

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA TÊMPERA DE UM CILINDRO DE AÇO AISI 4140

Edwan Anderson Ariza Echeverri ¹

André Paulo Tschiptschin ²

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar a distribuição das tensões residuais que resultam da combinação das variações volumétricas resultantes dos gradientes térmicos e das transformações de fase que ocorrem durante a têmpera de um cilindro de aço AISI/SAE 4140. O modelo matemático usado para este objetivo utiliza o software AC3 de modelagem de tratamentos térmicos (curvas de transformação, curvas de resfriamento e a microestrutura do material), para alimentar um modelo de elementos finitos, considerando acoplamento termomecânico e comportamento não linear elasto-plástico, para previsão de tensões residuais em cilindros de aço 4140 temperados. São apresentados, também, os resultados de observações metalográficas que confirmam, quantitativa e qualitativamente, as previsões do software AC3. A verificação do modelo numérico é efetuada por meio da medida das tensões residuais pela técnica de difração de raios X. A simulação numérica, por elementos finitos, evidencia a existência de tensões residuais de compressão, da ordem de 350 MPa, na região superficial após têmpera e indica de que as tensões mais significativas são as tangenciais.

Palavras-chave: Modelagem; Método de elementos finitos; Têmpera; Tensão residual.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES GENERATED DURING HARDENING OF AISI 4140 BAR

Abstract

The aim of this work is to analyze the distribution of residual stresses resulting from the combination of volumetric changes due to heat gradients and phase changes occurring during the quenching process of an AISI/SAE 4140 steel cylinder. The mathematical model used for this objective is the AC3 modeling software of thermal treatments (transformation curves, cooling curves and microstructure), whose results were input in an finite element model, considering thermal-mechanical coupling and non-linear elastic-plastic behavior, aiming the assessment of residual stresses in quenched 4140 steel cylinders. The observed microstructure confirms quantitatively and qualitatively the previsions of the AC3 Software. The results of the modeling are compared with the residual stresses measurements made using X-Ray diffraction techniques. The finite element numerical simulation shows the existence of 350 MPa compressive residual stresses in the surface region and indicates that the most significant stresses are tangential.

Key words: Modeling; Finite element method; Quenching; Residual stress.

I INTRODUÇÃO

No processo de têmpera, é necessário controlar a taxa de resfriamento a fim de melhorar as propriedades mecânicas e, além disso, evitar a formação de trincas e distorções, resultantes tanto das tensões térmicas que se desenvolvem devido aos gradientes de temperatura, quanto das tensões de transformação originadas pelas variações volumétricas decorrentes da decomposição

da austenita em agregados de ferrita e carbonetos ou em martensita. A têmpera é, portanto, um problema complexo que envolve o acoplamento entre fenômenos térmicos, de transformação de fase e mecânicos, no qual existe a dificuldade de controlar a microestrutura para obter as propriedades mecânicas desejadas e ao mesmo tempo limitar o desenvolvimento das tensões residuais e deformações sofridas pela peça durante o processo.

¹Matemático. Estudante de Mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, Av. Prof. Mello Moraes, 2463, Cidade Universitária, Cep 05508-030, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: andersonariza@usp.br

²Engenheiro Metalúrgico. Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, Av. Prof. Mello Moraes, 2463, Cidade Universitária, Cep 05508-030, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: antschip@usp.br

A previsão de tensões residuais desenvolvidas durante a têmpera vem sendo estudado intensamente na literatura; vários trabalhos são encontrados utilizando diferentes metodologias de modelagem. Arimoto et al.⁽¹⁾ apresentam trabalho de revisão sobre trincas de têmpera e classificam os métodos de ensaio existentes. Os mesmos autores⁽²⁾ conduziram, no ano de 2006, uma pesquisa em que tentam explicar a origem da distorção e das tensões residuais em cilindros temperados, usando um método de análise acoplado, incorporando modelos de transformações de fases, utilizando o método dos elementos finitos. Em cilindros escalonados de aço AISI 4140, Ehlers, Müller e Löhe⁽³⁾ fizeram medidas experimentais e simulação das tensões residuais e da distorção devidas ao processo de têmpera por imersão em água e óleo, com o fim de analisar a forte influência da direção do mergulho, comportamento do resfriamento e as tensões residuais resultantes. Denis et al.⁽⁴⁻⁶⁾ analisam por modelos acoplados de transformações de fase, o efeito da deformação plástica sobre a distribuição de tensões residuais, estudando o efeito das tensões residuais sobre a transformação de fase, a cinética da transformação e as interações metalúrgicas e mecânicas. Os trabalhos mencionados indicam a importância de se obter conhecimentos quantitativos precisos dos parâmetros térmicos, mecânicos e metalúrgicos envolvidos na geração de tensões em diferentes condições de resfriamento. Indicam, também, a necessidade de elaboração de modelos e simulações numéricas transientes, por elementos finitos ou por diferenças finitas, capazes de descrever os processos que ocorrem na peça durante a têmpera, as deformações originadas no resfriamento, a evolução da temperatura e da microestrutura, e a forma com que as tensões residuais se distribuem durante e após o tratamento térmico de têmpera em aços. Os conhecimentos destas variáveis e de suas interações permitem otimizar o processo de têmpera, a microestrutura do material e as propriedades mecânicas associadas.

