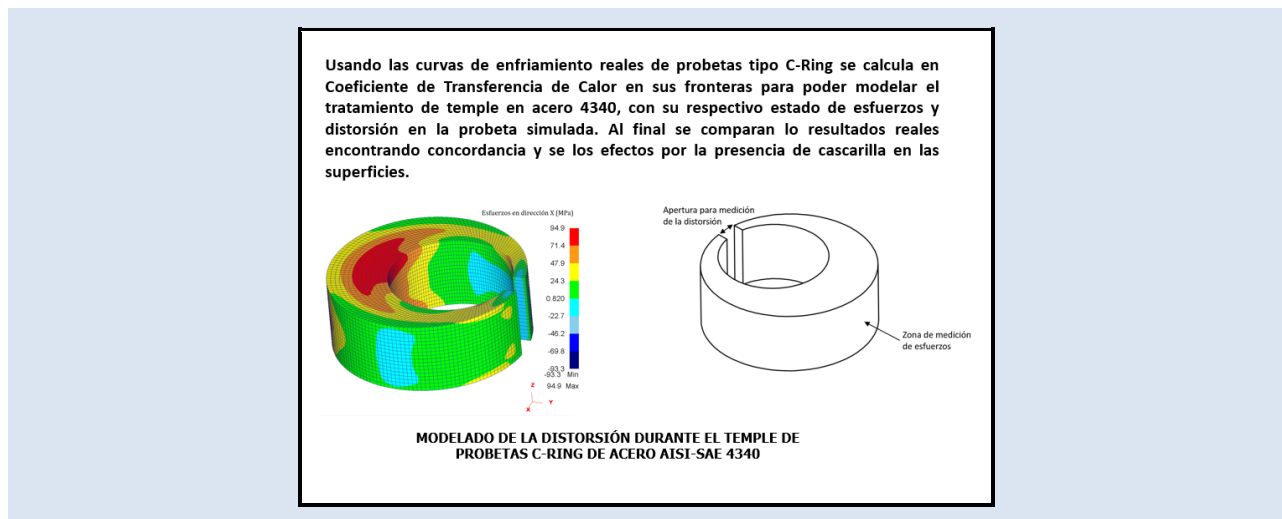
Israel Medina Juárez^{1*}, Ricardo Daniel López García², María Magdalena Reyes Gallegos¹, Carlos Puga Patlán¹, Marco Antonio González Melo³

1: Depto. de Postgrado e Investigación. Tecnológico Nacional de México. Campus Cd. Victoria. Ciudad Victoria. México.

2: Depto. de Ingeniería Mecánica. Tecnológico Nacional de México. Campus Cd. Victoria. Ciudad Victoria. México.

3: Consultor independiente, Zacatecas. México.

* e-mail: israel.mj@cdvictoria.tecnm.com



RESUMEN

El tratamiento térmico de temple es quizá la forma más común de adecuar las propiedades mecánicas en aceros, sin embargo, es también responsable de un alto porcentaje de rechazos de piezas manufacturadas, debido al gran número de variables de proceso que intervienen. Los defectos que más contribuyen al descarte en piezas templadas son la formación de grietas y la distorsión fuera de las tolerancias dimensionales. Las probetas del tipo C-Ring han sido utilizadas como un método de evaluar tanto las condiciones de temple en procesos industriales y de laboratorio y la templabilidad en aceros, aunado a esto, la disponibilidad de herramientas especializadas en la simulación con elementos finitos permiten diseñar modelos que repliquen el comportamiento real de aplicaciones industriales que permiten diseñar tratamientos de temple idóneos capaces de prever las condiciones de temple óptimas evitando los defectos conocidos.

Palabras Claves: Modelado, Distorsión, Temple, Transferencia de Calor.

MODELING OF DISTORTION DURING QUENCHING OF C-RING SPECIMENS OF AISI-SAE 4340 STEEL

ABSTRACT

The quenching heat treatment is, probably, the most common way to adjust the mechanical properties of steels, however, it is also responsible for a high percentage of rejections of manufactured parts, due to the large number of process variables involved. The defects that most contribute to scrap in hardened parts are cracking and distortion outside dimensional tolerances. The C-Ring type specimens have been used as a method of evaluating both the quenching conditions and the hardenability of steels in industrial and laboratory environments, in addition to this, the availability of specialized tools in finite elements simulation allow the design of models that replicate the real behavior of industrial applications that allow designing suitable quenching treatments capable of foreseeing the optimal conditions avoiding known defects.

Keywords: Modelling, Distortion, Quench, Heat Transfer.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria metal mecánica los tratamientos térmicos tradicionales son ampliamente utilizados para ajustar las propiedades de los aceros, en este sentido, el temple y revenido es el proceso más extendido entre la industria de fabricación de componentes mecánicos en la industria automotriz, aeroespacial, entre otras. Durante el temple ocurren importantes fenómenos metalúrgicos y mecánicos; como la transformación austenita-martensítica, contracciones térmicas, generación de esfuerzos internos y la distorsión, mismos que si no son previstos y bien controlados pueden ocasionar pérdidas por merma de piezas debido a defectos comunes como el agrietamiento y distorsiones excesivas que rebasan las tolerancias dimensionales.

