

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO PROCESSO DE TÊMPERA EM CILINDROS DE AÇO: AVALIAÇÃO DE UM MODELO CONSTITUTIVO MULTI-FASE

Wendell Porto de Oliveira

Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Luís Felipe Guimarães de Souza

CEFET/RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Departamento de Engenharia Mecânica

20.271.110 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

E-Mail: wendellporto@uol.com.br, calas@cefet-rj.br, lfelipe@cefet-rj.br

Marcelo Amorim Savi

Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Departamento de Engenharia Mecânica

21.945.970 - Cx. Postal 68.503 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

E-Mail: savi@ufrj.br

Resumo. A têmpera é um importante tratamento térmico utilizado na indústria, tendo como função adequar as propriedades de uma peça de aço à sua aplicação específica. Propriedades mecânicas como dureza superficial ou resistência mecânica podem ser controladas em função da escolha adequada de parâmetros do processo como a taxa de resfriamento imposta pelo meio de resfriamento. Estes parâmetros devem ser cuidadosamente escolhidos uma vez que a peça pode vir a desenvolver altos níveis de tensões residuais. Os altos gradientes de temperatura presentes durante o processo são responsáveis por diversos fenômenos acoplados: térmicos, mecânicos e de transformação de fase. Os autores apresentam em trabalhos anteriores um modelo constitutivo com variáveis internas capaz de descrever o comportamento termomecânico de cilindros de aço temperados. Este trabalho apresenta um procedimento experimental desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho deste modelo sob o aspecto dos fenômenos térmicos e de transformação de fase. Dois termopares posicionados no interior de corpos de prova cilíndricos são utilizados para acompanhar a evolução da temperatura de cilindros de aço utilizando um sistema de aquisição de dados conectado a um computador. Os resultados experimentais e numéricos, desenvolvidos para dois meios de resfriamento (água e ar), apresentam uma boa concordância.

Palavras-chave: Têmpera, Análise Experimental, Simulação Numérica, Transformação de Fase.

1. INTRODUÇÃO

A têmpera é um tratamento térmico bastante utilizado na indústria para modificar as propriedades de uma peça de aço. Através deste processo, é possível controlar propriedades mecânicas, como dureza superficial e a resistência mecânica, através da escolha adequada dos parâmetros do processo como, a taxa de resfriamento imposta pelo meio de resfriamento. Os elevados gradientes de temperatura presentes durante o processo são responsáveis por diversos fenômenos acoplados: térmicos, mecânicos e de transformação de fase. Os parâmetros associados ao processo de têmpera devem ser cuidadosamente escolhidos visando evitar níveis elevados de

tensões residuais capazes de promover o empenamento ou o surgimento de trincas na peça. Outro ponto relacionado à escolha desses parâmetros é a formação de uma microestrutura adequada para a aplicação da peça em questão. As metodologias tradicionais utilizadas na indústria para a determinação desses parâmetros são baseadas em ensaios simplificados com peças de geometria simples, como o ensaio Jominy. Estas metodologias permitem prever características de uma peça temperada como a sua dureza ao longo da profundidade, mas não outras importantes características como o nível das tensões residuais. As tensões residuais influenciam significativamente a integridade estrutural da peça uma vez que, ao entrar em operação, as tensões de operação causadas pelas cargas usuais são somadas às tensões residuais desenvolvidas durante o processo de têmpera. Desta forma, é bastante importante o estabelecimento de metodologias que permitam prever as características de peças temperadas (tensões residuais, distribuição das fases presentes, etc.) principalmente para peças de geometria complexa.

Em trabalhos anteriores (Pacheco *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2003, 2004), os autores apresentam um modelo constitutivo tridimensional, com variáveis internas, capaz de descrever o comportamento termomecânico de peças de aço temperadas. O modelo é baseado na termomecânica dos processos irreversíveis (Pacheco, 1994, Lemaître e Chaboche, 1990) e permite prever o comportamento de peças de aço temperadas considerando diversos aspectos como a presença de diversas fases (Oliveira *et al.*, 2003) e o efeito do acoplamento termomecânico na geração de calor durante o processo (Silva *et al.*, 2004).

Este trabalho apresenta um procedimento experimental desenvolvido com o objetivo de avaliar o modelo proposto pelos autores sob o aspecto dos fenômenos térmicos e de transformação de fase. Nos experimentos desenvolvidos, dois termopares posicionados dentro de corpos de prova (*CPs*) cilíndricos longos de aço são utilizados para acompanhar a evolução da temperatura através de um sistema de aquisição de dados conectado a um computador para dois meios de resfriamento: água e ar. Após o experimento, análises metalográficas são desenvolvidas para estimar a distribuição das fases.