No presente trabalho, é feita a modelagem das tensões desenvolvidas durante a têmpera em água, com agitação, de um aço AISI/SAE 4140, utilizando programa de elementos finitos. Para este objetivo foi desenvolvido um software capaz de alimentar o programa ABAQUS/Standard[®] de elementos finitos com as microestruturas resultantes de tratamentos térmicos de aços para construção mecânica, previstas pelo software AC3. O software AC3 prevê as curvas de transformação, evolução da temperatura, as curvas de resfriamento, a dureza e a microestrutura do material em várias posições entre a superfície e o centro do cilindro. As porcentagens transformadas de cada uma das fases, obtidas utilizando o programa AC3, são consideradas para determinar as propriedades mecânicas introduzidas no ABAQUS/Standard[®]. Para a previsão da evolução das tensões residuais e das deformações, são incluídos os valores das propriedades mecânicas e físicas levando em conta a dependência da temperatura e as fases presentes em função do tempo de tratamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado um cilindro de 100 mm de comprimento e 25,4 mm de diâmetro, de aço de médio carbono AISI/SAE 4140. As análises de composição química (Tabela 1) foram feitas utilizando as técnicas de espectroscopia de plasma e método de combustão (C, S). Na Tabela 1, observa-se que o aço estudado apresenta composição química dentro da faixa especificada pela norma SAE J404/09.

Para o tratamento térmico de têmpera, a peça cilíndrica foi austenitizada a 850°C por 1 hora, colocada em caixa coberta com carvão para evitar o fenômeno de descarbonetação e, posteriormente, submetida a tratamento térmico de têmpera em um banho de água com agitação.

A análise metalográfica foi feita seguindo o procedimento metalográfico convencional, com posterior ataque com o reagente químico Le Pera modificado,⁽⁷⁾ constituído por uma parte de 1% metabissulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) diluído em água e duas partes de 4% de ácido pícrico ($\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$) diluído em álcool etílico. Após a realização do ataque químico foram feitas as análises de estereologia quantitativa com auxílio do software Image J⁽⁸⁾ e com a técnica de contagem de pontos, segundo a norma ASTM E562-02.⁽⁹⁾

A verificação do modelo computacional foi efetuada pela medição das tensões residuais, utilizando a técnica de difração de raios X e o método de $\text{sen}^2\psi$, de acordo com a norma ASTM E 1426-98,⁽¹⁰⁾ em difratômetro Rigaku Rint 2000 com tubo de anodo de cromo ($\text{CrK}\alpha = 2,29100 \text{ \AA}$), variação do ψ de -50° a 50° com intervalos de 10 segundos. O ângulo 2θ foi variado de $154,1^\circ$ a $157,7^\circ$ com passo de 0,2, referente aos planos (211). Para isso, as superfícies das amostras foram lixadas até a grana 1200, antes do tratamento térmico. Após o tratamento térmico a superfície foi lixada somente com grana 1200, a fim de evitar erros na leitura da difração devido à oxidação ou rugosidade da superfície.

2.1 Software AC3 e AC3 Converter

O software AC3⁽¹¹⁾ calcula matematicamente a evolução da microestrutura em qualquer ponto da peça, ao longo do tempo, pela sobreposição da curva de resfriamento no diagrama de resfriamento contínuo. As curvas de resfriamento são calculadas usando a condutividade térmica, a capacidade calorífica, a temperatura do meio de têmpera e o coeficiente de transferência de calor para a superfície.⁽¹²⁾ O programa AC3 divide a curva de resfriamento em 54 intervalos iguais e avalia o estado de

Tabela 1. Composição química do aço AISI 4140

Composição (%)							
C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si	S	P
0,39	0,87	0,12	1,01	0,17	0,17	0,025	0,018

transformação para cada ponto, determinando se o ponto está em uma região de transformação, fornecendo quanto de cada fase ou microconstituente se forma no interior do material, na região considerada. Esse software possui uma biblioteca de aços para construção mecânica, mas também permite adicionar novos materiais, o que permite fazer as análises da cinética da transformação para diversas composições químicas e condições de tratamento térmico.

O modelo matemático elaborado utiliza as informações fornecidas pelo software AC3 de modelagem de tratamentos térmicos: (a) curvas de transformação; (b) curvas de resfriamento; (c) microestrutura em 20 posições entre a superfície e o centro do cilindro, para alimentar o modelo não linear elasto-plástico de acoplamento termomecânico desenvolvido pelo método dos elementos finitos.

