

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA AGITAÇÃO E DA SEVERIDADE DE TÊMPERA DO MEIO DE RESFRIAMENTO NA DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES CRÍTICAS DE TÊMPERA

Código do Artigo (Paper Code): CIT04-0621

Antonio Rogério Torres Carvalho

Universidade Estadual do Maranhão – DEMECP - Cidade Universitária Paulo VI – Tirirical – São Luís-MA
rogerio_torres@yahoo.com

Valdemar Silva Leal

Universidade Estadual do Maranhão – DEMECP - Cidade Universitária Paulo VI – Tirirical – São Luís-MA
valdemar@cct.uema.br

Waldemir Silva de Lima

Universidade Estadual do Maranhão – DEMECP - Cidade Universitária Paulo VI – Tirirical – São Luís-MA
waldemir@cct.uema.br

Kamal A. R. Ismail

Universidade Estadual de Campinas– Faculdade de Engenharia Mecânica – Caixa Postal 6122 - Campinas-SP
kamal@fem.unicamp.br

Resumo. Estuda-se a influência da variação da agitação e da severidade de temperatura do meio de resfriamento sobre as curvas e taxas de resfriamento durante o processo de temperatura do aço. Os ensaios foram realizados com amostras dos aços 1045, 8620 e 8640, temperadas em água e salmoura, promovendo-se a variação do estado de agitação do refrigerante. Os dados apontam para variação da taxa de resfriamento máxima de 27,65% a 110,09% e uma diminuição nos tempos de resfriamento de 7,83% a 63,25%, para os três materiais estudados, com o aumento da agitação do meio. Verificam-se ainda, ganhos nas taxas e tempos de resfriamento com a variação da severidade de temperatura pela troca do meio, água por salmoura, da ordem de 73,27%, sem agitação do meio, e diminuição do tempo de resfriamento em aproximadamente 20%. Os dados ainda demonstram ganhos no tempo e nas taxas de resfriamento devido ao aumento do percentual de carbono no aço, quando se compara os dados obtidos para as amostras dos aços 8620 e 8640.

Palavras chave: Tratamento térmico, temperatura, agitação do meio de resfriamento, severidade de temperatura, velocidade crítica.

1. Introdução

A utilização de peças de aço em aplicações de alta durabilidade e performance, caso de parafusos de extrusoras, pistões de marteletes, punções, ferramentas de corte, etc., ganhou impulso a partir da utilização dos tratamentos térmicos, particularmente a temperatura (endurecimento por resfriamento rápido) e o revenido (alívio das tensões).

Embora de larga utilização, a aplicação dos tratamentos térmicos, em grande parte, baseia-se em métodos empíricos consagrados durante anos de prática.

Atualmente, com a melhoria da capacidade de processamento e armazenamento dos microcomputadores e o desenvolvimento das placas de aquisição de dados, o modelamento destes processos ganhou acentuada atenção e estes estudos vêm validando ou até mesmo modificando os métodos utilizados nos tratamentos térmicos, visando a economia de tempo, redução do desperdício devido a perdas e retrabalhos de peças e à otimização dos processos de manufatura de produtos.

As curvas de resfriamento podem ser obtidas com a utilização de termopares inseridos à peças temperadas e são importantes pois seu estudo permite a previsão da temperabilidade, microestrutura e a distribuição de dureza do material, tornando possível a quantificação das variáveis envolvidas no processo.

A finalidade deste estudo é determinar a influência da agitação e da severidade de temperatura do meio de resfriamento sobre as curvas de resfriamento de peças de aço temperadas. Busca-se, através de ensaios em laboratório, avaliar os efeitos da variação do estado de agitação e da severidade de um meio de resfriamento na obtenção das curvas críticas de resfriamento durante o processo de temperatura.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Tratamento térmico

O aumento dos limites de resistência à tração e ao escoamento de aços pode ser obtido de forma mais barata e rápida através da aplicação de tratamentos térmicos, normalmente a temperatura, seguida, ou não, de revenido.

Apesar de determinante, o preço, em face do baixo custo dos materiais empregados, não é a única vantagem do tratamento térmico. Acrescenta-se a este, a facilidade de aplicação e a simplicidade do processo. Como desvantagens pode-se citar a forte influência da composição química nos resultados e a não aplicabilidade em todo e qualquer tipo de material.