2. EXPERIMENTO

Os ensaios experimentais são realizados com o objetivo de avaliar a evolução de temperatura ao longo do tempo e a distribuição de fases ao longo do raio dos *CPs* no final do processo. Desta forma, consideram-se duas condições de resfriamento: resfriamento em água, condição mais severa, e resfriamento ao ar, condição mais branda. Para cada uma das condições utilizam-se quatro *CPs*.

2.1. Corpos de Prova

Os *CPs* com raio de 25,4 mm e comprimento de 150 mm são confeccionados a partir de barras cilíndricas de aço AISI 4140 com 25,4 mm (1") de raio. Os *CPs* têm furos usinados de 1,7 mm de diâmetro e 60 mm de profundidade para receberem os termopares. Todos os *CPs* recebem um termopar no centro. Para cada condição de resfriamento, um segundo termopar é inserido em um dos *CPs* a 1 mm da superfície, também a uma profundidade de 60 mm. A Fig. (1) apresenta a geometria do *CP* com a furação para receber os termopares.

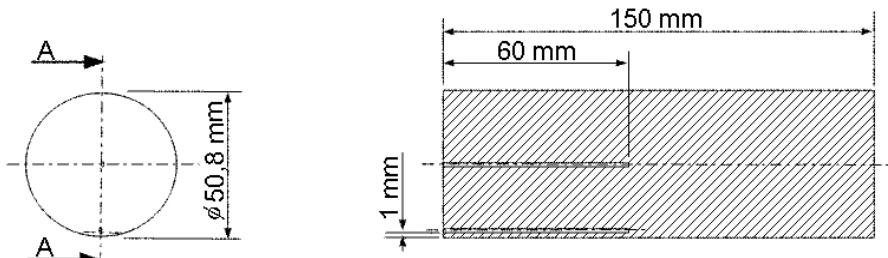


Figura 1. Geometria dos *CPs* utilizados.

A escolha da profundidade dos furos foi feita após um estudo utilizando simulações numéricas com um modelo de elementos finitos axisimétrico (Oliveira, 2004). A análise desenvolvida leva em consideração o transiente para verificar o efeito da convecção nas extremidades da barra e determinar a profundidade para a qual estes efeitos podem ser considerados desprezíveis, de modo que a extremidade do termopar forneça a evolução da temperatura em uma seção longe das extremidades (Oliveira, 2004).

A análise metalográfica e de dureza das barras de aço AISI 4140 utilizadas, mostra que a sua condição original de material recebido é a de temperado e revenido. A Fig. (2) apresenta a microestrutura do material obtida através de microscopia ótica e o perfil de dureza do material, ambos para a condição de como recebido. Observa-se uma microestrutura característica de martensita revenida, homogênea ao longo de toda a peça. Esta homogeneidade é corroborada pelo perfil de dureza uniforme ao longo do raio da amostra.



Figura 2 – (a) Micrografia do material como recebido - martensita revenida. Ataque: Nital 2%;
(b) Perfil de dureza.

2.2. Equipamentos

Os dois sistemas utilizados, compostos por um sistema de aquecimento e um sistema de aquisição de dados, são mostrados na Fig. (3).

O sistema de aquecimento é composto por um forno de resistência elétrica com controlador de temperatura (*FORNOS LAVOISIER* - modelo 4020), para redes elétricas 220 V, 60 Hz, com amperagem de 18 A, potência de 3960 W e temperatura máxima de 1200°C. As dimensões da câmara do forno são: altura 150 mm, largura 180 mm e profundidade 230 mm. O forno e o controlador de temperatura são mostrados na Fig. (3a).

O sistema de aquisição de dados é composto por um *notebook* (*COMPAQ ARMADA 1700*), com processador Pentium II 266 MHz, 32Mb de memória RAM, com o programa *AqDados 5.0* (*LINX Tecnologia Eletrônica*) conectado a um sistema de aquisição de dados *ADS-2000* (com módulo condicionador de 16 entradas *AI-2160* - *LINX Tecnologia Eletrônica*). Os transdutores de temperatura são termopares tipo "K" de cromel-alumel, de 1,6 mm de diâmetro e com camisa de inox de 1 m de comprimento (*ECIL*). Este sistema de aquisição de dados é mostrado na Fig. (3b).



Figura 3. (a) Sistema de aquecimento. (b) Sistema de aquisição de dados acoplado ao experimento.

Além desses sistemas, são utilizados também um recipiente de inox com capacidade para 70 litros, para a imersão e tijolos refratários para isolamento elétrico entre o recipiente de inox e o piso, de modo a reduzir interferências na leitura do transdutor.