Para facilitar a análise dos dados de simulações do AC3 e o acoplamento entre o AC3 e o modelo de elementos finitos, foi desenvolvido o programa AC3 Converter escrito em linguagem Java.⁽¹³⁾ O programa AC3 Converter, que utiliza a biblioteca de interfaces gráficas SWT⁽¹⁴⁾, exibe uma caixa de texto na qual se lê a saída da simulação realizada pelo AC3 (Figura 1a) gerando uma tabela conforme ilustra a Figura 1b, com a fração de cada constituinte em cada anel.

2.2 Método dos Elementos Finitos – MEF

Para determinar os resultados das tensões ao final do tratamento térmico de têmpera, foi feita a simulação envolvendo a análise termomecânica acoplada com os

efeitos das transformações de fase. A modelagem realizada na previsão dos campos de tensões e deformações foi desenvolvida no software ABAQUS 6.9 de modelagem não linear por elementos finitos. Foram consideradas as propriedades elasto-plásticas do material em função da temperatura e da fração parcial de cada constituinte. Como a geometria analisada é cilíndrica é utilizada, uma representação axissimétrica na geração da malha de elementos finitos, com 13.320 elementos de ordem geométrica quadrática CAX4T. O modelo foi alimentado com a divisão do modelo axissimétrico em vinte fatias, cada uma delas tendo propriedades físicas e mecânicas diferentes segundo as frações volumétricas transformadas.

2.3 Propriedades Físicas e Mecânicas

A modelagem numérica computacional das tensões residuais é fortemente influenciada pela correta seleção das propriedades físicas e mecânicas do material e da consideração destas, em função da temperatura e das fases presentes durante o resfriamento.

As Tabelas 2 a 4 apresentam as propriedades térmicas e mecânicas relevantes para a análise do desenvolvimento das tensões residuais de têmpera⁽¹⁵⁾ em função da temperatura. Estas equações foram obtidas a partir da interpolação dos resultados obtidos por Schröder⁽¹⁶⁾ e Pietzsch⁽¹⁷⁾ tendo como resultados diversos polinômios para temperaturas (T) que variam, entre 0°C e 900°C. Os valores para o cálculo das expansões térmicas⁽¹⁸⁾ da austenita, martensita e bainita foram $2,1 \times 10^{-5}$; $1,3 \times 10^{-5}$; $1,4 \times 10^{-5}$, respectivamente.

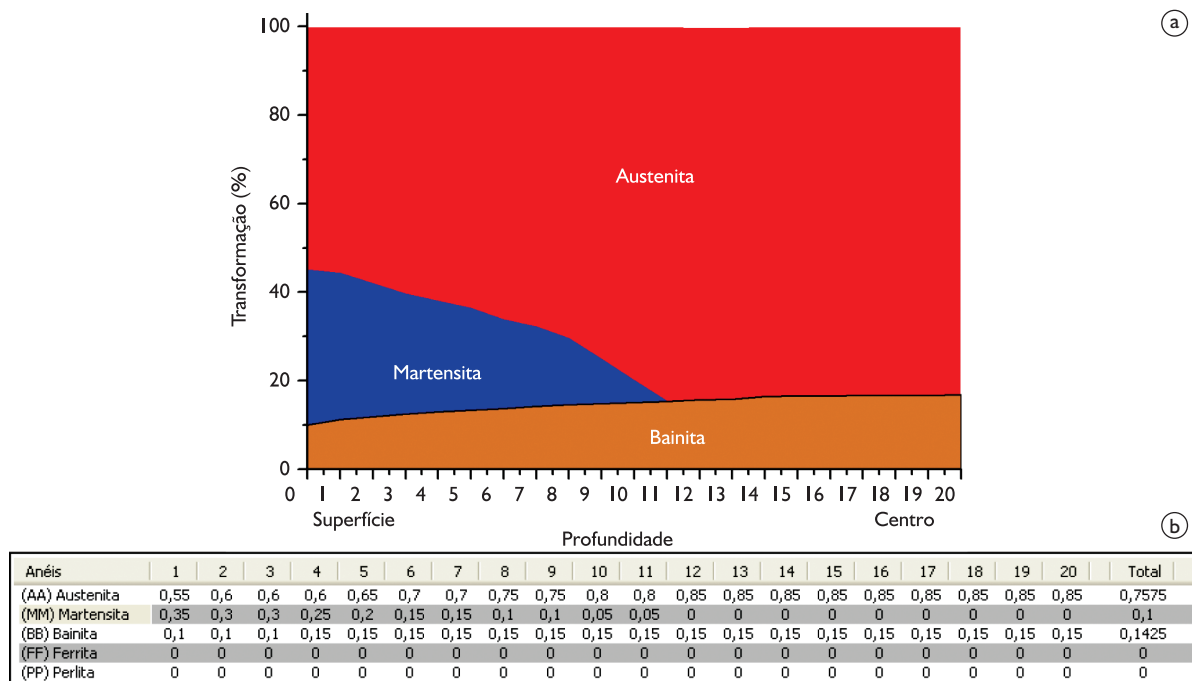


Figura 1. (a) Imagem de saída do AC3 em um passo intermediário da simulação. Os campos em vermelho, azul e laranja, representam austenita, martensita e bainita, respectivamente; (b) Tela do programa AC3 Converter.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As micrografias correspondentes às regiões superficial, intermediária e central, respectivamente, são apresentadas na Figura 2, onde se observam algumas regiões da micrografia com estrutura bainítica em forma de finas ripas paralelas, com tonalidade escura, dispersas em uma matriz de martensita em tonalidade mais clara.