Dentre as diversas definições, para Novikov (1994) “*Tratamentos térmicos são os processos de tratamento das peças de metais e ligas, através da ação do calor, com o objetivo de modificar suas estruturas e propriedades em determinada direção.*”

Apesar dos avanços tecnológicos, deve-se admitir, que durante a têmpera, o processo de transferência de calor entre a peça e o meio refrigerante é muito complexo e varia de forma não-linear com a temperatura, confirma Shuhui Ma et al. (2003).

2.2. Mecanismo de resfriamento

A forma na qual se processa o resfriamento durante o processo de têmpera em água, óleo ou solução aquosa de polímeros é similar, confirma Totten (1993), e ocorre em três estágios, figura 1:

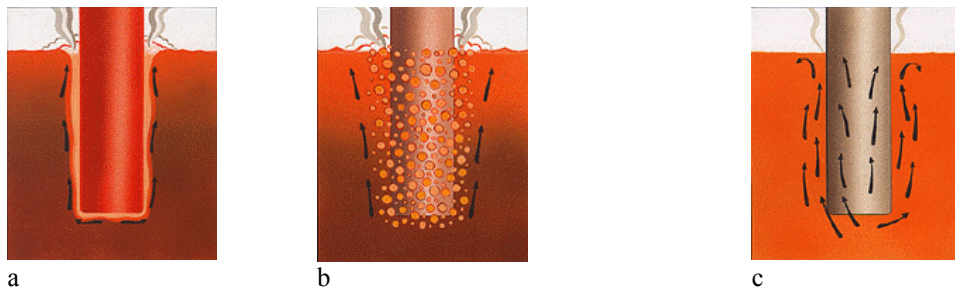


Figura 1. Estágios do resfriamento: a) cobertura de vapor, b) borbulhamento, c) resfriamento convectivo, Houghton (2003)

Cobertura de vapor – é caracterizado pela formação de uma camada (filme) de vapor em torno do metal aquecido. Esta camada de vapor mantém-se enquanto a quantidade de calor emanada do interior para a superfície da peça exceder a quantidade necessária para evaporar o meio refrigerante e manter a fase de vapor. Este filme atua como um isolador e começa a desaparecer quando a *temperatura de Leidenfrost* é atingida. Conforme Totten (1993), a transição do estágio A para o B ocorre através de repetidas ondas que atingem a superfície da peça e independe da temperatura inicial da peça. Este é um período de resfriamento relativamente lento, onde a transferência de calor ocorre por radiação e condução através da camada de vapor.

Borbulhamento – caracteriza-se pela ebulição violenta na interface peça/meio. O eventual colapso da camada de vapor provoca o contato do metal com o meio refrigerante provocando altas taxas de transferência de calor e a evaporação do líquido, ocasionando o borbulhamento do vapor.

Resfriamento convectivo – neste estágio, a superfície do material está numa temperatura inferior ao ponto de evaporação do meio refrigerante, que permite o total envolvimento pelo meio. O resfriamento dá-se de forma convectiva sendo função da temperatura de ebulição do meio de resfriamento. É o estágio de menor taxa de resfriamento.

2.3 Curvas de resfriamento

No processo de têmpera, as taxas de resfriamento devem ser rápidas o suficiente para permitir a formação da microestrutura desejada, mas lenta o suficiente para evitar tensões residuais e distorções.

As curvas das velocidades de resfriamento são representadas nos diagramas de Transformação \times Tempo \times Temperatura (TTT) e nos de Transformação por Resfriamento Contínuo (CCT) e são utilizadas para a identificação das condições requeridas para obtenção de uma microestrutura particular, figura 2.

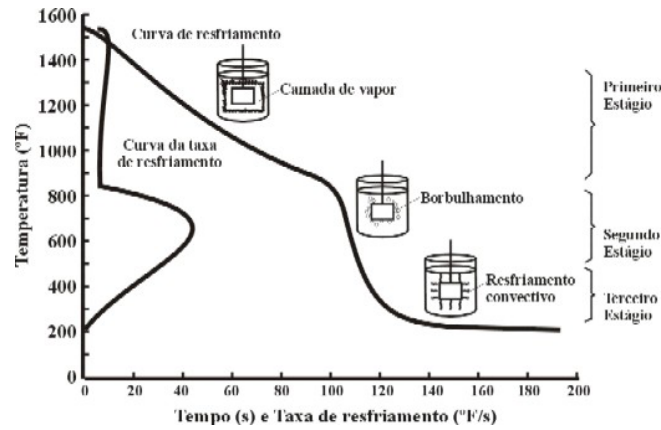


Figura 2 – Mecanismos de resfriamento, Totten (1993)

2.4 Transferência de calor durante a têmpera

Durante a têmpera, a transferência de calor do metal aquecido para o meio de resfriamento é influenciada pelas características do meio e do metal. Estas variáveis são mais fortes em um estágio do que nos outros, daí a necessidade de estudar-se sua determinação conforme estas fases.