2.2. Procedimentos Experimentais e Considerações

Os ensaios realizados consistem basicamente dos seguintes passos: (1) preparação dos *CPs* com a colocação dos termopares e a fixação das alças de manuseio; (2) aquecimento do forno de resistência elétrica, até que o material refratário das paredes da câmara do forno atinja a temperatura de 850° C; (3) aquecimento do *CP*, até que a temperatura no seu núcleo se iguale à temperatura de austenitização estabelecida, que no caso destes ensaios é de 830°C; (4) manutenção na temperatura de austenitização por um período de uma hora; e (5) imersão do *CP* no fluido de resfriamento escolhido. Deve-se observar que a temperatura de equilíbrio atingida pelo refratário da parede do forno é cerca de 20°C maior do que a temperatura de equilíbrio do núcleo do *CP*, o que é devido às diferenças de temperatura existentes na câmara do forno, consequência de trocas de calor que ocorrem através de pequenas frestas nas laterais da porta do forno.

Para cada um dos dois meios de resfriamento (ar ou água) utilizam-se 4 *CPs*: 1 *CP* com 2 furos (no centro e a 1mm da superfície) e 3 *CPs* com 1 furo no centro. Para cada um dos *CPs*, além dos termopares inseridos nos furos internos (1 ou 2 furos), fixam-se termopares na sua parte externa com o objetivo de determinar o instante em que o *CP* é imerso no fluido de resfriamento. No caso do resfriamento em água, existe um intervalo de tempo entre a retirada do *CP* do forno e a imersão na água. Para o resfriamento ao ar, no momento em que o *CP* é retirado do forno este já se encontra imerso no fluido de resfriamento, que é o próprio ambiente externo ao forno.

Uma observação deve ser feita em relação aos fluidos de resfriamento. Para o resfriamento ao ar, observa-se que o ar em volta do *CP* tem um volume muito maior do que o *CP*, e a sua temperatura pode ser constante e igual à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C). Já durante o resfriamento em água, como esta é acondicionada em um recipiente com capacidade para 70 litros, ao final do processo de resfriamento a água apresenta uma temperatura de aproximadamente 50°C maior do que a temperatura no início do experimento (aproximadamente 20°C). Para verificar a influência da variação da temperatura do meio de resfriamento, no caso da água, realizam-se duas simulações: uma com o fluido de resfriamento (água) a 20°C e o segundo com o fluido de resfriamento a 50°C. Através destas simulações pode-se observar que as diferenças entre as taxas de resfriamento só alcançam valores perceptíveis (da ordem de 20°C) abaixo da temperatura de 250°C, ou seja, abaixo de uma temperatura em que todas as transformações de fases já ocorreram (ASM, 1977). Isto já é suficiente para que tais diferenças fossem perceptíveis abaixo de 290°C, pois as transformações difusoriais, que dependem do tempo, ocorrem somente acima desta temperatura. Desta forma, pode-se considerar que a variação de temperatura da água não gera variações consideráveis na taxa de resfriamento da peça.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção apresentam-se os resultados experimentais obtidos através do procedimento experimental descrito na seção anterior.

3.1. Evolução de Temperatura

A Fig. (4) apresenta as curvas de resfriamento obtidas através do sistema de aquisição apresentado para o meio de resfriamento em água. A Fig. (4a) apresenta a evolução da temperatura no centro e a 1 mm da superfície do *CP* com 2 termopares internos, mostrando diferentes taxas de resfriamento. A Fig. (4b) apresenta a evolução da temperatura para os quatro *CPs*, mostrando um comportamento idêntico para as quatro curvas de resfriamento.

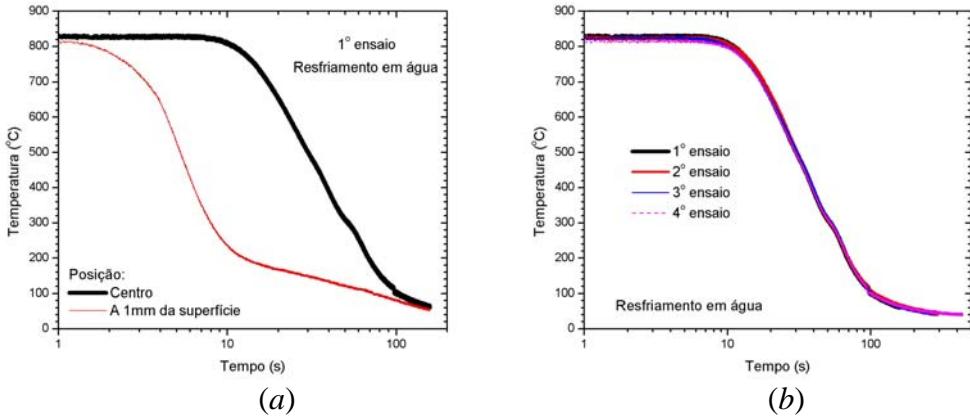


Figura 4. (a) Evolução da temperatura no centro e a 1 mm da superfície do *CP* com 2 termopares internos. (b) Evolução da temperatura para os quatro *CPs*. Resfriamento em água.