Os resultados da análise quantitativa das microestruturas formadas após o processo de têmpera, para o aço AISI 4140, estão apresentados na Tabela 5. Esses resultados mostram um comportamento transversal homogêneo da bainita.

A partir dos resultados das análises quantitativas das microestruturas formadas em cada região transversal do cilindro, é possível calcular o diagrama de resfriamento contínuo mais próximo ao tratamento térmico feito e suas correspondentes porcentagens microestruturais, como apresentado na Figura 3. Observa-se que, devido ao processo de resfriamento em água com agitação, as curvas

de resfriamento da superfície e o centro apresentam uma diferença de temperatura no início do processo. Aproximadamente aos 15 segundos, elas cortam o campo bainítico pelo menos em uma pequena extensão.

Os resultados quantitativos de cada constituinte no interior do material são mostrados na Figura 4. No caso estudado, tem-se 90% de martensita e 10% de bainita na região superficial; nas regiões intermediária e central, uma estrutura com 85% de martensita e 15% de bainita.

3.1 Difração de Raios X

Na Figura 5 estão apresentados os resultados de tensão residual nos sentidos axial e tangencial, gerados pelo difratômetro de raios X, que relaciona o ângulo 2θ (eixo vertical) com o $\text{sen}^2\psi$ (eixo horizontal). No sentido radial não foram feitas medidas de tensão residual por difração de raios X, visto que as simulações prévias e a revisão da literatura apresentam resultados pouco significativos nessa direção.

Tabela 2. Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

Constituinte	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Austenita	$-6 \times 10^{-9}T^3 + 6 \times 10^{-6}T^2 - 0,084T + 200$	$8 \times 10^{-11}T^3 - 7 \times 10^{-8}T^2 + 7 \times 10^{-5}T + 0,29$
Martensita	$-6 \times 10^{-5}T^2 - 0,033T + 200$	$8 \times 10^{-11}T^3 - 9 \times 10^{-8}T^2 + 7 \times 10^{-5}T + 0,28$
Bainita	$2 \times 10^{-8}T^3 - 0,0001T^2 + 0,016T + 200$	$2 \times 10^{-11}T^3 - 3 \times 10^{-8}T^2 + 6 \times 10^{-5}T + 0,28$

Tabela 3. Condutividade térmica e calor específico

Constituinte	Condutividade térmica (W/m.°C)	Calor específico (J/kg.°C)
Austenita	$-6 \times 10^{-9}T^3 + 9 \times 10^{-6}T^2 + 8 \times 10^{-3}T + 15$	$-4 \times 10^{-8}T^3 + 4 \times 10^{-5}T^2 + 9 \times 10^{-2}T + 532$
Martensita	$-1 \times 10^{-6}T^2 - 2 \times 10^{-2}T + 43$	$6 \times 10^{-8}T^3 - 8 \times 10^{-5}T^2 + 0,3T + 484$
Bainita	$-1 \times 10^{-9}T^3 - 2 \times 10^{-6}T^2 - 2 \times 10^{-2}T + 49$	$5 \times 10^{-8}T^3 - 8 \times 10^{-5}T^2 + 0,3T + 484$

Tabela 4. Limite de escoamento e expansão volumétrica

Microconstituinte	Limite de escoamento (MPa)	Expansão volumétrica ⁽¹⁸⁾
Austenita	$31 \times 10^{-8}T^3 - 43 \times 10^{-5}T^2 + 0,04T + 298$	A → M = 4,428
Martensita	$-0,001T^2 - 0,1T + 1000$	A → Bi = 4,068
Bainita	$1 \times 10^{-9}T^4 - 30 \times 10^{-7}T^3 + 18 \times 10^{-4}T^2 + 0,65T + 549$	A → Bs = 3,756

A, M, B_i e B_s representam austenita, martensita e bainita inferior e superior, respectivamente

