

TENSÕES RESIDUAIS TÉRMICAS OBTIDAS DA TÊMPERA A VÁCUO DO AÇO FERRAMENTA AISI H13

Renata Neves Penha¹, João C. Vendramim², Lauralice C. Franceschini Canale³

1-Depto de Materiais – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos - SP, Brasil, email: rnp@usp.br

2-Isoflama Ind. e Com., Rua 1, Distr. Industrial João Nerezzi, Indaiatuba - SP, Brasil, vendramin@isoflame.com.br

3- Depto de Materiais – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos - SP, Brasil, email: lfcanale@sc.usp.br

Palavras chave: tensões residuais térmicas, têmpera a vácuo, AISI H13

Resumo

Nos últimos anos o interesse em relação à têmpera a vácuo vem aumentando consideravelmente, pois é um processo que permite a obtenção das propriedades mecânicas desejadas (i.e. dureza e resistência à tração) com tensões residuais menores, se comparado ao processo tradicional de têmpera em óleo. Porém a prática industrial tem mostrado que este processo ainda produz tensões capazes de inutilizar matrizes e moldes confeccionados em aços ferramentas AISI H13. Desta forma, o objetivo deste trabalho é estudar as tensões residuais térmicas obtidas de resfriamento direto sob 9 bar de pressão de nitrogênio. O material estudado constitui em um bloco, com dimensões 300x305x310 mm, do aço ferramenta AISI H13, instrumentado com 4 termopares. O próprio forno a vácuo permite a obtenção das curvas de resfriamento. Através das curvas de resfriamento foram calculados os coeficientes de transferência de calor, que posteriormente foram utilizados como condição de contorno para o cálculo das tensões residuais térmicas.

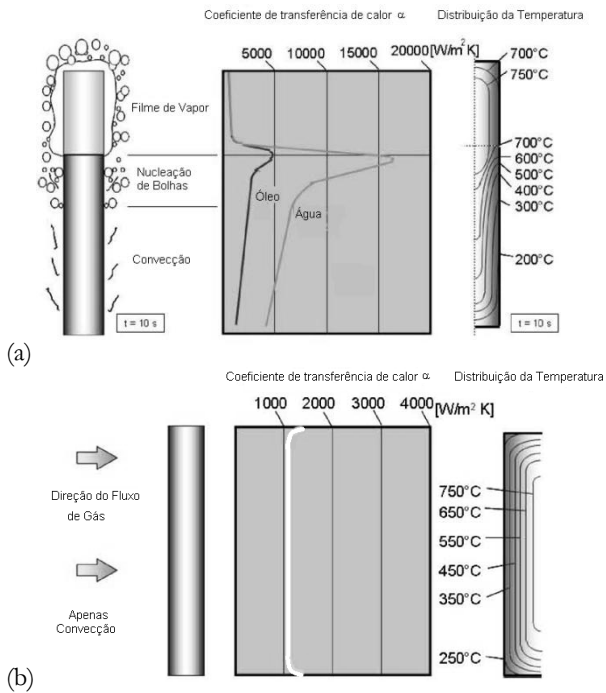


Figura 4: (a) Transferência de calor e distribuição de temperatura durante o resfriamento por imersão; (b) transferência de calor e distribuição de temperatura durante a têmpera a gás sob alta pressão [5].

Na têmpera a gás devido à convecção do gás circulante os gradientes de temperatura são menores e mais regulares na superfície da peça, enquanto que nos meios líquidos há uma enorme diferença nos gradientes térmicos locais, devido à presença simultânea das fases de vapor, nucleação de bolhas e convectiva.

A forma usual de calcular o coeficiente de transferência de calor implica em medir a temperatura em um ponto abaixo da superfície e aplicar o método inverso de condução de calor para calcular a temperatura superficial.

A equação da condução de calor, segundo a lei de Fourier pode escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Onde k é a condutividade térmica, T a temperatura da peça, q o fluxo de calor, ρ a densidade do metal e c_p o calor específico.

A condição inicial é a temperatura inicial da peça (T_0). A condição inicial no instante $t=0$ pode ser escrita como:

$$T|_{T_0} = T_0(x, y, z)$$

Sujeita às condições de contorno:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_g)$$

Onde n é o perpendicular externo do contorno da superfície e T_g a temperatura do meio de têmpera.

3.2. Tensões residuais

A formação de tensões residuais pode ser descrita da seguinte forma: se uma barra de aço é aquecida, a superfície resfria mais rapidamente que o centro sofrendo primeiro a transformação martensítica. Sabe-se que a

transformação da martensita acarreta em uma expansão volumétrica. Se a expansão de transformação no centro é maior que a contração térmica da superfície (já endurecida), surge tensões residuais trativas na superfície, enquanto o núcleo está em estado de compressão [6].

