UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo da Influência da Agitação e da Severidade de Têmpera do Meio de Resfriamento na Determinação de Velocidades Críticas de Têmpera

Autor: Antonio Rogério T. Carvalho Orientador: Prof. Dr. Valdemar Silva Leal

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE MECÂNICA

Estudo da Influência da Agitação e da Severidade de Têmpera do Meio de Resfriamento na Determinação de Velocidades Críticas de Têmpera

Autor: Antonio Rogério T. Carvalho Orientador: Prof. Dr. Valdemar Silva Leal

Curso: Engenharia Mecânica Área de concentração: Instrumentação e Controle Industrial

Dissertação de mestrado profissional apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

> São Luís, 2004 MA.-Brasil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

Estudo da Influência da Agitação e da Severidade de Têmpera do Meio de Resfriamento na Determinação de Velocidades Críticas de Têmpera

Autor: Antonio Rogério T. Carvalho Orientador: Prof. Dr. Valdemar Silva Leal

Prof. Dr. Kamal A. R. Ismail, Presidente Instituição: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Prof. Dr. Valdemar Silva Leal Instituição: Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima Instituição: Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

São Luís, 05 de fevereiro de 2004

Dedicatória

À minha mãe, irmãos e sobrinhas.

Agradecimentos

A Deus, pela vida;

Agradeço, honesta e humildemente:

a minha mãe, pelo amor, carinho, tranqüilidade, confiança e compreensão de sempre;

a minha família, base da minha existência;

ao Prof. Dr. Valdemar Silva Leal, pela oportunidade, ensinamentos, orientação, paciência e amizade;

aos amigos do Núcleo Tecnológico de Engenharia e do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Maranhão, pelo companheirismo, ajuda e incentivo;

ao Eng. Valderci, pelo valioso apoio no desenvolvimento deste estudo;

a Ana Montenegro, pela revisão gramatical;

a UEMA, UNICAMP e CLA, pela oportunidade;

a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram na realização deste trabalho.

"O que motiva um homem? Muitas coisas, mas sobretudo a curiosidade. Se em todo o mundo todas as pessoas fossem conformistas, a civilização não avançaria. Se fossem todos curiosos e aventureiros, se extinguiriam. O equilíbrio está na existência de uns 15 ou 20% do segundo grupo."

Chacal (hacker argentino)

Resumo

CARVALHO, Antonio Rogério Torres. Estudo da influência da agitação e da severidade de têmpera do meio de resfriamento na determinação de velocidades críticas de têmpera.
Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
62 p. Dissertação de Mestrado. E-mail:rogerio_torres@yahoo.com

Estuda-se a influência da variação da agitação e da severidade de têmpera do meio de resfriamento sobre as curvas e taxas de resfriamento durante o processo de têmpera 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 têmpera 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, têmpera, agitação do meio de resfriamento, severidade de têmpera, velocidade crítica.

Abstract

CARVALHO, Antonio Rogério Torres. *Study about the influence of the agitation and the severity of state of hardness of the cooling middle in the determination of critical speeds of state of hardness*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 62 p. Dissertação (Mestrado). E-mail:rogerio_torres@yahoo.com

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.

Índice

	Dedicatóriaiii
	Agradecimentos iv
	Resumo vi
	Abstract vii
	Índice viii
	Lista de Figurasx
	Lista de Tabelas xiii
	Nomenclatura xiv
1	INTRODUÇÃO1
1.1	Preliminares1
1.2	Objetivo2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
2.1	Alotropia do ferro puro e influência do carbono
2.2	Tratamentos térmicos7
2.3	Têmpera 10
2.4	Mecanismo de resfriamento13
2.5	Diagramas de transformação isotérmica – diagramas TTT15
2.6	Diagrama de resfriamento contínuo – CCT 16

2.7	Curvas de resfriamento17
2.8	Transferência de calor durante a têmpera18
2.9	Temperabilidade
2.10	Severidade de têmpera
3	MATERIAIS E MÉTODOS
3.1	Materiais
3.2	Meios
3.3	Métodos
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO
4.1	Temperabilidade dos materiais – Ensaio Jominy
4.2	Dureza dos materiais – curvas U
4.3	Curvas e taxas de resfriamento
4.3.1	Aço 104540
4.3.2	Aço 862047
4.3.3	Aço 864050
4.4	Dureza dos materiais testados
5	CONCLUSÕES
6	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lista de Figuras