A Fig. (5) apresenta as curvas de resfriamento obtidas através do sistema de aquisição apresentado para o meio de resfriamento ao ar. A Fig. (5a) apresenta a evolução da temperatura no centro e a 1 mm da superfície do *CP* com 2 termopares internos, mostrando taxas de resfriamento ligeiramente diferentes. A Fig. (5b) apresenta a evolução da temperatura para os quatro *CPs*, mostrando um comportamento idêntico para as quatro curvas de resfriamento. Nota-se que este tipo de resfriamento é mais brando que o anterior (em água) e que toda a seção transversal (do centro à superfície) sofre taxas de resfriamento similares. A diferença máxima entre as duas curvas de resfriamento apresentadas na Fig. (5a) é de 20° C.

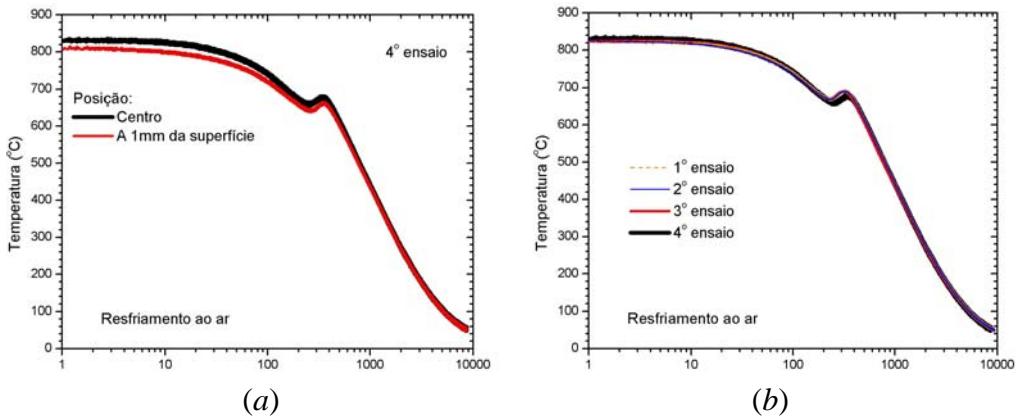


Figura 5. (a) Evolução da temperatura no centro e a 1 mm da superfície do *CP* com 2 termopares internos. (b) Evolução da temperatura para os quatro *CPs*. Resfriamento ao ar.

Ainda com relação à Fig. (5) observa-se claramente uma elevação de temperatura próximo de 650° C. Este comportamento é reportado na literatura e está associado ao acoplamento termomecânico referente à liberação de energia que ocorre durante o processo de transformação de fase (Silva *et al.*, 2004; Denis, 1996, Denis *et al.*, 1987; Woodard *et al.*, 1999; Fernandes *et al.*, 1985; Fa-Rong *et al.*, 1985). Alguns autores associam este comportamento com a diferença de entalpias entre a fase matriz, prévia, e a fase produto, em formação. No caso das transformações cuja fase matriz é a austenita, a entalpia de formação é sempre positiva, pois todas as fases e constituintes que provêm desta, possuem entalpia menor. A geração de calor, desenvolvida durante o processo de transformação de fase, depende da fase matriz, da fase produto que está se formando e da taxa de transformação de fase conforme a equação $\dot{Q} = \Delta H_i \Delta \beta_i$ (Fernandes *et al.*, 1985), onde ΔH_i é a variação da entalpia e $\Delta \beta_i$ a variação da fase *i* que se forma a partir da austenita. O modelo constitutivo desenvolvido pelos autores é capaz de modelar esse comportamento durante o processo de transformação de fase através da evolução das variáveis internas (Silva, 2002; Silva *et al.*, 2004).

No entanto, esse comportamento não está sendo considerado nas simulações numéricas apresentadas neste trabalho.

No diagrama de resfriamento contínuo deste material (ASM, 1997), observa-se que a temperatura e o instante de tempo em que ocorre a elevação de temperatura coincide com a linha de início de formação da perlita. Esta fase apresenta uma elevada variação de entalpia durante a transformação de austenita para perlita. As transformações associadas às outras fases apresentam variações menores das entalpias, tornando mais difícil de identificar este fenômeno.

3.2. Metalografia

Amostras metalográficas preparadas, referentes ao resfriamento ao ar e referentes ao resfriamento em água, estão mostradas nas Figs. (6) e (7) para três posições. As amostras são analisadas através de microscopia óptica, observando-se três posições para cada amostra: centro ($r = 0$), meio do raio ($r = 0,50R$) e superfície ($r = R$), onde r a distância ao centro e R o raio externo do cilindro. Considera-se que a observação em três posições é satisfatória tendo em vista a homogeneidade microestrutural ao longo da seção transversal dos cilindros nas metalografias realizadas nos testes preliminares.