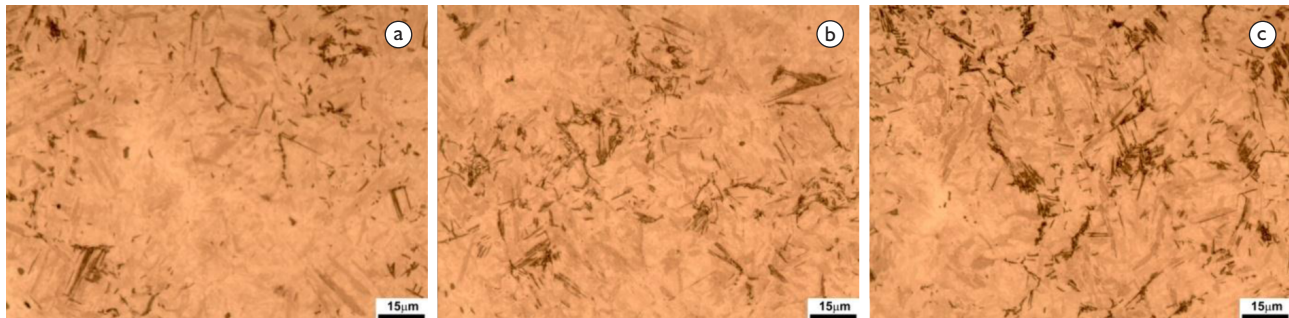


Figura 2. Microestrutura da peça temperada em água: (a) Superfície; (b) Intermediário; (c) Centro. Ataque Le Pera modificado. Aumento: 1.000×.

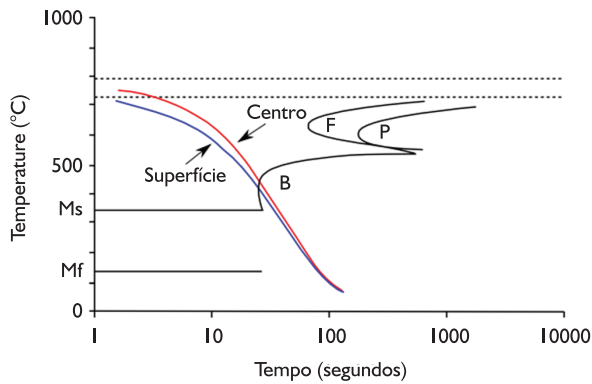


Figura 3. Curva de resfriamento contínuo para o aço AISI 4140 após tempera em água. As linhas M_s e M_f indicam o início e o fim da transformação martensítica. B, F e P indicam os campos bainítico, ferrítico e perlítico, respectivamente.

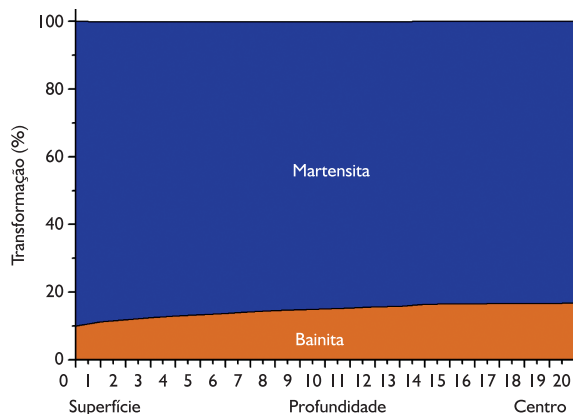


Figura 4. Ilustração do estado final da microestrutura após tempera, indicando as porcentagens de cada microestrutura através da seção transversal do cilindro para o aço AISI 4140.

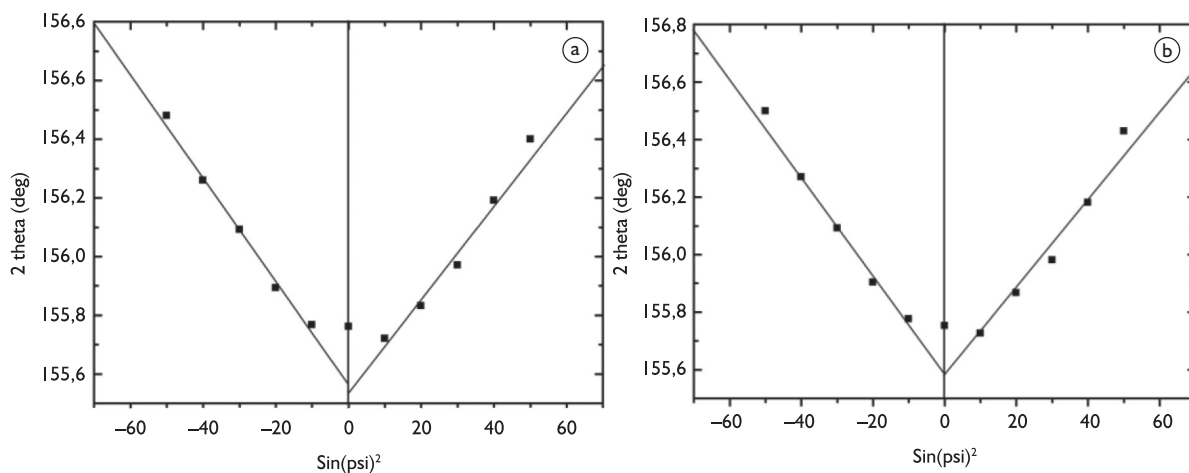


Figura 5. Tensão residual para o aço AISI 4140 temperado em água com agitação. Gráfico gerado pelo difratômetro de raios X Rigaku Rint 2000; (a) Axial; (b) Tangencial.