Figura 2.1	Transformação alotrópica do ferro4
Figura 2.2	Diagrama Ferro-Carbono5
Figura 2.3	Esquema de classificação dos tipos de tratamentos térmicos dos metais e ligas7
Figura 2.4	Tratamentos térmicos do aço8
Figura 2.5	Deformações do aço acima e abaixo da zona crítica9
Figura 2.6	Limites de resistência à tração e ao escoamento de aços normalizados e revenidos e de aços temperados e revenidos11
Figura 2.7	Relação de dureza, percentual de carbono e quantidade de martensita12
Figura 2.8	Primeiro estágio - cobertura de vapor sobre a peça em resfriamento14
Figura 2.9	Segundo estágio - ebulição do meio de resfriamento14
Figura 2.10	Terceiro estágio – resfriamento convectivo15
Figura 2.11	Diagrama IT para o aço 105016
Figura 2.12	Diagrama de resfriamento contínuo, aço 0,44% de carbono17
Figura 2.13	Mecanismos de resfriamento18
Figura 2.14	Taxa de D_u/D em função do diâmetro da barra para barras de aço 3140 temperadas em água e óleo
Figura 3.1	Bancada para agitação do meio de refrigeração30
Figura 3.2	Diagrama elétrico da bancada de agitação do meio31
Figura 3.3	Esquema do sistema de medição, monitoração e registro de temperatura32
Figura 3.4	Metodologia de desenvolvimento do trabalho

Figura 3.5	Meio de resfriamento sem agitação, agitação moderada e com agitação violenta
Figura 4.1	Valores obtidos no ensaio Jominy sobrepostos aos valores admissíveis de dureza para o aço ABNT, SAE, AISI 1045
Figura 4.2	Valores obtidos no ensaio Jominy sobrepostos aos valores admissíveis de dureza para o aço ABNT, SAE, AISI 8620
Figura 4.3	Valores obtidos no ensaio Jominy sobrepostos aos valores admissíveis de dureza para o aço ABNT, SAE, AISI 8640
Figura 4.4	Medidas de dureza na seção transversal do aço 1045, temperado sem agitação do meio de resfriamento
Figura 4.5	Medidas de dureza na seção transversal do aço 8620, temperado sem agitação do meio de resfriamento
Figura 4.6	Medidas de dureza na seção transversal do aço 8640, temperado sem agitação do meio de resfriamento40
Figura 4.7	Curvas de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em água sem agitação (SA), agitação moderada (AM) e agitação violenta (AV) do meio de resfriamento
Figura 4.8	Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em água sem agitação do meio refrigerante
Figura 4.9	Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em água com agitação moderada do meio refrigerante
Figura 4.10	Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em água com agitação violenta do meio refrigerante
Figura 4.11	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 4.12	Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em salmoura sem agitação do meio refrigerante
Figura 4.13	Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em salmoura com agitação moderada do meio refrigerante
Figura 4.14	Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em salmoura com agitação violenta do meio refrigerante

Figura 4.15	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
Figura 4.16	Taxa de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em água sem agitação do meio refrigerante
Figura 4.17	Taxa de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em água com agitação moderada do meio refrigerante
Figura 4.18	Taxa de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em água com agitação violenta do meio refrigerante
Figura 4.19	Curva de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em salmoura sem agitação (SA), com agitação moderada e agitação violenta do meio refrigerante
Figura 4.20	Curva de resfriamento do aço ABNT 8640, temperado em água, sem agitação (SA), com agitação moderada (AM) e agitação violenta (AV) do meio refrigerante
Figura 4.21	Perfil de dureza da seção média da amostra de aço ABNT 1045, temperado em água
Figura 4.22	Perfil de dureza da seção média da amostra de aço ABNT 1045, temperado em salmoura
Figura 4.23	Perfil de dureza da seção média da amostra de aço ABNT 8620, temperado em água
Figura 4.24	Perfil de dureza da seção média da amostra de aço ABNT 8640, temperado em água