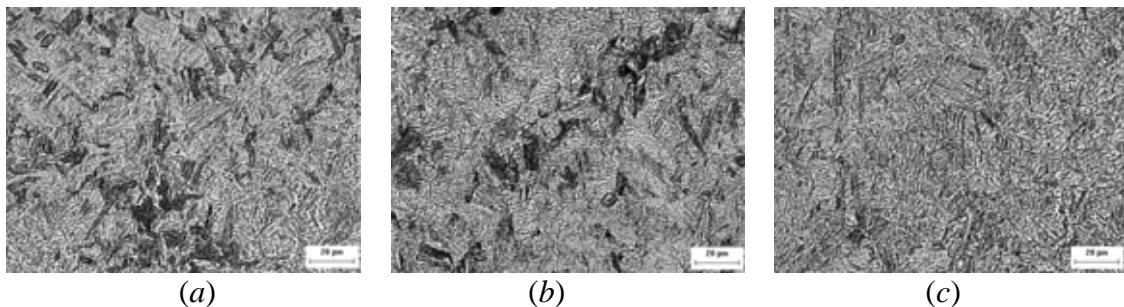


Figura 6. Micrografia: (a) centro ($r = 0$), (b) meio do raio ($r = 0,50R$) e (c) superfície ($r = R$). Resfriamento em água.

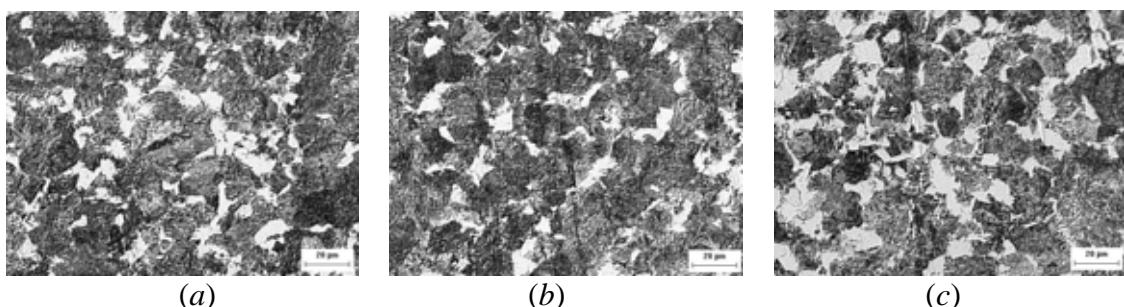


Figura 7. Micrografia: (a) centro ($r = 0$), (b) meio do raio ($r = 0,50R$) e (c) superfície ($r = R$). Resfriamento ao ar.

O aspecto metalográfico observado ao microscópio ótico na Fig. (6) para o resfriamento em água, aponta para uma microestrutura predominante martensítica. Cabe ressaltar que o aspecto apresentado nas micrografias não é suficiente para permitir distinguir com segurança a bainita da martensita. Para estabelecer tal distinção, seria necessário uma análise metalográfica utilizando a microscopia eletrônica de varredura. Para a condição de resfriamento ao ar, mostrado na Fig. (7), determina-se o percentual de fases pela contagem de pontos em amostras retiradas dos *CPs* pela observação de 30 campos, com aumento de 500 X, escolhidos aleatoriamente, com uma grade de 99 pontos totalizando 2970 pontos por amostra. Neste caso, observa-se um percentual de perlita e ferrita homogêneo em toda a peça, com valor médio de 76% de perlita e 24% de ferrita. Os dados estão resumidos na Tabela (1).

Tabela (1). Distribuição das Fases para os dois Resfriamentos. Análise Experimental.

Fase	Resfriamento em Água			Resfriamento ao Ar		
	$r = 0$	$r = 0,50R$	$r = R$	$r = 0$	$r = 0,50R$	$r = R$
Austenita	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ferrita	0%	0%	0%	24%	24%	24%
Perlita	0%	0%	0%	76%	76%	76%
Bainita	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Martensita	100%	100%	100%	0%	0%	0%

3.3. Perfil de Dureza

Os perfis de dureza mostrados na Fig. (8) apresentam valores de dureza ao longo do raio compatíveis com a microestrutura e com a homogeneidade na distribuição de fases ao longo do raio.