Se ha demostrado que tanto las propiedades termomecánicas y la geometría en los aceros templados, están influenciados por las condiciones de enfriamiento tales como la temperatura de austenizado de la pieza, el medio de temple, su temperatura y la fluidonámica de la agitación, los cuales afectan la velocidad de transformación, el desarrollo de esfuerzos internos y la distorsión, esta compleja dinámica puede ser resumida en un coeficiente global llamado coeficiente de transferencia de calor (HTC por sus siglas en inglés) [1]. El HTC es utilizado en el modelado de tratamientos térmicos, determina la transferencia de calor por convección durante el enfriamiento de un material sólido en un medio fluido y su valor dependerá del flujo de calor medido experimentalmente a través de su superficie (total o parcial), calculándose mediante la ecuación de enfriamiento de Newton:

$$Q = hA\Delta T \quad (1)$$

Donde Q es el flujo de calor, A es el área superficial de calor y ΔT es la diferencia de temperatura entre el sólido y el fluido, h el coeficiente de transferencia de calor (HTC) con unidades W/m²K.

La historia térmica durante el enfriamiento de piezas de temple ha sido utilizada ampliamente por investigadores, académicos y responsables en las industrias de procesamiento de materiales metálicos, con la finalidad de comprender el comportamiento de la transferencia de calor de las

piezas tratadas térmicamente bajo diferentes condiciones de enfriamiento [2]–[6].

El uso de termopares en la superficie y núcleo de las piezas es una de las técnicas más confiables en la caracterización de la etapa de enfriamiento, permitiendo minimizar los errores de las lecturas y hacer cálculos precisos del HTC. Aunque a menudo el HTC es considerado como constante, esto puede ser válido solo para ciertos rangos de temperatura, sin embargo, la naturaleza del problema demuestra que la transferencia de calor durante la etapa de enfriamiento no presenta un comportamiento constante, sino, que varía de forma no lineal en función de la temperatura de la pieza y de las condiciones fluidonámicas del medio de temple, sin embargo, si las condiciones fluidonámicas se consideran estables se puede calcular con alta precisión el HTC en función de la temperatura superficial de las piezas tratadas, lo que se ha convertido en una tarea primordial en el sector industrial para comprender el comportamiento térmico y mecánico de las piezas templadas [7-9]. En la mayoría de estos trabajos se usa el método inverso propuesto por Beck para estimar el valor del HTC [10, 11].

Aunque en la literatura existe información limitada sobre la validación de la distorsión después del templado de piezas de acero con geometrías complejas, existen estudios [12] donde se ha evaluado dicha relación en piezas pequeñas con geometrías simples de modelar y de fácil medición [13-16], lo anterior debido a la complejidad de reproducir las irregularidades como el acabado superficial cuando se presentan daños o rugosidad preexistentes al tratamiento en tales piezas. Por tal motivo, algunos estudios que han utilizado el método de elementos finitos FEM para predecir la distorsión en aceros después del templado no han realizado mediciones experimentales complejas que validen en su totalidad los resultados simulados. Una geometría ampliamente utilizada para medir las distorsiones y la acumulación de esfuerzos residuales son los anillos C-Ring tanto en su versión estándar y modificada [17], este tipo de geometría aunque simple trata de reproducir las distintas condiciones geométricas que podrían encontrarse en una pieza real con diferentes espesores, aristas y propensión a la concentración de esfuerzos y la distorsión, siendo utilizada en los experimentos del presente trabajo de investigación. Al respecto, se han realizado diversas investigaciones para estudiar tanto las propiedades mecánicas y los

cambios en la geometría resultantes durante el tratamiento térmico de temple, así como; esfuerzos residuales, fracturas y transformaciones de fases involucradas [13], [17-22]. Manivannan y col. [17] evaluaron los cambios dimensionales y los esfuerzos residuales posterior a dos procesos de tratamiento térmico nitrocarburoción y carbonitruración, utilizando pruebas experimentales y simulación numérica, observando un mejor comportamiento en la distorsión cuando se utiliza la nitrocarburoción [19], estudiaron la distorsión en una pieza de anillo en C-Ring para un acero SAE 4140 a diferentes temperaturas de austenizado y con condiciones de agitación del baño líquido variables, los resultaron demostraron mejores resultados en las propiedades mecánicas cuando se tiene una buena agitación. Da Silva y Hernández-Morales [23, 24], estudiaron también el comportamiento de la distorsión, las propiedades mecánicas, los esfuerzos residuales y las transformaciones de fase después de un tratamiento térmico de temple para aceros con y sin transformación AISI 304 y AISI 4140 respectivamente, los resultados experimentales fueron comparados con los obtenidos con la ayuda software de simulación demostrando una buena concordancia. Otros trabajos relacionados como Boyle y col. [20] evaluaron la distorsión y los

esfuerzos residuales después del temple en aceros SAE 8620 en probetas tipo C-Ring encontrando una relación con la cantidad de austenita retenida y la distorsión presente en las piezas.