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Severidade de têmpera de vários meios de têmpera	27
Tabela 3.1	Composição química nominal dos aços 1045, 8620 e 8640	29
Tabela 4.1	Dureza inicial dos materiais	38
Tabela 4.2	Resumo dos ensaios realizados	55

Nomenclatura

Letras Latinas

а	área de influência das bolhas na superfície aquecida $[m^2]$
A	área da superfície aquecida $[m^2]$
Ar	número de Arquimedes
B,b	constante
c_p	calor específico a pressão constante[J / kg • K]
D	diâmetro instantâneo da bolha de ar [m]
D_d	diâmetro da área seca sob a bolha de ar [m]
G	vazão [m ³ /s]
g	aceleração gravitacional [m / s ²]
g_c	taxa de conversão
Gr	número de Grashof
h	coeficiente de transferência de calor [kW / m ² • K]
Η	severidade de têmpera
HR	dureza Rockwell
H_{fg}	calor latente durante evaporação [J / kg]
Ja	número de Jacob
K,k	condutividade térmica [W / m • K]
Ν	número de locais de atividade de nucleação
Pr	número de Prandtl
q, q"	fluxo de calor $[W / m^2]$
Ra	número de Rayleigh
t_g	tempo de crescimento das bolhas de ar (s)
Т	temperatura [°C, K]

Letras Gregas

 α difusividade térmica [m²/s]

- β coeficiente de expansão térmica [K⁻¹]
- ϕ parâmetro da área de influência das bolhas na superfície aquecida
- γ parâmetro da área de influência das bolhas na superfície aquecida
- μ viscosidade [Pa s]
- v viscosidade cinemática [m²/s]
- ρ densidade [kg / m³]
- σ tensão superficial [N / m]

Subscrito

<i>cp</i> referencia a transição entre o primeiro e segundo estagio do restriame	ansição entre o primeiro e segundo estagio do restriamen	lento
--	--	-------

- *crit* referência ao valor crítico
- f referência ao líquido saturado
- *fg* referência à mudança de estado de líquido para vapor
- g,G referência à gás ou condição de vapor
- *l,L* líquido
- s relativo à superfície
- sat saturação
- v vapor
- *vp* referência à transição entre o segundo e terceiro estágio do resfriamento
- *w* parede, periferia

Sobrescrito

* referência ao valor crítico ou parâmetro adimensional

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
NUTENGE	Núcleo Tecnológico de Engenharia
SAE	Society of Automotive Engineers
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão

Capítulo 1

Introdução

1.1 Preliminares

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 têmpera (endurecimento por resfriamento rápido) e o revenido (alívio das tensões).

Embora de larga utilização, a aplicação dos tratamentos térmicos, em grande parte, baseiase 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.

1.2 Objetivo

A finalidade deste estudo é determinar a influência da agitação e da severidade de têmpera 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 têmpera.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Alotropia do ferro puro e influência do carbono

Para se compreender como as propriedades do aço variam, deve-se examinar as transformações alotrópicas do Ferro e a ação do Carbono sobre estas, figura 2.1.

Até a temperatura de 912 °C, o ferro está cristalizado em uma estrutura *cúbica de corpo centrado*, com átomos de ferro nos vértices e no centro da célula, chamado de *ferro alfa*. Observa-se, entretanto, que na temperatura de 768 °C, há um desprendimento de energia e o ferro deixa de ser magnético. A esta temperatura dá-se o nome de *ponto Curie* e a alteração deve-se à mudança dos "spins" dos elétrons dos átomos. Antes da elucidação deste fenômeno, a esta faixa entre 768 °C e 912 °C, denominava-se de *ferro beta*.

A partir de 912 °C até 1.394 °C, a estrutura formada é composta por átomos nos vértices e no centro das faces de um cubo, *cúbica de face centrada*, e denomina-se *ferro gama*.

Após 1.394 °C até a temperatura de fusão, 1.538 °C, o ferro volta a ter uma estrutura cúbica de corpo centrado, idêntica àquela da faixa até 912 °C, porém com nome de *ferro delta*.

A adição de carbono ao metal ferro provoca modificações nas temperaturas das transformações alotrópicas, uma vez que o efeito deste é o de estabilizar o ferro gama. Além

disso, a solubilidade do carbono varia com a temperatura, fazendo surgirem variadas texturas durante o aquecimento ou resfriamento da liga.