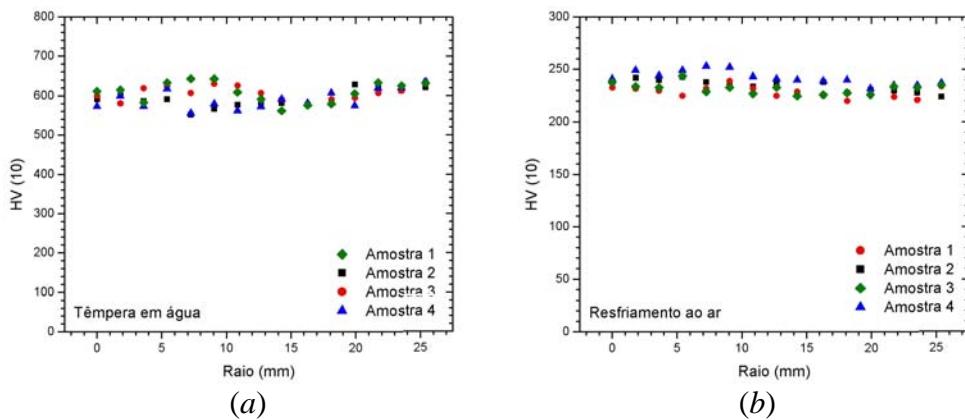


Figura 8. Perfil de dureza Vickers: (a) Resfriamento em água e (b) Resfriamento ao ar.

4. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

Nesta seção os resultados experimentais são comparados com resultados de simulações numéricas obtidas através de um modelo proposto pelos autores em outros trabalhos (Pacheco *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2004). Este modelo constitutivo é baseado na termomecânica dos processos irreversíveis e trata o acoplamento dos três fenômenos: térmico, mecânico e de transformação de fase. Ele permite acompanhar as variáveis (tensão, deformação total, deformação plástica, endurecimento cinemático, temperatura e fases) ao longo do processo e as propriedades são dependentes da temperatura. O modelo é aplicado para o estudo de cilindros longos, podendo ser aplicado para o estudo de seções longe das extremidades. Maiores detalhes sobre o modelo e os parâmetros utilizados nas simulações podem ser encontrados nas referências citadas acima.

A Fig. (9) apresenta a comparação entre a evolução da temperatura obtida dos resultados experimentais e a obtida da simulação, para o resfriamento em água. Analisam-se dois pontos: no centro e a 1 mm da superfície. Para o centro (Fig. 9a), pode-se observar uma boa concordância até a temperatura atingir um valor próximo a 600°C. A diferença que passa a ser observada a partir desta temperatura pode estar relacionada com a geração de calor durante o processo de transformação de fase, nesse caso a transformação de austenita em martensita. Já a diferença encontrada entre as duas curvas para a posição a 1 mm da superfície (Fig. 9b) é causada pela diferença entre as propriedades térmicas do termopar, que introduz uma perturbação no processo de condução de calor nessa região, conforme indicam simulações numéricas desenvolvidas em elementos finitos (Oliveira, 2004). A Fig. (9c) mostra a distribuição de fases decorrente do processo de têmpera, confirmando a predominância da fase martensítica.

Para o resfriamento em água a simulação numérica indica que as formas superior e inferior da bainita estão presentes. O aspecto apresentado nas micrografias não é claro o suficiente para permitir distinguir esses constituintes, uma vez que a bainita possui um aspecto na microscopia ótica que pode ser confundido com a martensita. De qualquer forma, considerando-se a pior situação onde não haja a formação de bainita, a diferença entre os resultados experimentais (micrografia) e os numéricos (simulação) é inferior a 10%.

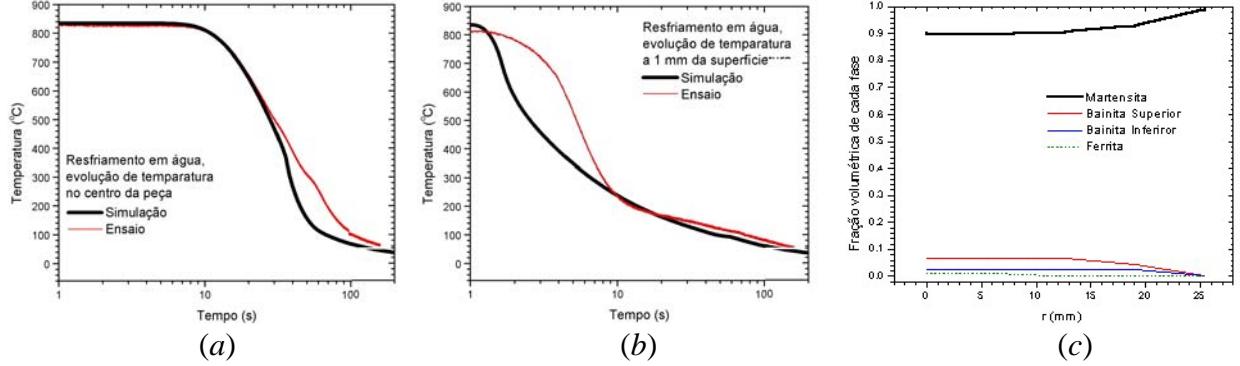


Figura 9. Evolução de temperatura obtida experimentalmente e a simulada, para (a) o centro da peça e (b) a 1 mm da superfície. (c) Distribuição de fases ao longo do raio. Resfriamento em água.