A principal causa das tensões térmicas consiste na magnitude do gradiente térmico nas regiões com maior e menor temperatura da peça. Esta magnitude é determinada pelas propriedades termo-físicas do material e pelo meio de têmpera. Altos coeficientes de transferência de calor e baixa condutividade térmica resultam em altos gradientes térmicos e consequentemente altas tensões residuais [7].

4. Resultados e Discussão

As curvas de resfriamento nos termopares do centro e da superfície podem ser vistas na Figura 5.

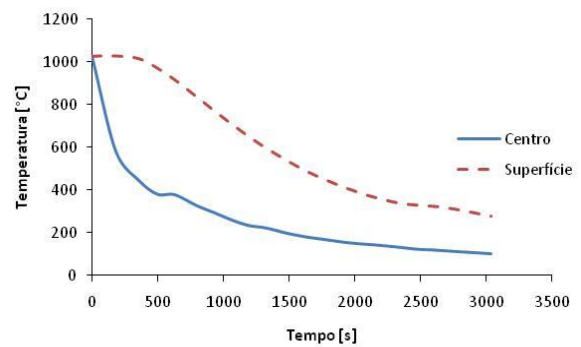


Figura 5: Curva do resfriamento da têmpera

A curva com taxa de resfriamento em função da temperatura obtida para o termopar do centro pode ser vista na Figura 6. A taxa máxima de resfriamento obtida igual 30°C/min está de acordo com as recomendações da NADCA, que recomenda uma taxa mínima de 28°C/min.

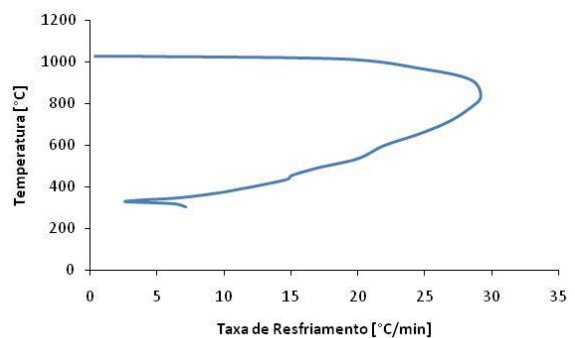


Figura 6: Taxa de resfriamento no núcleo do bloco durante a têmpera

A distribuição de temperatura na peça após 50 min de resfriamento pode ser vista na Figura 7. Os resultados apresentados na Figura 7 foram simulados pelo programa ABAQUS.

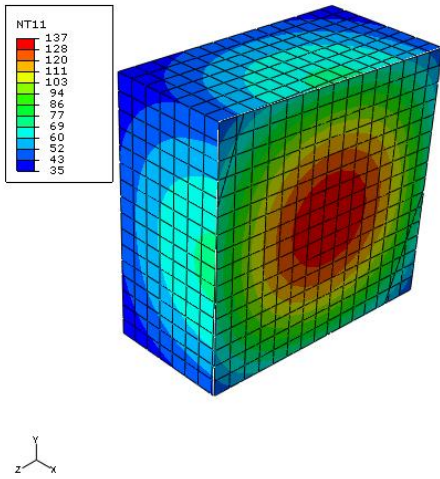


Figura 7: Distribuição espacial da temperatura após a têmpera.

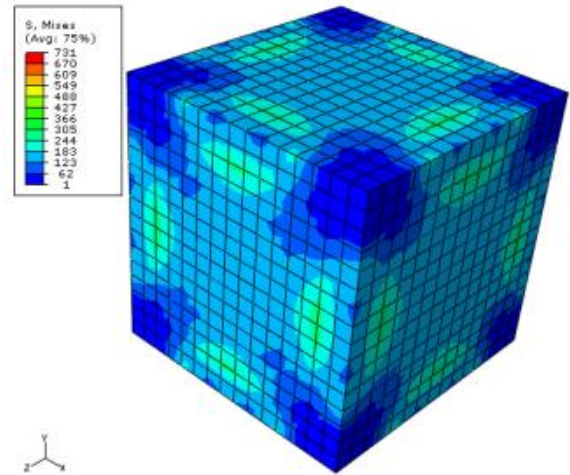


Figura 9: Tensões Von Mises residuais na superfície do bloco após a têmpera.

As Figuras 8 e 9 mostram as tensões de Von Mises calculadas para o resfriamento contínuo no plano médio e na superfície do bloco, respectivamente.