Figura 2.1 – Transformação alotrópica do ferro, Höltz (1992)

a) Diagrama de equilíbrio da liga ferro-carbono

As ligas de ferro-carbono de interesse metalúrgico são aquelas cujo teor de carbono é inferior a 6,69%. O aço, composto por 0,02% a 2,11% de carbono, e o ferro fundido, de 2,11% a 6,69% de carbono, são as ligas mais importantes destes elementos, figura 2.2.

No aço, o carbono encontra-se combinado a uma parte do ferro formando o carboneto de ferro (Fe₃C), também chamado *cementita*, que contém 6,69% de carbono. No estado líquido, este carboneto encontra-se inteiramente dissolvido na massa líquida, formando uma solução homogênea. Ao solidificar-se, esta solução permanece homogênea devido à propriedade do ferro gama em poder manter uma solução sólida mais extensa com o carbono, denominada *austenita*.



5

A linha GSE e a horizontal de 727 °C do diagrama da figura 2.2 marcam o início e o término das modificações da textura do aço, quando aquecidos ou resfriados. Se resfriados lentamente, esta textura se conserva até a temperatura ambiente, caso contrário, têm-se texturas compostas. Estas linhas delimitam o que se chama de *zona crítica*.

Como a solubilidade do carbono no ferro gama é limitada, máxima de 2,11 % à 1.148 °C e de 0,77% à 727 °C, a medida em que se resfria a liga, o carbono passa a precipitar-se nos contornos de grãos de austenita, por difusão, até ocorrer a transformação alotrópica do ferro gama em ferro alfa, à 727 °C,. Como o ferro alfa forma uma solução pouco extensa com o carbono (*ferrita*), ao passar pela horizontal de 727 °C, a austenita transforma-se em *perlita*, grãos lamelares de ferro alfa e carboneto em camadas finas e alternadas.

Para os aços resfriados lentamente, abaixo da horizontal de 727°C, temos, resumidamente:

- até 0,77% C aços hipoeutetóides a ferrita isola-se ou precipita-se junto aos contornos de grãos de austenita resultando em ferrita + perlita;
- 0,77% C aços eutetóides a ferrita formada envolve a austenita formando lamelas, ou seja, perlita; e,
- 0,77% a 2,11% *aços hipereutetóides* forma-se a perlita envolvida por carbonetos precipitados resultando em perlita + cementita.

b) Influência do carbono sobre as propriedades mecânicas

No aço, o carbono ao unir-se ao ferro forma o carboneto de ferro, extremamente duro. Devido a isto, quanto maior o teor de carbono, maior será a quantidade de carboneto e conseqüentemente, maior a dureza, maior a resistência a tração e menor a ductilidade e resistência ao choque. "As propriedades de um metal formado por grãos de um constituinte envolvido por grãos de outro constituinte, tendem para aquelas do constituinte envolvente", confirma Colpaert (1974).

Logo, os aços com baixos teores de carbono em que a ferrita, dúctil, é o componente envolvente são fáceis de deformar à temperatura ambiente. Àqueles com teores elevados de

carbono e predominância da cementita, dura e quebradiça, nos contornos de grãos, apresentam-se quebradiços e difíceis de deformar.

2.2 Tratamentos térmicos

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 têmpera, 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.



Figura 2.3 - Esquema de classificação dos tipos de tratamentos térmicos dos metais e ligas, Novikov (1994)

Desta forma, os tratamentos térmicos, figura 2.3, são os processos mais propagados e importantes na modificação das propriedades dos metais e ligas, nas indústrias de produção de máquinas e semiprodutos. Suas aplicações não se dão somente em fases intermediárias do

processo produtivo (antes da usinagem, conformação, etc.), mas também nas operações finais, cujo objetivo é dar ao metal ou liga um conjunto de propriedades mecânicas, físicas e químicas que garantam as características necessárias a cada 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."

Conforme a Houghton (2000), "é uma operação ou combinação de operações que envolvem o aquecimento e o resfriamento controlado de um metal em estado sólido com o propósito de obter propriedades específicas."