As Figs. 10a e 10b mostram que a evolução de temperatura obtida através das simulações numéricas, acompanha a curva medida experimentalmente até uma temperatura de aproximadamente 680°C. A partir desta temperatura, o processo de geração de calor que ocorre durante a transformação da austenita em perlita faz com que as duas curvas passem a apresentar uma diferença considerável. Para um mesmo instante de tempo, a diferença de temperatura entre as duas curvas chega a ser superior a 120°C. Contudo, mesmo com curvas de resfriamento diferentes, o percentual de ferrita formado no experimento e na simulação são similares. Isso se deve ao fato de que o processo de formação da ferrita ocorre enquanto as duas curvas de resfriamento estão sobrepostas. A simulação numérica indica que a transformação da ferrita se encerra à temperatura de 677°C, em 165 s, para o centro da peça e à temperatura de 663°C, em 157 s, para a posição a 1 mm da superfície.

Como já descrito anteriormente, para o resfriamento ao ar, a contagem de fases com valor médio de 76% de perlita e 24% de ferrita corresponde à um resultado bastante próximo dos resultados obtidos através de simulação, sendo o erro máximo encontrado inferior a 5%.

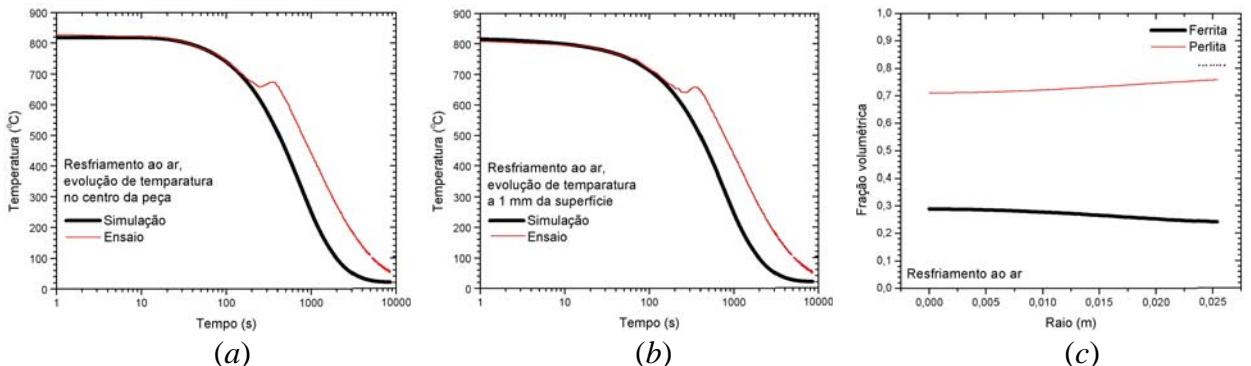


Figura 10. Evolução de temperatura obtida experimentalmente e a simulada, para: (a) o centro da peça e (b) a 1 mm da superfície. (c) Distribuição de fases ao longo do raio. Resfriamento ao ar.

A Tabela (2) apresenta as distribuições de fase obtidas através das simulações numéricas para os dois meios de resfriamento.

Tabela (2). Distribuição das Fases para os dois Meios de Resfriamento. Simulação Numérica.

Fase	Resfriamento em Água			Resfriamento ao Ar		
	$r = 0$	$r = 0,50R$	$r = R$	$r = 0$	$r = 0,50R$	$r = R$
Austenita	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ferrita	1%	0%	0%	29%	27%	24%
Perlita	0%	0%	0%	71%	74%	76%
Bainita	9%	9%	0%	0%	0%	0%
Martensita	90%	91%	100%	0%	0%	0%

5. CONCLUSÕES

Um procedimento experimental foi desenvolvido para avaliar o desempenho de um modelo constitutivo com variáveis internas proposto pelos autores em trabalhos anteriores sob o aspecto dos fenômenos térmicos e de transformação de fase. Nos experimentos desenvolvidos, dois termopares posicionados dentro de corpos de prova cilíndricos, longos, de aço, são utilizados para acompanhar a evolução da temperatura com um sistema de aquisição de dados conectado a um computador para dois meios de resfriamento: água e ar. Os resultados experimentais e numéricos, desenvolvidos para os dois meios de resfriamento, apresentam uma boa concordância. A realização dos experimentos permitiram a constatação do fenômeno de geração de calor durante o processo de transformação de fase, que é previsto pelo modelo e está relatado na literatura. Novos experimentos devem ser desenvolvidos considerando meios de resfriamento intermediários, como óleo. Os dois meios de resfriamento estudados proporcionaram distribuições de fases ao longo do raio praticamente homogêneas. Uma aferição do modelo deve envolver situações que apresentem maiores gradientes na distribuição das fases ao longo do raio do cilindro.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o suporte do CNPq e da CAPES.

