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

# Renata Neves Penha<sup>1</sup>, João C. Vendramim<sup>2</sup>, Lauralice C. Franceschini Canale<sup>3</sup>

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@isoflama.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: Ifcanale@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  $300 \times 305 \times 310$  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.

### 1. Introdução

A têmpera a vácuo é uma técnica de tratamento térmico que vem se tornando cada vez mais popular [1], pois é uma tecnologia mais limpa se comparada ao tradicional resfriamento em óleos minerais [2]. Embora em algumas situações específicas os resultados alcançados pela têmpera a vácuo sejam próximos aos dos óleos minerais [3], ainda não é possível substituir o processo convencional de têmpera em óleo pelo resfriamento a gás sob alta pressão, pois as taxas de resfriamento alcançadas no tratamento a vácuo são muito inferiores. Porém, a possibilidade de se controlar a velocidade de resfriamento, a homogeneidade e a distorção, torna esta prática ideal para determinados tipos de componentes, tais como matrizes e moldes metálicos [2].

Durante o processo de têmpera a gás, qualquer parâmetro do processo pode ser determinante nos resultados finais, tais como distorções, dureza e tensões residuais. Para se obter as propriedades finais desejadas, é necessário ajustar todos os parâmetros do processo, no entanto há pouca literatura técnica acerca desta otimização. Até hoje, o método da tentativa e erro é o mais utilizado para este propósito. Tal método além de caro não garante a obtenção das melhores propriedades do material temperado. Portanto, a otimização do processo de têmpera a gás para se obter as propriedades desejadas e melhorar a qualidade do serviço constitui em um valioso trabalho de pesquisa [1].

A modelagem de todos os fenômenos envolvidos em um processo de têmpera e suas interações é extremamente complexa como mostra a Figura 1.



\* Não será considerado neste trabalho

Figura 1: Interação entre os processos térmicos, mecânicos e metalúrgicos durante o tratamento térmico de têmpera.

Neste trabalho será analisado e comparado o tratamento térmico de têmpera realizado em um forno a vácuo sob pressão de 9 bar de nitrogênio. Por meio das curvas de resfriamentos serão calculados os coeficientes de transferência de calor, por meio do método inverso, e posteriormente as tensões residuais térmicas, por meio do programa ABAQUS.

## 2. Procedimento Experimental

Um bloco de dimensões 310x305x300 mm confeccionado de aço ferramenta AISI H13 foi temperado a vácuo, sob pressão de 9 bar. A composição química do aço AISI H13 pode ser verificada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química típica do aço AISI H13

%C	%Si	%Mo	%Mn	%Cr	%V
0,39	1,00	1,25	0,35	5,10	0,90

O bloco foi instrumentado com quatro termopares objetivando registrar a variação de temperatura durante o resfriamento. Na Figura 2 pode-se verificar o posicionamento dos termopares internos: um no centro geométrico da peça, outro a uma distância equivalente a metade da distância entre o centro e a superfície e o último a uma profundidade de 38 mm a partir da superfície. A Figura 3 mostra o posicionamento do termopar superficial a 10 mm da superfície.

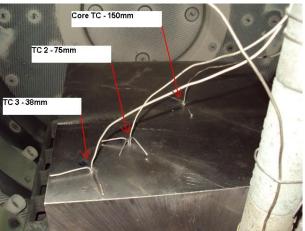


Figura 2: Posicionamento dos termopares inseridos na peça.

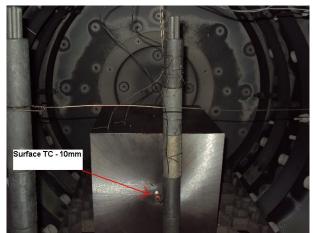


Figura 3: Posicionamento do termopar superficial.

#### 3. Simulação

#### 3.1. Coeficiente de transferência de calor

O dado mais importante para a simulação numérica de qualquer processo de têmpera é o valor exato dos coeficientes de transferência de calor (α) em função da temperatura durante todo o processo de resfriamento [4]. São vários os fatores que influenciam a magnitude dos coeficientes de transferência de calor: geometria, material, condição superficial e fluido de resfriamento.