Vê-se que os tratamentos térmicos visam a modificação das estruturas e propriedades do metal, ou liga, sujeito à ação do calor. Esta modificação, que poderá ser de forma a aumentar ou diminui determinada propriedade, não deverá desaparecer após o tratamento, ficando intrínseca ao material tratado.

Os tratamentos térmicos consistem, basicamente, em aquecer o material até uma determinada temperatura e esfriá-lo sob condições específicas. Os mais comuns são o recozimento, a têmpera e o revenido, figura 2.4.



Figura 2.4 – Tratamentos térmicos do aço, Colpaert (2000)

No recozimento, o aquecimento é executado até acima da zona crítica e o resfriamento é feito lentamente. Visa, normalmente, restabelecer as propriedades mecânicas normais do material, afetadas por um tratamento térmico ou mecânico anterior.

A têmpera, em geral, visa aumentar a dureza do material através do aquecimento até acima da zona crítica, seguido de um resfriamento brusco.

Já o revenido busca reduzir os efeitos do acúmulo de tensões provocado pela têmpera, melhorando a resistência ao choque, aumentando os limites de escoamento e de alongamento.

a) Crescimento de grãos e trabalho a quente

Quando se aquece um aço, fazendo-o atravessar a zona crítica, toda a perlita transforma-se em austenita, dando origem a pequenos grãos. Com o tempo, esses grãos começam a crescer através da migração de átomos de grãos menos estáveis, através dos contornos destes, de forma mais rápida quanto maior for a temperatura.



Figura 2.5 – Deformações do aço acima e abaixo da zona crítica, Colpaert (2000)

A conseqüência provocada pela granulação grosseira é tornar o material quebradiço, pois a coesão entre os grãos fica reduzida pela concentração de impurezas nos contornos, reduzindo suas qualidades mecânicas.

Quando um aço apresenta grãos excessivamente grandes, devido a tratamentos térmicos, diz-se que está *superaquecido*. Quando este superaquecimento ocorre próximo à linha *solidus* e o aço apresenta oxidações nos contornos de grãos, diz-se que está *queimado*. No primeiro caso, ainda é possível regeneração; no segundo, não.

A laminação, o forjamento, etc..., feitos a temperaturas acima da zona crítica reduzem o tamanho de grão, forçando a recristalização, de forma que, terminada a operação, os grãos não fiquem deformados e o aço perca suas propriedades plásticas, figura 2.5.

2.3 Têmpera

Dos tratamentos térmicos, merece particular interesse a têmpera do aço. Conforme Novikov (1994) descobrimentos arqueológicos mostram que a têmpera de peças de aço ficou generalizada desde os séculos V e VI a. C. e, na Idade Média, surgiram variadas operações tecnológicas como: têmpera em líquidos, têmpera em corrente de ar, têmpera localizada de lâminas e outras.

A têmpera é considerada o principal método de endurecimento dos aços carbono e de baixa liga, figura 2.6. É caracterizada pelo resfriamento brusco do aço a partir de uma temperatura elevada (temperatura de austenitização) até a temperatura ambiente, cujo resultado é a transformação da austenita em martensita.

No resfriamento lento através da zona crítica, temos:

- nucleação da ferrita, ou cementita;
- transformação da austenita em perlita lamelar à temperatura de 727 °C.

No entanto, na têmpera, devido ao resfriamento brusco, o que pode acontecer é, conforme Colpaert (1974):

a) que a quantidade de ferrita, ou de cementita, nucleada inicialmente, diminua com o aumento da velocidade de resfriamento, até que, acima de um certo limite, se anule, de modo que o aço atinja a linha inferior da zona crítica ainda inteiramente austenítico;

b) que a austenita abaixo da linha inferior da zona crítica se transforme em perlita de lamelas cada vez mais finas e mais próximas, quanto mais rápido for o resfriamento, chagando ao ponto das lamelas se tornarem indiscerníveis ao microscópio comum;

c) que para velocidades de resfriamento ainda maiores, não ocorra transformação em perlita e em temperatura mais baixas se forme um constituinte denominado 'martensita', que pode ser considerado como uma solução sólida supersaturada e metaestável de carbono em ferro alfa, que, devido a essa supersaturação, se apresenta com uma estrutura tetragonal de corpo centrado e não cúbica de corpo centrado.