O coeficiente de transferência de calor (h) durante o primeiro estágio do resfriamento pode ser expresso como a soma do coeficiente de convecção (h_c) e o coeficiente efetivo de radiação ($f h_r$), onde f é constante. Nesta fase o coeficiente de transferência de calor tem expressões diferentes, conforme a orientação e a geometria da peça. Para peças planas com fluxo na horizontal, Science e colaboradores citados por Shuhui Ma (2002) encontrou com boa aproximação de resultados experimentais a seguinte equação:

$$h_c = 0,425 \left\{ \frac{(k_G)^3 H'_{fg} \rho_G g (\rho_L - \rho_G)}{\mu_G (T_w - T_{sat}) [g_C \sigma / g (\rho_L \rho_G)]^{1/2}} \right\} \quad (1)$$

k - condutividade térmica

H - severidade de têmpera

H' - calor latente

Onde:

ρ - densidade

μ - viscosidade

σ - tensão superficial

Demonstra-se que o coeficiente de transferência de calor no primeiro estágio é função de muitos fatores como a viscosidade da camada de vapor e do meio refrigerante, tensão superficial, a densidade do filme de vapor e do meio, do calor latente e do específico.

Para o segundo estágio, de acordo com Benjamim & McAdams citados por Shuhui Ma (2003), o calor removido é considerado como resultado dos seguintes mecanismos:

- calor absorvido pela evaporação da microcamada (q_{ME});

$$q_{ME} = \frac{\gamma \phi \sqrt{\pi}}{10} B^2 Ar^{0,27} Ja(\alpha_l)^{3/2} \cdot \sqrt{t_g} \rho_l H_{fg} \left(\frac{N}{A} \right) \quad (2)$$

- energia calorífica gasta na reformação da camada limite térmica (q_R);

$$q_R = 2 \sqrt{\left(\frac{k_l \rho_l C_{pl}}{\pi w} \right)} \cdot \left(\frac{N}{A} \cdot a \right) \cdot (T_w - T_{sat}) \quad (3)$$

- calor transferido pela convecção natural turbulenta (q_{NC}).

$$q_{NC} = \frac{0,14k_L}{L} (Gr \cdot Pr)^{1/3} \left[1 - \left(\frac{N}{A} \right) \cdot a \right] \cdot (T_w - T_{sat}) \quad (4)$$

Observa-se que a viscosidade cinemática, a densidade, o calor específico, o calor latente, a temperatura entre o metal e o meio, a tensão superficial e a condutividade térmica são as variáveis que influenciam a transferência de calor neste estágio.

No terceiro estágio, tem-se a transferência de calor através de convecção natural do líquido refrigerante. Churchill (1983) sugere a seguinte equação para o cálculo do calor transferido:

$$\overline{Nu}_L = (a + 0,331b(Gr Pr)_L^{1/6})^2 \quad (5)$$

Onde:
$$b = \frac{1,17}{[1 + (0,5/Pr)^{9/16}]^{8/27}}$$

a – constante empírica que varia com a geometria.

Neste estágio, o coeficiente de transferência de calor pode ser relacionado com a viscosidade cinemática, o calor específico, a condutividade térmica, o coeficiente de expansão térmica, a diferença de temperatura entre o metal e o líquido e a distância da margem principal da camada limite formada na superfície aquecida.

Como visto, muitas variáveis influenciam no cálculo do coeficiente de transferência de calor durante o processo de têmpera. Algumas destas propriedades são de difícil obtenção. Uma forma de estudo do problema utilizada é a análise das curvas de resfriamento, que tem sido geralmente aceita como a mais importante maneira de descrever o mecanismo da têmpera (Shuhui Ma, 2003).