A diferença fundamental entre o coeficiente de transferência de calor da têmpera a gás e em um meio líquido pode ser vista na Figura 4.

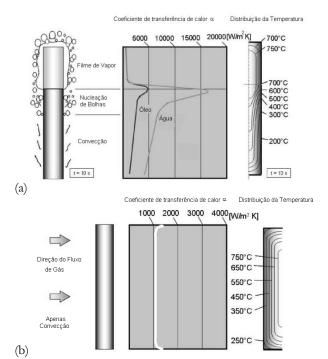


Figura 4: (a) Transferência de calor e distribuição de temperatura durante o resfriamento por imersão; (b) transferência de calor e distribuição de temperatura durante a têmpera a gás sob alta pressão [5].

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

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,  $\rho$  a densidade do metal e  $c_p$  o calor específico.

A condição inicial é a temperatura inicial da peça ( $\Gamma_0$ ). 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  $T_{\rm g}$  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.

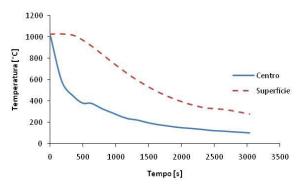


Figura 5: Curva do resfriamento da têmpera

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.

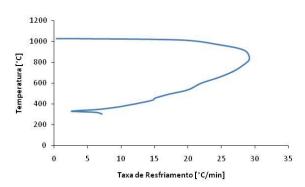


Figura 6: Taxa de resfriamento no núcleo do bloco durante a têmpera

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.

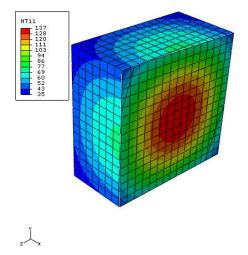


Figura 7: Distribuição espacial da temperatura após a têmpera.

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

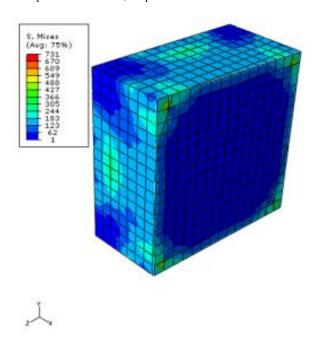


Figura 8: Tensões Von Misses residuais no plano médio do bloco após a têmpera.

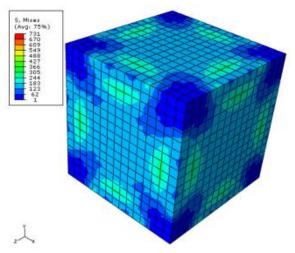


Figura 9: Tensões Von Misses residuais na superfície do bloco após a têmpera.

A Figura 10 mostra as tensões residuais térmicas longitudinais calculadas para o resfriamento contínuo no plano médio do bloco de aço ferramenta. Nesta figura se observa a formação de tensões residuais térmicas compressivas tanto no centro quanto na superfície da peça.

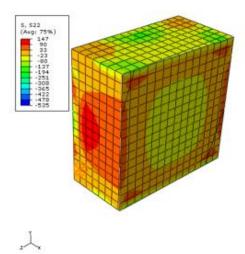


Figura 10: Tensões residuais no plano médio do bloco após a têmpera.

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.

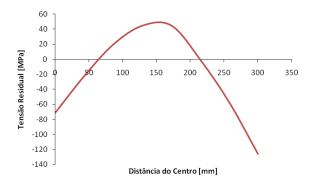


Figura 11: Tensões residuais no plano médio do bloco após a têmpera.

#### 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, consequentemente 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.aldvt.com/cms/en/vacuum-technology/technologies/ vacuum-heat-treatment/vacuum-case-hardening/highpressure-gas-quenching/, acessado em 5/12/2011.
- [6] NI Kobasko, "Basics of intensive quenching", Advanced Materials & Process, 148:42W-42Y, 1995.
- [7] MT Todinov, "Mecahanism of formation of residual stress fron quenching", *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 7:25-41, 1998.