Figura 2.6 – Limites de resistência à tração e ao escoamento de aços normalizados e revenidos e de aços temperados e revenidos, Totten (1993)

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 nãolinear com a temperatura, confirma Shuhui Ma e colaboradores (2003). Estes pesquisadores verificaram que a temperatura e aspereza superficial, a geometria da peça, a orientação de penetração da peça no meio de resfriamento e agitação do fluido afetam de forma significativa tal transferência.

A distância atingida pelo endurecimento da peça, a partir da sua superfície em direção ao centro, é a medida da efetividade da têmpera, ou seja, o percentual mínimo de martensita conseguido em uma determinada profundidade serve como elemento de indicação da efetividade do processo de têmpera, figura 2.7.



Figura 2.7 – Relação de dureza, percentual de carbono e quantidade de martensita (ASM International – Metals handbook, 1991)

Utiliza-se a têmpera em peças que necessitem de grande limite de resistência e, quase sempre, após esta, se faz necessário o complemento de um revenido para redução das tensões acumuladas que tornam a peça frágil.

Os principais parâmetros da têmpera são a temperatura de aquecimento, o tempo de exposição e a velocidade de resfriamento. A temperatura de aquecimento e o tempo de exposição determinam a ocorrência ou não das modificações de fases necessárias, enquanto a velocidade de resfriamento, inversamente, deve garantir que sejam evitadas tais transformações, bem como a formação de um estrutura metaestável, fase martensítica para o aço, Novikov (1994).

Existem três tipos de têmpera: com e sem transformação polimórfica e com fusão superficial. A primeira, com transformação polimórfica, é utilizada desde há muito tempo, antes da nossa era até os dias atuais, em aços e ligas não ferrosas. A têmpera sem transformação polimórfica é do limiar do século XX e a partir das décadas 20 e 30, e, juntamente com o envelhecimento, transformou-se no principal processo de endurecimento das ligas à base de metais não-ferrosos. O terceiro tipo surgiu na década de 70 e começou com a utilização de raios laser pela indústria para aquecimento de peças, ainda tem utilização mais restrita que os outros tipos.

2.4 Mecanismo de resfriamento

É importante conhecer os mecanismos de têmpera e os fatores que afetam o processo uma vez que estes fatores podem ter uma significante influência na seleção do meio de resfriamento, na severidade e no tipo deste.

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:

Cobertura de vapor – é caracterizado pela formação de uma camada (filme) de vapor em torno do metal aquecido. Esta camada de vapor, figura 2.8, 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 – temperatura na qual o vapor é mantido. Conforme Totten (1993), a transição do estágio A para o B ocorre através de repetidas ondas que atingem a superfície da peça nesta temperatura 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.



Figura 2.8 – Primeiro estágio - cobertura de vapor sobre a peça em resfriamento, Houghton (2003)

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, figura 2.9.



Figura 2.9 - Segundo estágio - ebulição do meio de resfriamento, Houghton (2003)

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, figura 2.10.



Figura 2.10 – Terceiro estágio – resfriamento convectivo, Houghton (2003)

Conforme Shuhui Ma (2002), as taxas de transferência de calor nestas regiões são influenciadas por vários fatores, como: agitação, viscosidade, temperatura e severidade do meio de resfriamento.

2.5 Diagramas de transformação isotérmica – diagramas TTT

Também conhecidos como diagrama IT (*isothermal transformation*), curvas em C, ou em S e diagrama TTT (transformação – tempo – temperatura) são utilizados para identificar o tempo e a temperatura em que ocorrem as diversas transformações no estado sólido dos aços, prevendo, desta maneira, os constituintes resultantes e as conseqüentes propriedades do material, Höltz (1992).

O diagrama TTT é um diagrama temperatura (ordenada) *versus* tempo (abscissa – normalmente logarítmica), para temperaturas até a faixa da zona crítica do material, figura 2.11. A primeira curva determina o tempo necessário para que a transformação da austenita se inicie; a segunda, o tempo necessário para o término desta transformação. As temperaturas de 220 °C e 110 °C, no exemplo, indicam, respectivamente, o início e o término da transformação em martensita, que ocorre de forma quase instantânea.