En este trabajo se busca determinar en primer lugar el coeficiente de transferencia de calor usando datos experimentales del enfriamiento de piezas templadas, además la geometría de las piezas utilizadas (C-Ring) permite medir la distorsión generada durante el temple, permitiendo evaluar las condiciones ideales para reducir efectos tales como la distorsión excesiva y la concentración de esfuerzos internos que pongan en riesgo la integridad de las piezas y deban ser descartadas durante el proceso. Además, el HTC calculado podrá ser utilizado para desarrollar un modelo usando el FEM que permita predecir los efectos de la distorsión en un ambiente simulado que facilita la toma de decisiones y el diseño de nuevos tratamientos térmicos y sus consecuencias.

2. PARTE EXPERIMENTAL

El acero usado en esta investigación es el AISI-SAE 4340 popular en la industria de componentes sometidos a tratamientos térmicos de temple como cigüeñales y árboles de levas, su composición química nominal se encuentra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química acero AISI SAE 4340.

<i>Elemento</i>	C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	S	P	Fe
<i>% wt.</i>	0.4	0.89	0.25	1.8	0.7	0.3	0.021	0.005	Balance

2.1 Ensayo de temple

Este acero fue recibido en la condición de normalizado y fue sometido a un tratamiento térmico de temple en aceite a 60 °C desde una temperatura de austenizado de 860 °C, la agitación en el baño de temple fue causado por una bomba periférica de 1 HP de potencia y tubería de 25 mm de diámetro por la que circulaban 100 litros por minuto de aceite.

Durante las inmersiones de un total de 9 probetas,

el historial térmico fue registrado con termopares tipo K sujetos a las probetas en dos posiciones como se aprecia en la figura 1; siendo T1 un termopar interno ubicado a la mitad del espesor de la probeta mientras que T2 es un termopar superficial. Esto con la intención de estimar el coeficiente de transferencia de calor (HTC) en las paredes de la probeta usando el método inverso [10].

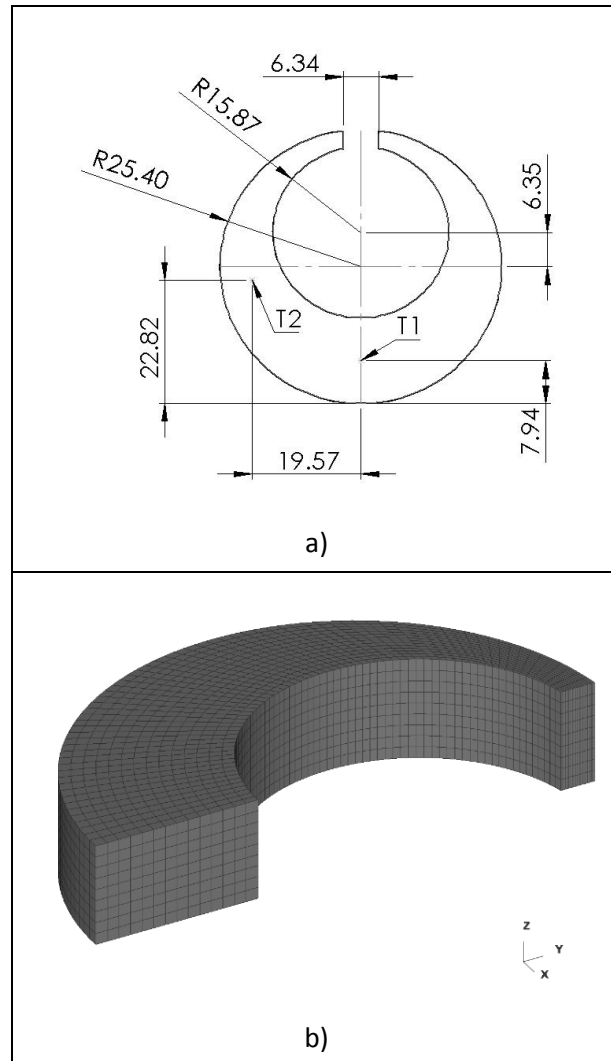


Figura 1. Probeta C-Ring usada; a) Posición de termopares, T1 termopar interno y T2 termopar superficial (dimensiones en mm), b) Probeta simulada.

2.2 Simulación

Las simulaciones de elementos finitos del tratamiento térmico de temple y las inmersiones se realizaron usando Deform 3D. La geometría simulada de las probetas corresponde a una sección de $\frac{1}{4}$ de la probeta real gracias a sus condiciones de simetría. Usando una malla de aproximadamente 9,000 elementos hexaédricos. Las condiciones a la frontera más importantes en esta simulación corresponden a la condición de transferencia de calor en las paredes de la probeta mediante el HTC calculado, ver figura 2.