3. Materiais e métodos

3.1. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram os aços ABNT 1045 e 8620 e 8640, cuja composição química nominal é, Tabela 1:

Tabela 1 – Composição química nominal dos aços 1045, 8620 e 8640 (ABNT, SAE, AISI)

	C (%)	Mn (%)	P _{máx} (%)	S _{máx} (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
ABNT 1045	0,43 a 0,50	0,60 a 0,90	0,030	0,050	–	–	–	–
ABNT 8620	0,18 a 0,23	0,70 a 0,90	0,030	0,040	0,15 a 0,35	0,40 a 0,70	0,40 a 0,60	0,15 a 0,25
ABNT 8640	0,38 a 0,43	0,75 a 1,00	0,030	0,040	0,15 a 0,35	0,40 a 0,70	0,40 a 0,60	0,15 a 0,25

3.2. Meios

Na coleta e armazenamento dos dados de temperatura foi utilizado um sistema de aquisição de dados da Linx, composto por módulo condicionador de sinais MCS 1000 V2 e placa de conversão analógico/digital CAD 12/32 e, como sensores, termopares tipo K (chromel – alumel) padrão, faixa 0 a 1260 °C, com pote liso, proteção em aço inox 310S, 1,5 mm de diâmetro, montados a 4 milímetros de profundidade na amostra, ajustados com interferência à peça e assentados a esta através de solda elétrica por descarga capacitiva (figura 3).

Para executar o resfriamento dos corpos de prova e promover a agitação do meio refrigerante, conseqüentemente alterando a severidade e o estado de movimentação deste, foi construído um dispositivo composto de um tanque com capacidade de 70 litros, dotado de um motor de corrente contínua com sensor de rotação preso ao seu eixo, uma hélice e componentes eletroeletrônicos de controle.

O forno utilizado no aquecimento dos corpos de prova foi o Brasimet tipo K400, 18,7 kW, temperatura máxima de 1300 °C do Laboratório de Materiais e Ensaio Mecânicos da Universidade Estadual do Maranhão.

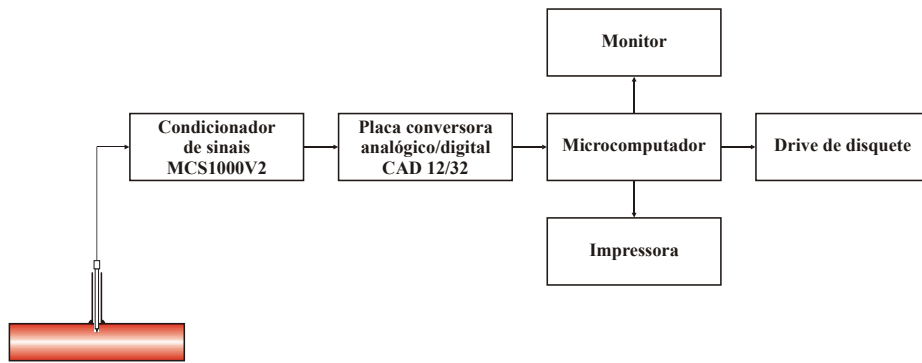


Figura 3 – Esquema do sistema de medição, monitoração e registro de temperatura

3.3 Métodos

Os trabalhos laboratoriais seguiram etapas definidas, da preparação das amostras à digitalização dos resultados. Na figura 4 ilustra-se estas etapas e a seqüência em que ocorreram.

Inicialmente, as barras foram usinadas até o diâmetro de 25 mm e seccionadas em comprimentos equivalentes a cinco vezes este diâmetro, conforme Patrocínio (1999). Foram utilizados 75 corpos de prova, sendo utilizados nos ensaios de têmpera 30 amostras de aço 1045, 30 de aço 8620 e 15 de aço 8640. Destes materiais ainda fabricou-se mais 12 corpos para os ensaios Jominy e 9 para ensaios preliminares.

Após os ensaios preliminares executou-se o ensaio Jominy, usando para isto a bancada do Laboratório de Metalografia e Ensaios Mecânicos da UEMA, fabricada conforme NBR 6339, utilizando-se bico A e flange A1. Em seguida, os ensaios de dureza foram efetuados no durômetro Pantec RBS, modelo RBS-M, escala Rockwell C, ponta de diamante e carga de 150 kg.