Tabela 5. Distribuição das frações volumétricas após tempera

Microconstituente (%)	Superfície	Intermediário	Centro
Bainita	11 ± 3	14 ± 2	16 ± 2
Martensita	89 ± 2	86 ± 1	84 ± 2

Os resultados das medições no sentido axial e tangencial, e as médias dos valores de tensão residual para o caso estudado estão descritos na Tabela 6.

Observa-se da Figura 5 que a distribuição das curvas de $(+\psi)$ e $(-\psi)$ está disposta simetricamente, indicando uma distribuição homogênea da tensão residual para ambos os lados, indicativo de uma boa preparação superficial da amostra antes e depois do tratamento térmico e, além disso, ao correto alinhamento do feixe de difração incidente sobre a amostra.

3.2 Método dos Elementos Finitos

A Figura 6 mostra os campos de tensões residuais resultantes na direção radial, tangencial e axial em um quarto do cilindro. Nota-se que, na superfície, as tensões tangenciais são maiores.

Dada a importância que representam os campos de tensões através da seção transversal do componente, são levantados os perfis de tensão residual ao longo de uma trajetória radial no meio do cilindro (Figura 7a). Os resultados de tensões axial, tangencial e radial ao longo dessa trajetória estão apresentados na Figura 7b.

Os resultados das Figuras 6 e 7 mostram um estado predominante de tensão em compressão na superfície, tanto para a tensão tangencial, quanto para tensão axial. Os resultados ao longo da trajetória escolhida estão resumidos na Tabela 7.

Os comportamentos destas tensões concordam de forma qualitativa com o relatado na literatura.^(6,19,20)

Tabela 6. Resultados das medições de tensão residual pelo método de difração de raios X

Amostra	Medições		Média entre (+ ψ) e (- ψ) (MPa)
4140	Axial	+ ψ	-336 ± 22
		- ψ	-371 ± 14
	Tangencial	+ ψ	-347 ± 20
		- ψ	-380 ± 9