Esta simulación contempla las transformaciones de

fase ocurridas durante el enfriamiento (Ec. 3), así como la contracción y expansión volumétrica de las fases como una función de la temperatura, esto se logra superponiendo las curvas de enfriamiento a las curvas de transformación [25] obtenidos de la base de datos JMatPro [26] así mismo los esfuerzos internos desarrollados durante el proceso que serán comparados con las mediciones reales.

$$\xi = 1 - \exp(-bt^n) \quad (3)$$

Donde ξ corresponde a la fracción transformada, t el tiempo isotérmico y b una constante en función de la temperatura, composición química y tamaño de grano.

Por otro lado la transformación martensítica que esta controlada mayormente por el fenómeno de la nucleación puede ser calculada con la ecuación de Koistinen Marburger [27], ver Ecuación 4.

$$\xi = 1 - \exp[-\alpha(M_s - T)] \quad (4)$$

Donde ξ , de nuevo representa la fracción Martensítica transformada, T es la temperatura, Ms marca el valor de temperatura donde se inicia la transformación y α una constante que indica la velocidad de transformación y dependerá de la composición química. Las propiedades termomecánicas de los materiales utilizados en las simulaciones se encuentran en la figura 3.

2.3 Medición de la distorsión y medición de esfuerzos residuales

La distorsión causada por el tratamiento térmico se ve reflejada mayormente por el comportamiento de la apertura de las probetas en C (ver figura 4b) que será medida con un micrómetro de interiores, por otro lado, los esfuerzos residuales en la parte posterior de las probetas con un difractor de rayos X portátil marca Stresstech modelo G2R que se aprecia en la figura 4a.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Validación térmica

La figura 5 muestra las curvas de enfriamiento reales, datos obtenidos mediante termopares y registrados en una tarjeta de adquisición de datos, contra las modeladas en el software numérico,

encontrando que existe un buen acuerdo en ambos termopares.

Por lo que las curvas de enfriamiento obtenidas validan el modelo térmico y el HTC calculado es confiable para ser utilizado como una condición de entrada en la simulación planteada.

3.2 Distorsión

En la tabla 2 se presenta la distorsión obtenida en la apertura de la probeta real y simulada.

Tabla 2. Distorsión en la apertura de la probeta.

Probeta	Distorsión en apertura (mm)
real	0.45
simulada	0.27

Se puede observar que las mediciones de distorsión reales y simuladas se encuentran en el mismo orden de magnitud, además concuerdan con el comportamiento de la apertura de las probetas reportado por otros autores en aceros similares templados en aceite [21], [28].

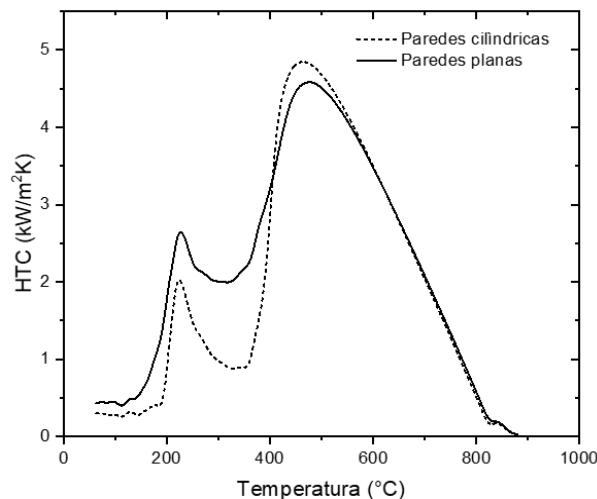


Figura 2. HTC calculado usado en las simulaciones.