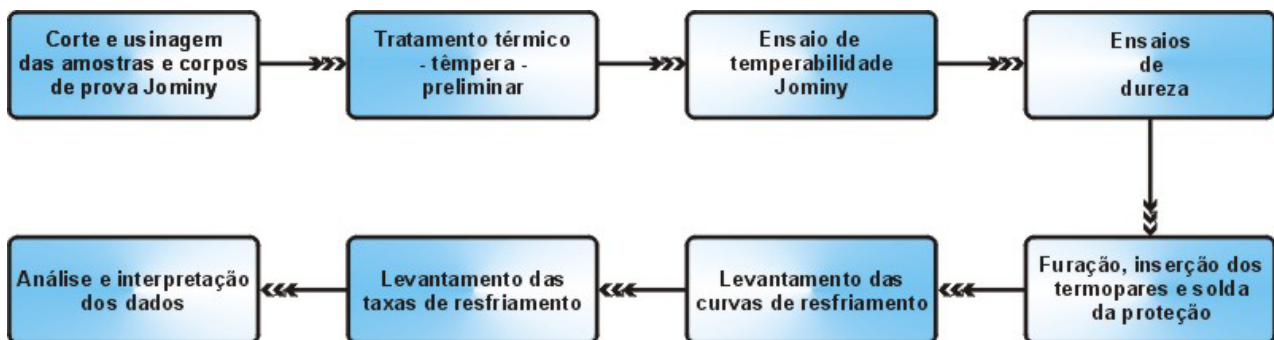


Figura 4 – Metodologia de desenvolvimento do trabalho

Os ensaios de têmpera, 75 no total, foram executados através do aquecimento das amostras até 840 °C, manutenção da temperatura durante cerca de uma hora e resfriamento brusco. Os dados coletados através do sistema de aquisição foram processados e tratados estatisticamente, sendo seus valores médios apresentados e analisados em seguida.

As taxas de resfriamento médias, obtidas a partir da derivação das curvas de resfriamento são também discutidas.

4. Resultados e Discussão

4.1. Aço 1045

Apresenta-se na figura 5 as curvas de resfriamento obtidas na têmpera do aço ABNT 1045, sem a agitação (SA), com agitação moderada (AM) e violenta (AV) do meio refrigerante. Analisando estas, se pode notar que para uma redução de temperatura de 730 para 260 °C, são necessários **9,66 segundos**, sem agitação, **7,26 segundos**, com agitação moderada e **6,89 segundos** quando a agitação do meio foi violenta.

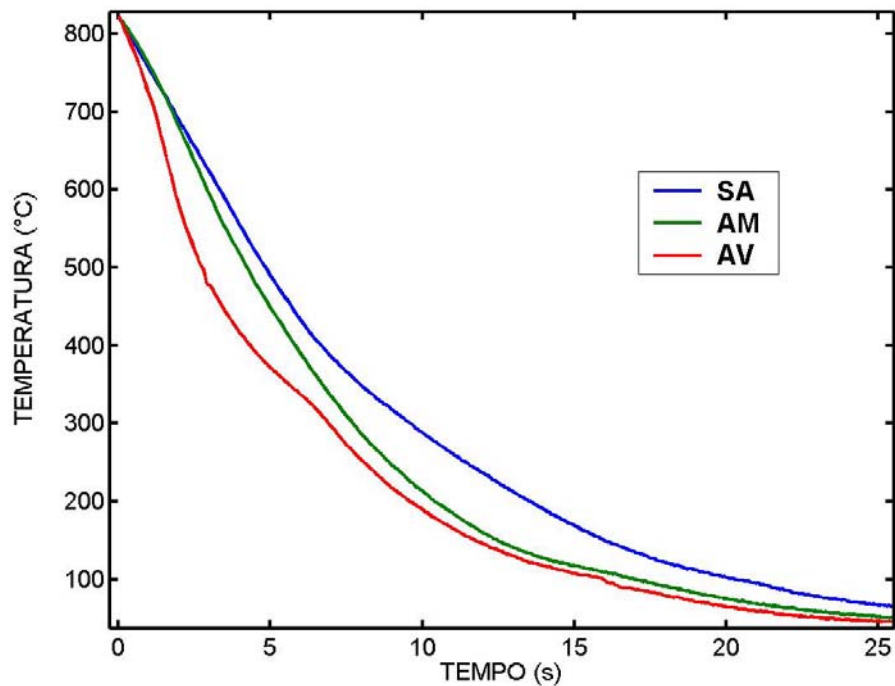


Figura 5 – Curvas de resfriamento do aço ABNT 1045 temperado em água sem agitação (SA), com agitação moderada (AM) e agitação violenta (AV) do meio de resfriamento

Para a têmpera em **salmoura** utilizou-se solução de 10% de cloreto de sódio, sal das marcas Azteca e Nota Dez, moídos e iodados, numa relação de 107,1 g/l. As curvas de resfriamento, figura 6, demonstram que foram necessários **7,81 segundos** para resfriar as amostras de 730°C a 260°C, no caso de meio sem agitação; **7,22 segundos** no caso de agitação moderada; e **7,11 segundos** no caso de agitação violenta.

4.2 Aço 8620

Embora seja um aço especificado para têmpera em óleo, optou-se pela água como meio de resfriamento, para que se tenha um comparativo com os demais aços utilizados.