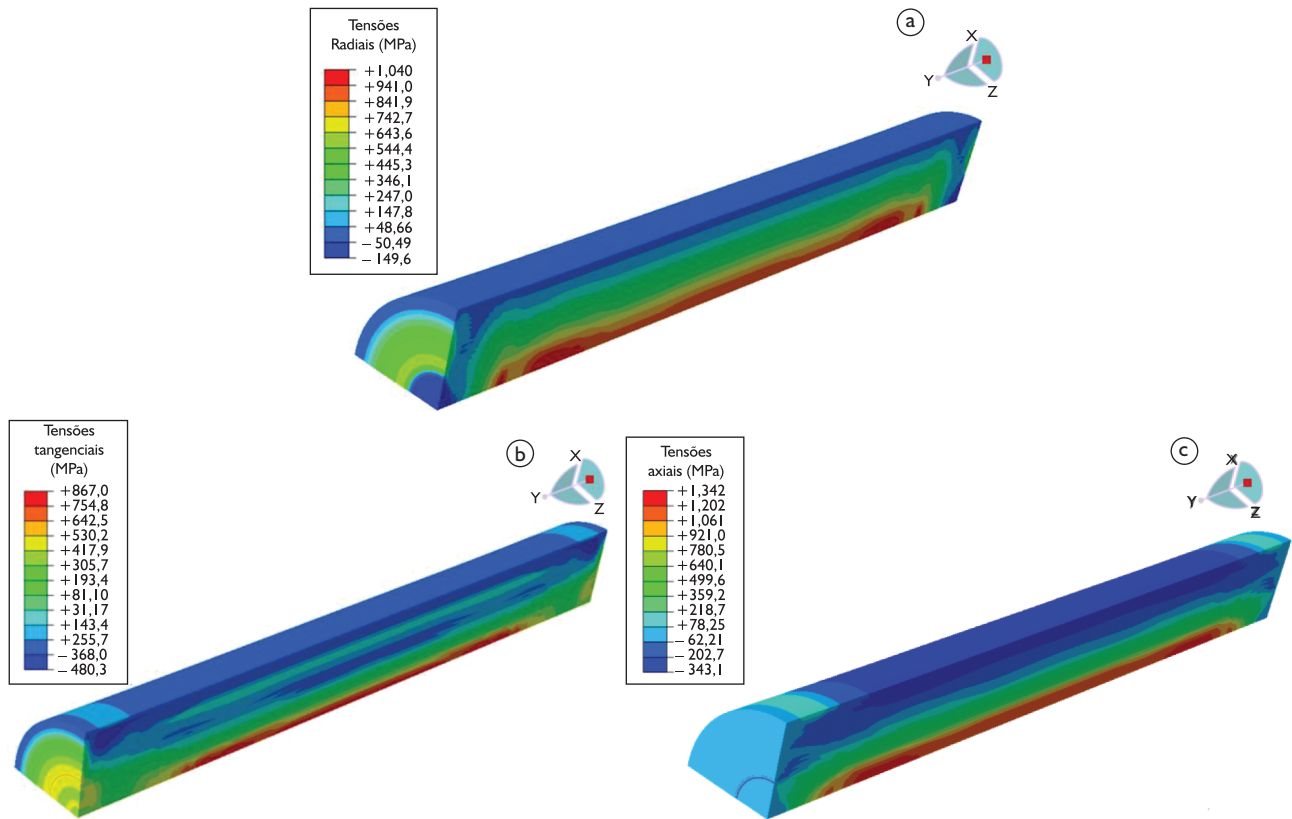


Figura 6. Distribuição das tensões residuais calculadas através do MEF para o cilindro de aço AISI 4140: (a) Radiais; (b) Tangenciais; (c) Axiais.

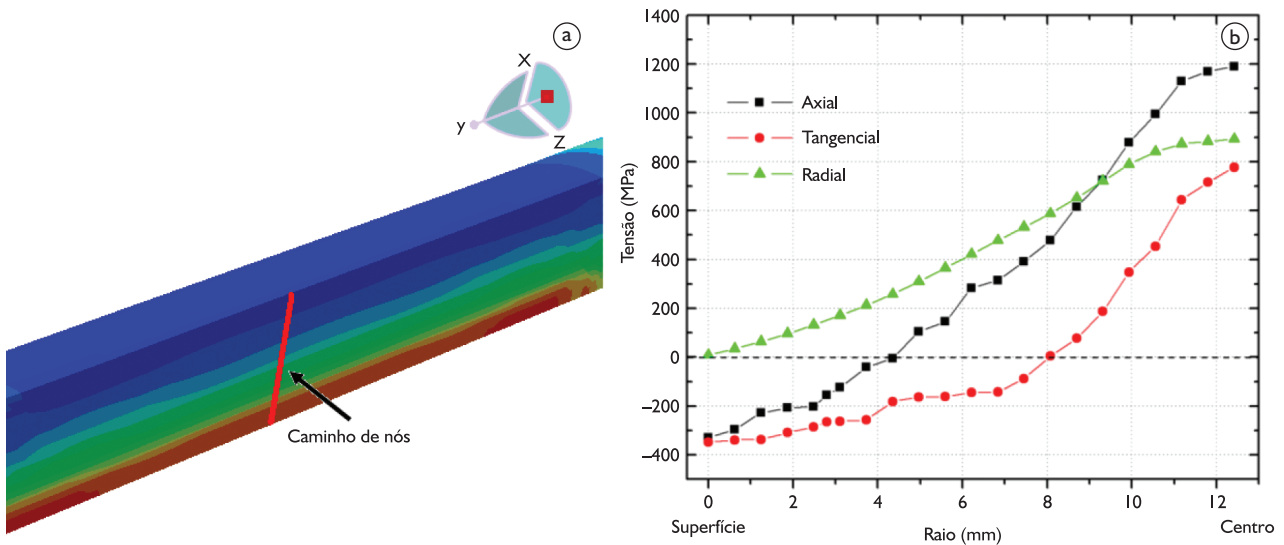


Figura 7. (a) Trajetória para determinação das tensões resultantes; (b) Distribuição das tensões residuais calculadas pelo MEF ao longo da trajetória radial mostrada na Figura (a), ao final da têmpera.

Tabela 7. Resultados das tensões radiais, tangenciais e axiais na superfície e no centro (em MPa), ao longo da trajetória radial no meio do cilindro

σ radial		σ tangencial		σ axial	
Centro	Superfície	Centro	Superfície	Centro	Superfície
+892 \pm 7	-9 \pm 6	+784 \pm 5	-347 \pm 8	+1.189 \pm 7	-328 \pm 7

Tabela 8. Comparação entre as tensões tangenciais e axiais calculadas e medidas experimentalmente por difração de raios X

σ Tangencial (MPa)		σ Axial (MPa)	
Modelo Matemático	DRX	Modelo Matemático	DRX
-347 \pm 8	-363 \pm 14	-328 \pm 7	-353 \pm 18

Estas análises permitem visualizar quantitativa e qualitativamente a magnitude da tensão residual máxima e determinar os valores precisos das tensões residuais na superfície, a fim de poder fazer uma comparação com os valores obtidos pela difração de raios X, como relacionado na Tabela 8.