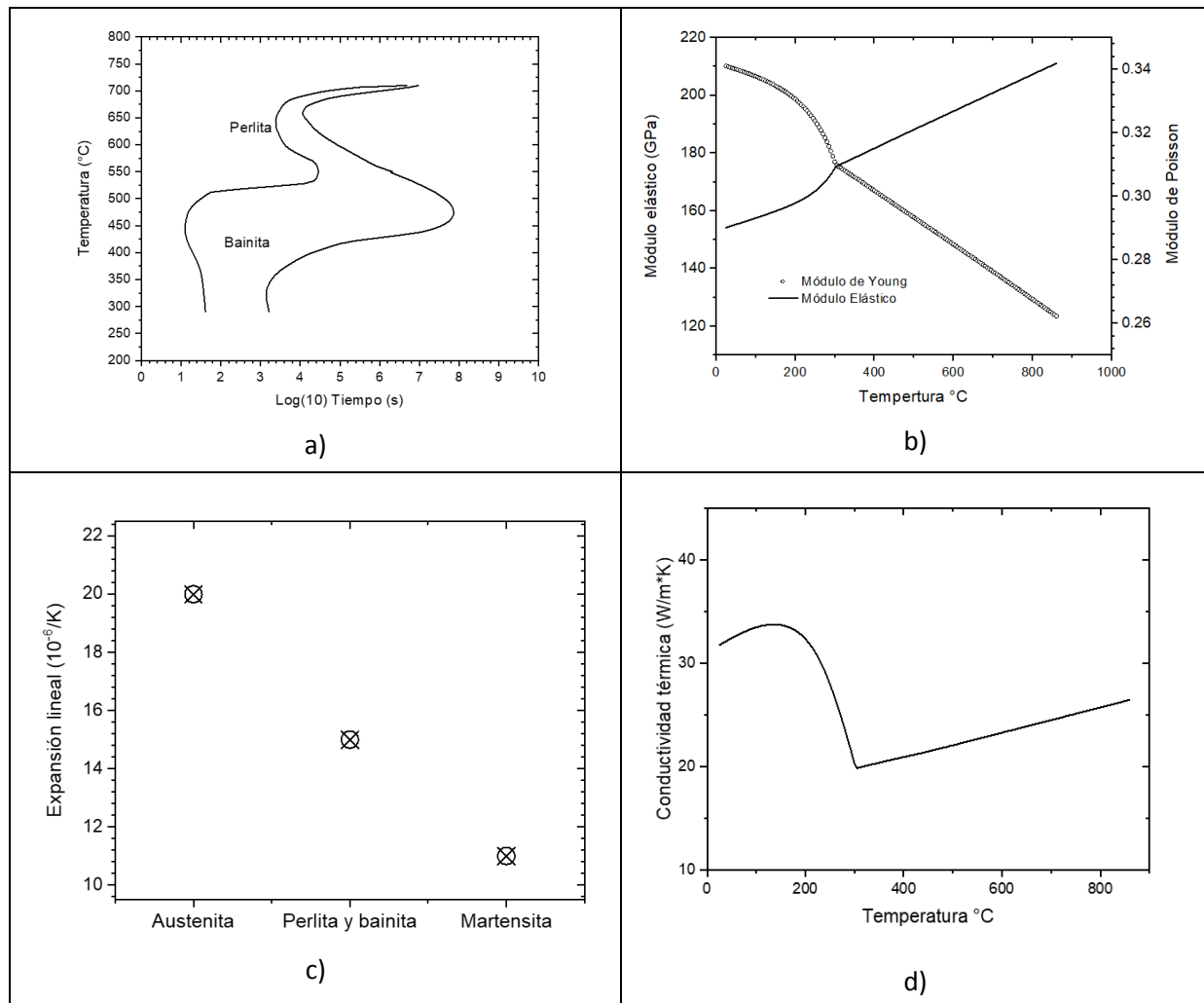


Figura 3. Propiedades usadas en la simulación, obtenidas en función de su composición química [26]; a) Diagrama TTT, b) Módulos de Poisson y módulo elástico, c) Expansión térmica y d) Conductividad térmica.

Las diferencias observadas pueden ser explicadas por la presencia de una capa de óxido en toda la superficie de las probetas al término del tratamiento térmico y que tuvo que ser eliminada antes de realizar las mediciones, aumentando la separación de las probetas medidas, el espesor de material sacrificado durante la oxidación no ha sido contemplado por el modelo, sin embargo autores como Hazan [29] muestran que el espesor de esta capa puede llegar a ser tan gruesa como 0.15 mm, para este acero y bajo condiciones de alta temperatura y atmósfera no controlada, por lo tanto

las mediciones empíricas mostradas en la tabla 2 se reportarían menores si se realizan las mediciones sin el decapado de la cascarilla, concordando aún mejor con la magnitud simulada. En este sentido, los trabajos encontrados en la literatura no reportan las condiciones atmosféricas del horno o mufla utilizados, en este trabajo fue utilizada una mufla atmosférica con el efecto que la oxidación pueda causar en un periodo de 40 minutos de la etapa de austenizado más la rampa de calentamiento de las piezas.