7. REFERÊNCIAS

- ASM, 1977, “*Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*”, American Society Metals.
- Denis S., 1996, “Considering Stress-Phase Transformation Interaction in the Calculation of Heat Treatment Residual Stresses”, *Journal de Physique IV*, v.6, January, pp.159-174.
- Denis, S., Sjöström, S. & Simon, A., 1987, “Coupled Temperature, Stress, Phase Transformation Calculation Model Numerical Illustration of the Internal Stresses Evolution during Cooling of a Eutectoid Carbon Steel Cylinder”, *Metallurgical Transactions A*, v. 18A, July, pp.1203-1212.
- Fa-Rong, Y. & Shang-Li, W., 1985, “Transient-Temperature and Residual-Stress Field in Axisymmetric Metal Components After Hardening”, *Materials Science Technology*, vol. 1, pp. 851-856.
- Fernandes, M. B., Denis, S. & Simon, A., 1985, “Mathematical Model Coupling Phase Transformation and Temperature Evolution during Quenching of Steels”, *Materials Science and Technology*, v.1, October, pp.838-844.
- Lemaître, J. & Chaboche, J.L., 1990, “*Mechanics of Solid Materials*”, Cambridge Press Univ.
- Oliveira, W.P., Souza, L.F.G., Pacheco, P.M.C.L. e Savi, M.A., 2003, “Quenching Process Modeling in Steel Cylinders Using a Multi-Phase Constitutive Model”, *COBEM-2003, 17th International Congress of Mechanical Engineering*, São Paulo.
- Oliveira, W.P., 2004, “*Modelamento do Processo de Têmpera em Cilindros de Aço Utilizando um Modelo Constitutivo Multi-Fase*”, Dissertação de Mestrado, Mestrado em Tecnologia – CEFET/RJ.

- Pacheco, P.M.C.L., 1994, "Análise do Acoplamento Termomecânico em Materiais Elastoviscoplásticos", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- Pacheco, P.M.C.L., Savi, M.A. e Camarão, A.F., 2001, "Analysis of Residual Stresses Generated by Progressive Induction Hardening of Steel Cylinders", *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 36, No.5, pp.507-516.
- Silva, E.P, 2002, "Modelagem e Simulação do Processo de Têmpera em Aços Utilizando Elementos Finitos", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, IME-RJ.
- Silva, E.P., Pacheco, P.M.C.L. e Savi, M.A., 2003, "Simulation of Quenching Process Using the Finite Element Method", *COBEM-2003, 17th International Congress of Mechanical Engineering*, São Paulo.
- Silva, E.P., Pacheco, P.M.C.L. and Savi, M.A., 2004, "On the Thermo-Mechanical Coupling in Austenite-Martensite Phase Transformation Related to the Quenching Process", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 1139-1155.
- Woodard, P.R., Chandrasekar, S., Yang, H.T.Y., 1999, "Analysis of Temperature and Microstructure in the Quenching of Steel Cylinders", *Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science*, v.4, August, p.815-822.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF QUENCHED STEEL CYLINDERS: MULTI-PHASE CONSTITUTIVE MODEL EVALUATION

Wendell Porto de Oliveira

Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Luís Felipe Guimarães de Souza

CEFET/RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Department of Mechanical Engineering

20.271.110 - Rio de Janeiro - RJ - Brazil

E-Mail: wendellporto@uol.com.br, calas@cefet-rj.br, lfelipe@cefet-rj.br

Marcelo Amorim Savi

Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Department of Mechanical Engineering

21.945.970 - Cx. Postal 68.503 – Rio de Janeiro – RJ – Brazil

E-Mail: savi@ufrj.br

Abstract. Quenching is an important heat treatment employed in industrial processes that can improve the performance of steel pieces. Parameters as the cooling rate promoted by the cooling medium must be carefully chosen as high levels of residual stresses may be formed in the quenching steel mechanical components. The large temperature gradients present during the process are responsible for several thermo-mechanical coupled phenomena (thermal, mechanical and phase transformation phenomena). Meanwhile, high cooling rates are necessary to provide the phase transformation in order to yield the desired as-quenched properties such as hardness. In this work an experimental procedure is developed to study the cooling characteristics during the quenching of steel cylinders. In the experimental study, two thermocouples connected to a data acquisition system are used to record the temperature evolution during quenching. These parameters are used to feed numerical simulations performed with a multi-phase constitutive model that predicts stresses, temperature and phase evolution. Numerical simulations and experimental results considering long cylinders quenched in two cooling mediums (air and water) show good agreement.

Keywords: Quenching, Experimental Analysis, Numerical Simulation, Phase Transformation.