Analisando a figura 7 verifica-se que os tempos de resfriamento para a faixa de 730 °C a 260 °C são de **2,88 segundos** para o caso em que não se agita o meio, **2,29 segundos** para aquele em que movimenta-se moderadamente o líquido de resfriamento e de **1,99 segundos** para agitação violenta do refrigerante.

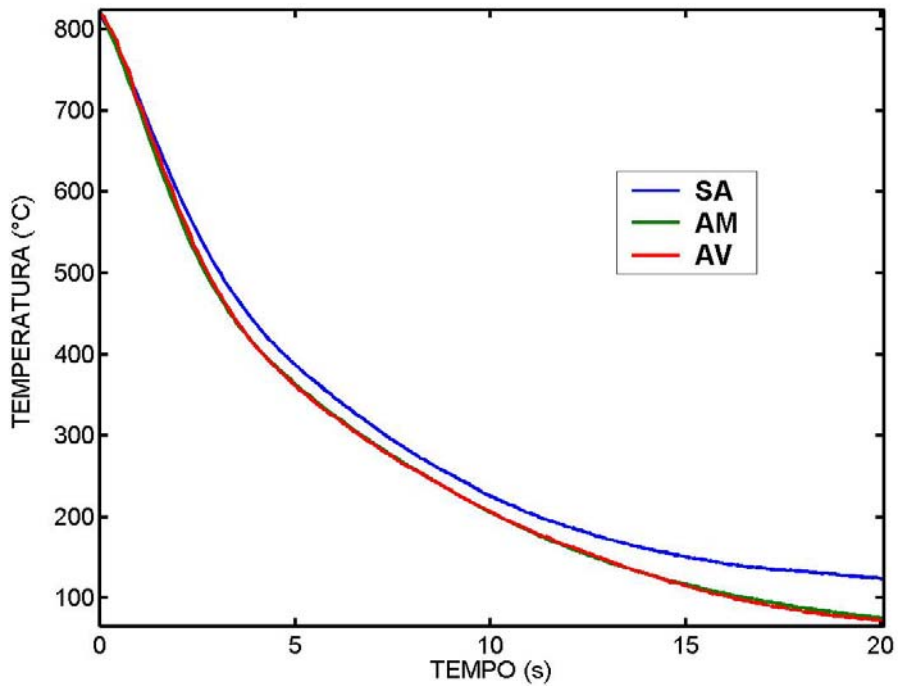


Figura 6 – Curvas de resfriamento do aço ABNT 1045 temperado em salmoura, sem agitação (SA), com agitação moderada (AM) e agitação violenta (AV) do meio de resfriamento

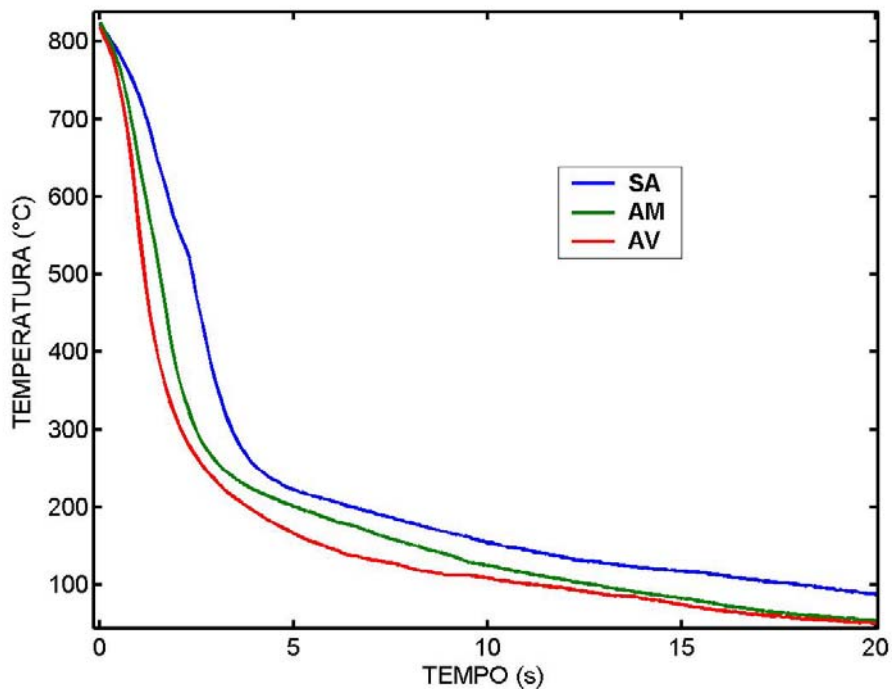


Figura 7 – Curvas de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em água, sem agitação (SA), com agitação moderada (AM) e agitação violenta (AV) do meio de resfriamento