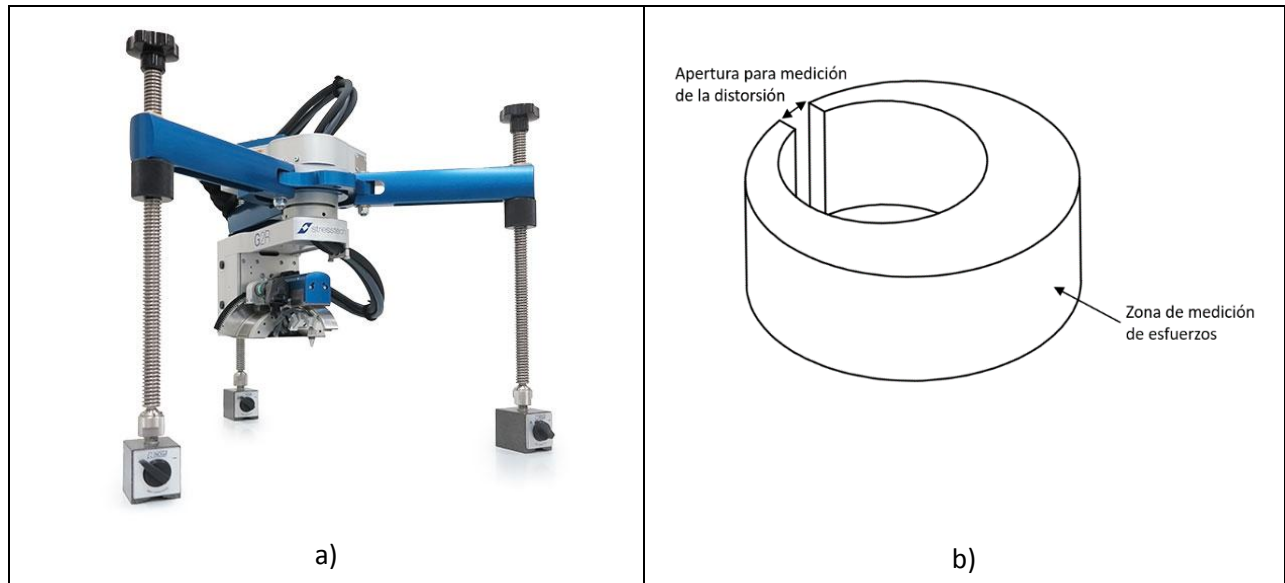


Figura 4. a) Difractómetro de rayos X portátil Stresstech G2R®, b) Zona de medición de esfuerzos.

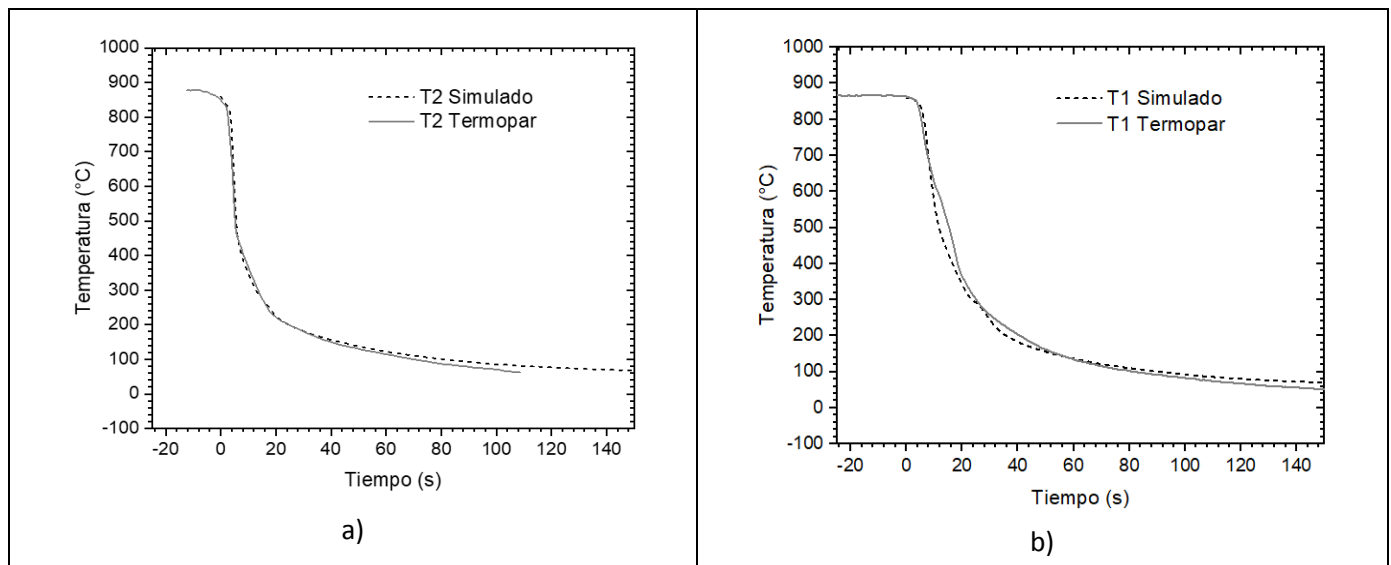


Figura 5. Curvas de enfriamiento reales y simuladas, a) Núcleo de la probeta y b) Termopar superficial.

3.3 Esfuerzos internos

Se realizaron mediciones de esfuerzos internos en la zona indicada en la figura 6 (parte posterior de las probetas), los resultados de las mediciones

mediante difracción de rayos X se muestran en la tabla 3.