Figura 2.11 – Diagrama IT para o aço 1050, Askeland (2002)

As curvas TTT, conseqüentemente os diagramas IT, diferem de aço para aço. Em primeiro lugar, pela representação da temperatura crítica superior; em segundo, pelo aparecimento de mais uma curva, indicando o início da separação da ferrita (aços hipoeutetóides) ou da cementita (aços hipereutetóides), quando estes entram na zona crítica durante o resfriamento lento; em terceiro, o deslocamento das curvas para a direita (baixo teor de carbono) ou para a esquerda (alto teor de carbono); e, em quarto, a variação da temperatura de início e fim da transformação martensítica. Logo, para cada aço temos um diagrama TTT.

2.6 Diagrama de resfriamento contínuo - CCT

Embora de estudo simples, as transformações térmicas raramente ocorrem à temperatura constante, isto é, as transformações que mais interessam são aquelas que ocorrem sob resfriamento contínuo, com maior ou menor velocidade, desde a temperatura de austenitização até a temperatura ambiente, como nos tratamentos térmicos de têmpera.

Os diagramas utilizados para a representação destas transformações recebem o nome de diagramas de resfriamento contínuo (CCT), figura 2.12.



Figura 2.12 – Diagrama de resfriamento contínuo, aço 0,44% de carbono, Colpaert (2000)

2.7 Curvas de resfriamento

No processo de têmpera, as taxas de resfriamento devem ser rápidos o suficiente para permitir a formação da microestrutura desejada, mas lenta o suficiente para evitar tensões residuais e distorções. As taxas de resfriamento são influenciadas pela difusividade térmica do material e pela habilidade do meio de têmpera em remover o calor da superfície do material em teste.

As curvas das velocidades de resfriamento são representadas nos diagramas de Transformação x Tempo x 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 2.13.



Figura 2.13 – Mecanismos de resfriamento, Totten (1993)

2.8 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, segundo, 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

 (fh_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:

$$h_{c} = 0,425 \left\{ \frac{(k_{G})^{3} H_{fg}^{'} \rho_{G} g(\rho_{L} - \rho_{G})}{\mu_{G} (T_{W} - T_{sat}) [g_{C} \sigma / g(\rho_{L} \rho_{G})]^{1/2}} \right\}$$
(2.1)

Que pode ser expressa na forma geral como:

$$(Nu_B)_f = 0.425 \left(Ra_B^*\right)_f^{1/4} \left[\frac{H'_{fg}}{c_{pG}(T_W - T_{sat})}\right]_f^{1/4}$$
(2.2)

Onde:
$$(Nu_B) = \frac{h_c B}{k_G}$$

 $(Ra_B^*) = Gr_B^* \Pr_G$
 $= \left[\frac{B_3 \rho_G (\rho_L - \rho_G)g}{\mu_G^2}\right] \left(\frac{c_{pG} \mu_G}{k_G}\right)$
 $B = \left[\frac{g_c \sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}\right]^{1/2}$

f subscrito significa que a propriedade física do vapor é tomada a pressão p_L e temperatura T_f .

Para um cilindro na horizontal, Sciance e colaboradores (1967) sugerem:

$$\left(Nu_{B}\right)_{f} = 0.369 \left(\frac{Ra_{B}^{*}}{\left(T_{r}\right)^{2}}\right)_{f}^{0.267} \left[\frac{H_{fg}^{'}}{c_{pG}\left(T_{W} - T_{sat}\right)}\right]_{f}^{0.267}$$
(2.3)

Estas equações demonstram 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}) ;

$$q_{ME} = \frac{\gamma \phi \sqrt{\pi}}{10} B^2 A r^{0,27} Ja(\alpha_l)^{3/2} \cdot \sqrt{t_g} \rho_l H_{fg}\left(\frac{N}{A}\right)$$
(2.4)

onde: N/A é a densidade local da nucleação.