4.3 Aço 8640

O aço ABNT 8640 é um aço liga de alta temperabilidade e muito utilizado na fabricação de virabrequins, eixos, engrenagens, bielas e outros elementos de máquinas. Também, como no caso anterior, apesar da especificação indicar têmpera em óleo, utilizou-se água como meio de refrigeração, para se poder comparar os dados já obtidos nos outros ensaios realizados com este refrigerante.

Conforme se pode notar pela figura 8, o resfriamento para este material ocorre muito bruscamente, em menos de 2 segundos, confirmando a alta temperabilidade do material.

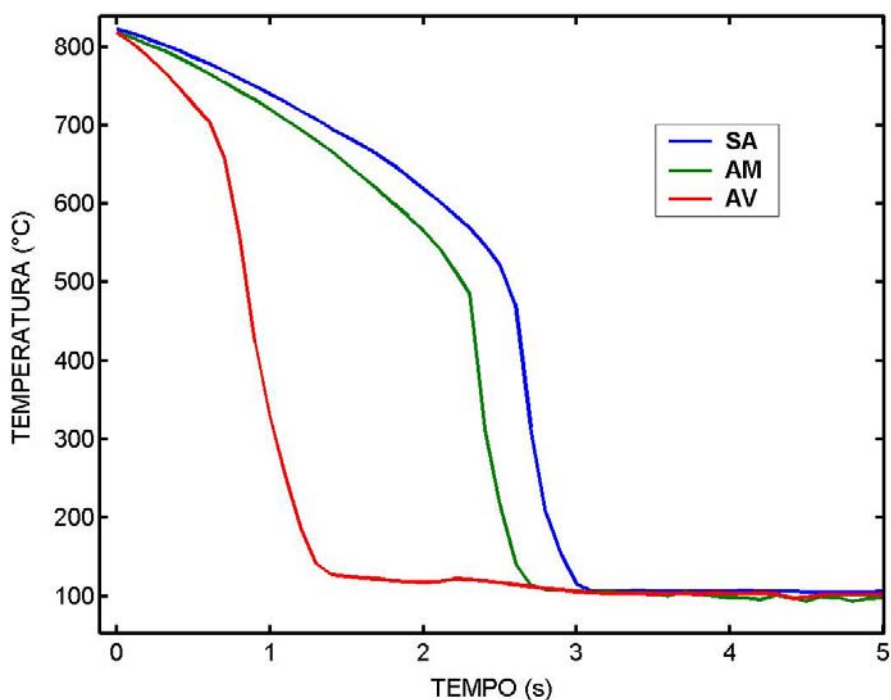


Figura 8 – Curva de resfriamento do aço ABNT 8640 temperado em água, sem agitação (SA), com agitação moderada (AM) e agitação violenta (AV) do meio refrigerante

5. Conclusões

No geral, a agitação do meio de refrigeração aumenta a taxa de transferência de calor da peça para o meio durante o processo de têmpera. Este aumento fica evidenciado nos ensaios com os aços ABNT 1045 e 8620 (tabela 4.2) quando, partindo-se de um meio sem agitação para um de maior agitação, a taxa máxima de resfriamento atinge valores de 27,65% e 36,44% maiores, respectivamente para o aço 1045 e 8620, do que quando resfriados sem agitação. Com o aumento da agitação, saindo agora do estado sem agitação para um estado de agitação violenta, o aumento registrado foi maior que 100% para ambos os materiais (110,09% e 100,45%).

Os aumentos nas taxas máximas de resfriamento são acompanhados das devidas diminuições dos tempos de resfriamento, o que nos permite concluir que, durante o estágio de filme de vapor, a agitação quebra a camada de vapor muito mais cedo, forçando a iniciação antecipada do estágio de borbulhamento. Como resultado, o estágio de baixa taxa de resfriamento, primeiro estágio, é reduzido e o de alta taxa de troca, segundo estágio, é aumentado, elevando desta forma a eficiência do meio e aumentando a sua severidade. Um outro fato importante é que a agitação força a formação de bolhas de forma mais intensa e menores durante o estágio de borbulhamento, o que também contribui para a elevação das taxas de resfriamento do segundo estágio do resfriamento. A camada que envolve o material, formando assim uma espécie de isolante térmico para esta, com a agitação do meio deixa de existir, o que aumenta a velocidade de resfriamento do meio. Finalmente, a agitação do líquido, durante o terceiro estágio, renova de forma constante o líquido em contato com o material. Este novo líquido, em temperatura menor, produz um diferencial de temperatura maior em relação à superfície da amostra, resultando em maiores taxas de dissipação de calor.