4 CONCLUSÕES

A utilização do programa AC3 converter permite utilizar os resultados de modelagem microestrutural previstos pelo programa AC3 como dados de entrada no programa Abaqus Standard®, para modelação de tensões residuais resultantes do tratamento de têmpera em água do aço AISI 4140, pelo método dos elementos finitos.

Os resultados das tensões residuais encontrados pelo modelo de elementos finitos evidenciam a importância de se acoplar as propriedades mecânicas e físicas de

cada fase, em cada região do cilindro e as suas porcentagens, em função da temperatura.

Obtém-se resultados numéricos, com aderência significativa, entre os dados obtidos pelo modelo não linear elasto-plástico, desenvolvido utilizando o método dos elementos finitos, e os obtidos experimentalmente por difração de raios X, com valores nos sentidos tangencial e axial, para o modelo numérico de -347 \pm 8 e -328 \pm 7 MPa e pela técnica de difração de raios X de -363 \pm 14 e -353 \pm 18 MPa, respectivamente.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo auxílio financeiro.

Ao Instituto de Pesquisas de Energéticas e Nucleares (IPEN) - Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais – Laboratório de Difração de Raios X.

REFERÊNCIAS

- 1 ARIMOTO, K. et al. Preliminary study to identify criterion for quench crack prevention by computer simulation. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, v. 25, n. 5, p. 486-93, 2004.
- 2 ARIMOTO, K. et al. Explanation of the origin of distortion and residual stress in water quenched cylinders using computer simulation. *Journal of ASTM International*, v. 3, n. 5, May 2006. Disponível em: <http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/JAI/PAGES/JAI14204.htm>. Acesso em: 31 jan. 2011. <http://dx.doi.org/10.1520/JAI14204>
- 3 EHLERS, M.; MÜLLER, H.; LÖHE, D. Simulation of stresses, residual stresses, and distortion in stepped cylinders of AISI 4140 due to martensitical hardening by immersion cooling. *Journal de Physique. IV France*, v. 9, p. 333-40, 1999. <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1999934>
- 4 DENIS, S. et al. Modeling of phase transformation kinetics in steels and coupling with heat treatment residual stress predictions. *Journal de Physique. IV France*, v. 9, p. 223-332, 1999. <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:1999933>
- 5 DENIS, S. et al. Phase transformation and generation of heat treatment residual stress in metallic alloys. *Materials Science Forum*, v. 347-9, p. 184-98, 2000. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.347-349.184>
- 6 DENIS, S. et al. Prediction of residual stress and distortion of ferrous and non-ferrous metals: current status and future developments. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 11, n. 1, p. 92-102, 2002. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-002-0014-2>

- 7 ALVES, G. *Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia óptica*. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia na área de Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2008.
- 8 Image J (para Windows e Linux). Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/>>. Acesso em fevereiro de 2011.
- 9 ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E 562-02*. Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count. West Conshohocken, 2002.
- 10 ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E 1426-98*. Standard test method for determining the effective elastic parameter for X-ray diffraction measurements of residual stress. West Conshohocken, 2009.
- 11 MARATHON MONITORS. *AC3 heat treatment software operating manual*. Ohio, 1994.
- 12 SEDIGHI, M., SALEK, M. Modeling and experimental study of quenching process for AISI 4340 aeronautical steel under different cooling conditions. *Transactions the Canadian Society for Mechanical Engineering*, v. 32, n. 1, p. 1-8, 2008.
- 13 ECKEL, B. *Thinking in Java*. 4. ed. New York: Prentice Hall, 2006.
- 14 NORTHOVER, S.; WILSON, M. *SWT: the standard widget toolkit*. Reading: Addison-Wesley Professional, 2004. v. 1.
- 15 BHADESHIA, H. K. D. H. Material factors. In: TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T., eds. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park: ASM International, 2002.
- 16 SCHRÖDER, R. Influences on development of thermal and residual stresses in quenched steel cylinders of different dimensions. *Materials Science and Technology*, v. 1, n. 10, p. 754-64, Oct. 1985. <http://dx.doi.org/10.1179/026708385790124134>
- 17 PIETZSCH, R. et al. Simulation of the distortion of long steel profiles during cooling. *Journal of Applied Mechanics*, v. 74, n. 3, p. 427-37, May 2007. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2338050>
- 18 TOTTEN, G. E.; HOWES, M.A. *Steel heat treatment handbook*. New York: Marcel Dekker, 1997.
- 19 LI, H.; ZHAO, G.; HE, L. Finite element method based simulation of stress-strain field in the quenching process. *Materials Science and Engineering A*, v. 478, n. 1-2, p. 276-90, Apr. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.101>
- 20 ROHDE, J.; JEPSSON, A. Literature review of heat treatment simulations with respect to phase transformation, residual stresses and distortion. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, v. 29, n.2, p. 47-62, Apr. 2000. <http://dx.doi.org/10.1034/j.1600-0692.2000.d01-6.x>

Recebido em: 26/10/2011

Aceito em: 28/03/2012