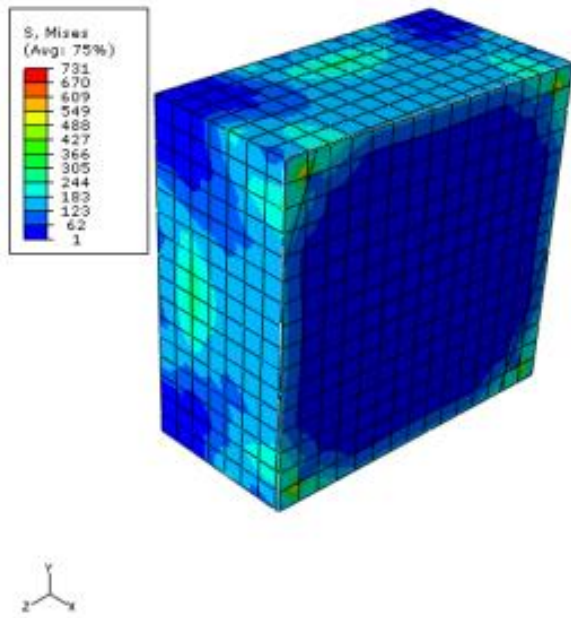


Figura 8: Tensões Von Mises residuais no plano médio do bloco após a têmpera.

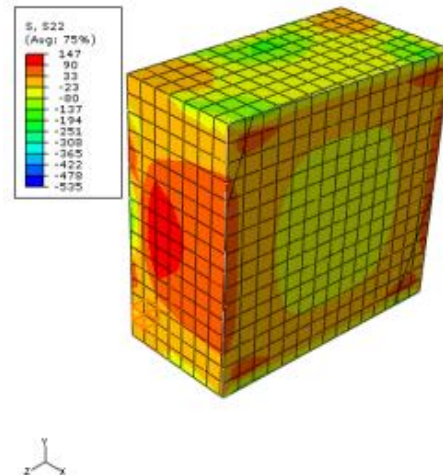


Figura 10: Tensões residuais no plano médio do bloco após a têmpera.

Foi calculada ainda a distribuição espacial da tensão residual térmica no plano médio do corpo de prova. A evolução da tensão residual do centro até a superfície pode ser vista na Figura 11, onde fica evidente a formação das tensões residuais térmicas na superfície. Tal resultado é desejado, pois as tensões compressivas impedem o crescimento das trincas.

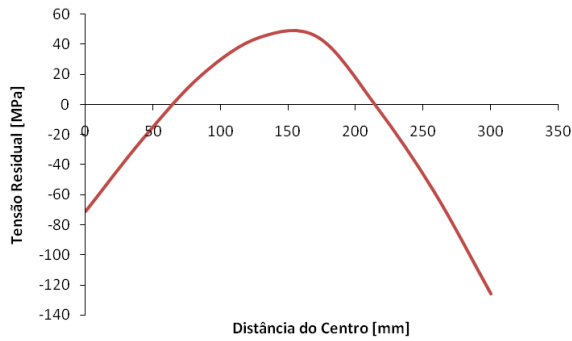


Figura 11: Tensões residuais no plano médio do bloco após a têmpera.

5. Conclusões

Pela análise do resfriamento no bloco temperado a vácuo pode-se concluir que a têmpera a gás de fato produz um resfriamento mais homogêneo e, conseqüentemente as tensões térmicas produzidas nesta situação são inferiores se comparadas ao processo tradicional de resfriamento em óleo.

Em um futuro próximo espera-se realizar novos testes utilizando diferentes níveis de pressão além do estudo do resfriamento isotérmico.

Referências

- [1] H Li et al., “Technological parameters evaluation of gas quenching based on the finite element method”, *Computational Materials Science*, **40**: 282–291, 2007.
- [2] JF Douce, et al.: “Coupled fluid flow, heat transfer, phase transformation, stress and deformation numerical model for gas quenching”, *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, **3**:150–161, 2008.
- [3] M Korecki, J Olejnik, Z Szczerba, M Bazel: “The single-chamber HPGQ vacuum furnace with hardening power of oil quench systems”, *Heat Processing*, **8**:3:1-5, 2010.
- [4] B Liščić, “Heat Transfer Control During Quenching”, *Materials and Manufacturing Processes*, **24**: 7, 879-886, 2009.
- [5] ADL Vacuum Technologies GmbH, <http://www.adl-vt.com/cms/en/vacuum-technology/technologies/vacuum-heat-treatment/vacuum-case-hardening/high-pressure-gas-quenching/>, acessado em 5/12/2011.
- [6] NI Kobasko, “Basics of intensive quenching”, *Advanced Materials & Process*, **148**:42W-42Y, 1995.
- [7] MT Todinov, “Mechanism of formation of residual stress from quenching”, *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, **7**:25-41, 1998.