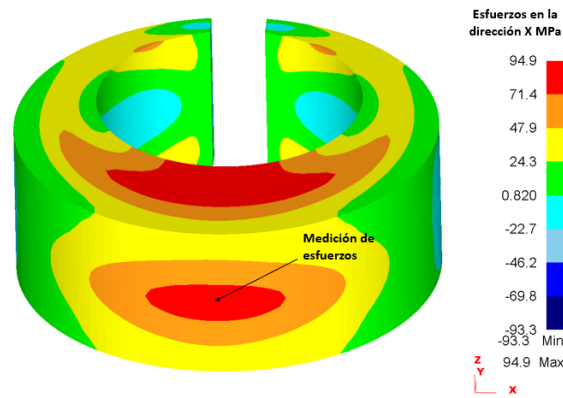


Figura 6. Valores de esfuerzo simulados en zona seleccionada.

Tabla 3. Esfuerzos internos, reales y simulados.

Probeta	Esfuerzos en dirección X (MPa)
real	78.06
simulada	80.9

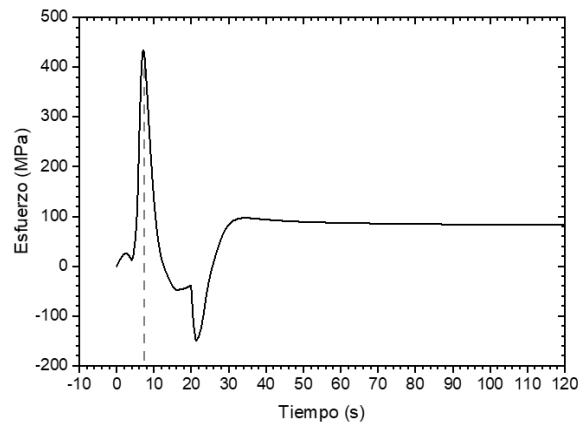


Figura 7. Evolución de esfuerzos de la zona seleccionada durante el temple.

Se puede apreciar que los esfuerzos obtenidos en la simulación corresponden con los encontrados en el método experimental, además en los resultados de la simulación se puede apreciar la evolución de los esfuerzos residuales en esa parte de la probeta, ver figura 8, los valores finales corresponden a un estado final que aunque no ha rebasado el límite elástico del material, durante su evolución ha registrado valores pico durante el desarrollo del enfriamiento, desde luego estos picos se ven

truncados al encontrarse con la fluencia del material, note la concordancia con el tiempo de máxima velocidad de enfriamiento en la figura 5. Lo antes descrito ha causado deformación plástica en las probetas, contribuyendo a la distorsión final alcanzada en la apertura medida.

4. CONCLUSIONES

El uso de probetas C-Ring puede ser empleado como mecanismo de control de las variables de proceso de un equipo de temple, sobre todo que al registrar sus valores de distorsión y estados de esfuerzos en zonas críticas se pueden tomar decisiones acerca de las mejores alternativas de procesamiento de piezas reales con geometrías más complejas que otros modelos no pueden capturar, como lo es el ensayo de Jominy, otros cilindros y estudios en probetas del tipo esferas que se encuentran en la literatura.

El uso ampliamente extendido de método inverso del problema de conducción de calor permite caracterizar el coeficiente de transferencia de calor con alto grado de eficacia para reproducir las condiciones reales en un modelo de elementos finitos.

Los valores de distorsión en la apertura de la geometría C-ring en este y en otros trabajos se encuentran en el mismo orden de magnitud, aunque la mayoría de los recursos encontrados en la bibliografía no mencionan la presencia de cascarilla causada por la oxidación en la etapa de empaque.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el fondo 15018.22-P.

Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Victoria por el uso de sus instalaciones.