Uma outra constatação foi, com o aumento da severidade do meio, troca da água por salmoura, o aumento da agitação torna-se menos eficaz no aumento das velocidades máximas de resfriamento. Os ganhos proporcionados pelo aumento do estado de agitação do meio foram de 16,06%, para o aço 1045 e 22,99%, para o aço 8620, saindo-se do estado sem agitação do refrigerante para o de agitação moderada. Partindo-se para o estado de agitação violenta os percentuais foram de 17,34% para o aço 1045 e de 87,62% para o aço 8620, menos expressivos que para têmpera em água.

Ainda se pode constatar que o teor do elemento carbono no aço influencia nos tempos de resfriamento e, conseqüentemente, nas taxas de resfriamento. Quando se compara os aços 8620 e 8640, conforme a tabela 4.2 demonstra, os tempos de resfriamento para o primeiro são maiores em até aproximadamente 70% do que aqueles obtidos durante o resfriamento do aço 8640 nas mesmas condições de agitação do meio refrigerante. Isto se deve, principalmente, ao maior teor de carbono do aço 8640, em torno de 0,40%.

6. Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 1989, “Aço - determinação da temperabilidade (Jominy): NBR 6339”, Rio de Janeiro: ABNT, 16 p.

Novikov, Iliia. 1994, “Teoria dos tratamentos térmicos dos metais”. Rio de Janeiro: Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 568 p.

Patrocínio, B. A. 1999, “Determinação de velocidades críticas de têmpera em aços por meio de curvas de resfriamento”. São Carlos – SP: Universidade de São Paulo, 117 p. Dissertação (Mestrado).

Shuhui Ma et al. 2003, “Quenching-understanding, controlling and optimizing the process”. Fourth International Conference on Quenching and the Control of Distortion. 6 p.

Shuhui Ma. 2002, “Characterization of the performance of mineral oil based quenchants using CHTE Quench Probe System”. Worcester,MA-USA: Worcester Polytechnic Institute. Dissertação (mestrado).

Totten, G. E. Bates, C.E. Clinton, N.A. 1993, “Handbook of quenchants and quenching technology”. Ohio, EUA: ASM International, 507 p.

Totten, G. E. Webster, G. M. 2003, “Quenchant Fundamentals: Condition Monitoring of Quench Oils”. [on line] http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=430&relatedbook_group=OilAnalysis. Acessado em 15/jul/2003.

A PARAMETRIC STUDY OF QUENCHING PROCESS OF 1045, 8620 AND 8640 STEEL SPECIMENS

Antonio Rogério Torres Carvalho

Universidade Estadual do Maranhão – DEMECP - Cidade Universitária Paulo VI – Tirirical – São Luís-MA
rogerio_torres@yahoo.com

Valdemar Silva Leal

Universidade Estadual do Maranhão – DEMECP - Cidade Universitária Paulo VI – Tirirical – São Luís-MA
valdemar@cct.uema.br

Waldemir Silva de Lima

Universidade Estadual do Maranhão – DEMECP - Cidade Universitária Paulo VI – Tirirical – São Luís-MA
waldemir@cct.uema.br

Kamal A. R. Ismail

Universidade Estadual de Campinas– Faculdade de Engenharia Mecânica – Caixa Postal 6122 - Campinas-SP
kamal@fem.unicamp.br

Abstract

Study about the influence of the agitation range and quench severity of the quenchant on cooling times and rates during the quench. The assays were accomplished with samples of steel 1045, 8620 and 8640, water and brine quenched, by increasing the agitation of the quenchant. The data show a rise in the maximum cooling rates of the 27.65% - 110%, and a reduction in the times of cooling of the 7.83% - 63.25%, on the three materials studied, with the increase of the agitation of the quenchant. They were verified too, a gain in the cooling rates and times with the variation of the quenchant severity, water to brine, of 73.27%, without agitation, and reduction of cooling time in approximately 20%. The data still show a gain in the cooling time and rates caused by the percentage of carbon increase on the steel, when be compared with the data scored in the samples of steel 8620 and 8640.

Key words: Heat treatment, quench, quenchant agitation, quench severity, critical speed.