6. REFERENCIAS

- [1] Totten G, Howes M, Inoue T. "Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel," ASM Int. Publ. (USA), 2002, p. 417–444.
- [2] Kobasko NI. J. ASTM Int. 2012; 9 (2)
- [3] Hasan HS, Peet MJ, Jalil JM, Bhadeshia H. Heat Mass Transf. 2011; 47 (3): 315–321.
- [4] Kim HK, Lee SH, Choi H. Materials (Basel). 2015; 8 (4): 2030–2042.
- [5] Taraba B, Duehring S, Španielka J, Hajdu S. J. Mech. Eng. 2012; 58 (2):102–106.
- [6] Kobasko NI. Mater. Perform. Charact. 2013; 2 (1): 468–488.
- [7] Chen N, Han L, Zhang W, Hao X. Mater. Lett., 2007; 61 (14–15): 3021–3024.
- [8] Penha RN, "Simulação da transferência de calor e das tensões residuais térmicas obtidas em estudos de têmpera," Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- [9] Smith D, "Computing the heat transfer coefficients for industrial quenching processes," En: Midea SJ, Pfaffmann GD (eds), Heat Treating: Proceedings of the 19th Conference, 1999, p. 325–334.
- [10] Beck JV, Litkouhi B, St. Clair CR. Numer. Heat Transf. 1982; 5 (3): 275–286.
- [11] Beck JV, Blackwell B, Haji-Sheikh A. Int. J. Heat Mass Transf. 1996; 39 (17): 3649–3657.
- [12] Şimşir C. "Modeling and simulation of steel heat treatment-prediction of microstructure, distortion, residual stress, and cracking," En: Dossett JL, Totten GE (Eds.), Steel Heat Treating Technologies, Metals Park, Ohio: ASM International, 2014, p. 409–466.
- [13] Sonar T, Lomte S, Gogte C, Balasubramanian V. Procedia Manuf. 2018; 20:113–118.
- [14] Li ZX, Zhan M, Fan XG, Wang XX, Ma F, Li R. J. Mater. Process. Technol. 2020; 279.
- [15] Farivar H, Prah U, Hans M, Bleck W. J. Mater. Process. Technol. 2019; 264: 313–327.
- [16] Cho JR, Kang WJ, Kim MG, Lee JH, Lee YS, Bae WB. J. Mater. Process. Technol. 2004; 153–154 (1–3): 476–481.
- [17] Manivannan M, Northwood DO, Stoilov V. Int. Heat Treat. Surf. Eng. 2014; 8 (4): 168–175.
- [18] D. O. Northwood, L. He, E. Boyle, and R. J. Bowers, "Retained Austenite - Residual Stress - Distortion Relationships in Carburized SAE 6820 Steel," *Mater. Sci. Forum*, vol. 539–543, pp. 4464–4469, 2007, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.539-543.4464.
- [19] Yu H, Yang M, Sisson RD. Met. Sci. Heat Treat., 2021; 63 (3–4): 220–228.
- [20] Boyle E, Bowers R, Northwood DO. SAE Tech. Pap. 2007.
- [21] Nunes MM, Da Silva EM, Renzetti RA, Brito TG, Mater. Res. 2018; 22 (1): 1–7.
- [22] Nan C, Northwood DO, Bowers RJ, Sun X, Bauerle P. Trans. Eng. Sci. 2009; 62: 13–25.
- [23] Da Silva AD, Pedrosa TA, Gonzalez-Mendez JL, Jiang X, Cetlin PR, Altan T. Mater. Des. 2012; 42: 55–61.
- [24] Hernández-Morales B, Téllez-Martínez J, Prasanna Kumar T. "Benchmarking of mathematical models for quenching operations: a proposal," En Thermal Process Modeling 2014: Proceedings from the Fifth International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation, 2014, p. 286.

- [25] “DEFORM User’s Manual.” Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, Ohio.
- [26] “JMatPro.” Sente Software Ltd., Guildford GU2 7YG, U.K.
- [27] Koistinen DP, Marburger RE. Acta Metall. 1959; 7 (1): 59–60.
- [28] Da Silva AD, Pedrosa TA, Gonzalez-Mendez JL, Jiang X, Cetlin PR, Altan T, Mater. Des. 2012; 42: 55–61.
- [29] Hazan E, Sadia Y, Gelbstein Y. Corros. Sci. 2013; 74: 414–418.

7. MINIBIOGRAFÍA DE AUTORES

ISRAEL MEDINA JUÁREZ Recibió el grado de Dr. En Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados de Instituto Politécnico Nacional en 2020. Actualmente adscrito al programa de Maestría en Ingeniería Industrial de Tecnológico Nacional de México campus Cd. Victoria. Sus intereses en la investigación se centran en ingeniería de materiales e ingeniería industrial. (ORCID: 0000-0001-8633-8157).

RICARDO DANIEL LOPEZ GARCÍA Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica por es CINVESTAV Unidad Saltillo, profesor titular en la carrera de Ingeniería mecánica en el Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Victoria Tamaulipas. Sus intereses comprenden tópicos de ingeniería mecánica y metalurgia física, e ingeniería industrial. (ORCID: 0000-0002-2662-6103).

MARÍA MAGDALENA REYES GALLEGOS Maestra en Dirección de Empresas con especialización en Administración Estratégica, actualmente catedrática del Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria. (ORCID: 0000-0002-0080-8902)

CARLOS PUGA PATLAN Actualmente se encuentra inscrito como alumno de la carrera de Maestría en Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Victoria, Su trabajo de tesis se enfoca en aplicaciones industriales de los tratamientos térmicos y el mejoramiento de los procesos industriales relacionados. (ORCID: 000-0002-2938-8948)

MARCO ANTONIO GONZALEZ MELO A fungido por 3 años como asistente de profesor en CINVESTAV IPN Saltillo en la materia de Fluidodinámica Computacional relacionada con los tópicos de mecánica de fluidos, modelación CAD, termodinámica y fenómenos de transporte. Dr. En Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y cerámica por el mismo instituto, Instructor del Curso Especialización en ANSYS Fluent en el ramo industrial. Actualmente se desempeña como consultor/investigador independiente. (ORCID: 0000-0003-1613-3468)