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{k_s \rho_s C_{ps}}{k_l \rho_l C_{pl}}\right)}$$

$$\phi = \left[1 - \left(\frac{D_d}{D}\right)^2\right], \text{ e } D_d \text{ \acute{e} o diâmetro da área seca sob a bolha.}$$

$$Ja = \frac{c_p \rho_L (T_w - T_b)}{H_{fg} \rho_G}$$

$$Ar = \left(g/v_l^2\right) \cdot \left(\rho/\rho_l g\right)^{3/2}$$

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

$$q_{R} = 2\sqrt{\left(\frac{k_{l}\rho_{l}C_{pl}}{\pi t_{w}}\right)} \cdot \left(\frac{N}{A} \cdot a\right) \cdot \left(T_{w} - T_{sat}\right)$$
(2.5)

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

$$q_{NC} = \frac{0.14k_{l}}{L} \left(Gr \cdot \Pr\right)^{1/3} \left[1 - \left(\frac{N}{A}\right) \cdot a\right] \cdot \left(T_{w} - T_{sat}\right)$$
(2.6)

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:
$$\overline{Nu_{L}} = \left(a + 0.33 \, 1b (Gr \, Pr)_{L}^{1/6}\right)^{2}$$
(2.7)
Onde: $b = \frac{1.17}{\left[1 + (0.5/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}}$
 $Gr_{x} = \frac{g\beta(T_{w} - T_{\infty})x^{3}}{v^{2}}$
 $Pr_{L} = \frac{c_{p}v}{k_{L}}$

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 aproximada proposta por Mills (1999) e válida para número de Biot muito menor que 0,1, e':

$$-h_c A(T - T_c) = \rho V C_p(T) dT / dt$$
(2.8)

onde: $h_{\rm c}$ – coeficiente de transferência de calor médio sobre a área da superfície, $W/m^2\,\text{-}K$

- A área superficial, m^2
- T-temperatura da superfície, °C
- T_c temperatura do meio refrigerante, °C
- ρ densidade, kg/m3

V - volume

dT/dt – diferencial de temperatura.

Assumindo que a área superficial, densidade, calor específico e volume são constantes, temos:

$$h_c = \rho \frac{V}{A} C_p(T) \frac{dT}{dt} (T - T_e)$$
(2.9)

Para uma amostra cilíndrica, temos:

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi r^2 \cdot H}{2\pi r \cdot H} = \frac{r}{2}$$
(2.10)

onde: H – altura do corpo de prova; e,

r – raio do corpo de prova.

2.9 Temperabilidade

A temperabilidade é uma propriedade das ligas ferrosas de se transformarem substancialmente em martensita a uma velocidade de resfriamento chamada crítica, a partir de uma temperatura elevada, ou seja, é a susceptibilidade ao endurecimento por têmpera.

A temperabilidade indica a capacidade do material ser transformado parcial ou totalmente, da fase austenítica para alguma porcentagem de martensita em uma dada profundidade, quando resfriado sob determinadas condições Siebert citado por Patrocínio (1999).

Conforme Bain & Paxton citados por Souza (1982), a existência de grãos finos de austenita e inclusões não dissolvidas (carbonetos ou nidretos e materiais não-metálicos) diminuem a temperabilidade, enquanto a presença de elementos dissolvidos na austenita (exceto cobalto), grãos grossos e uma grande homogeneidade da austenita aumentam a temperabilidade.

Os métodos mais comuns de avaliação da temperabilidade dos aços são:

✓ teste de temperabilidade de Grossmann;

✓ teste de temperabilidade de Jominy (NBR 6339, ASTM A255 ou SAE J406a); e,

✓ análise de curvas de resfriamento.

a) Teste de temperabilidade de Grossmann

Consiste na avaliação da temperabilidade pela variação da dureza na seção de barras circulares de diâmetros crescentes, temperados em um determinado meio. O centro das barras levarão maior tempo de resfriamento à medida que cresce o diâmetro das mesmas, sendo que para a barra cuja proporção de martensita situar-se em 50%, no seu centro, esta corresponderá ao *diâmetro crítico*.

A metodologia do teste é:

- a) determinação do tamanho de grão austenítico ASTM;
- b) determinação da composição química;
- c) determinação da temperabilidade básica;
- d) determinação dos fatores de liga; e,
- e) cálculo do diâmetro crítico ideal através da relação:

$$D_{i} = D_{ic} \cdot 2,21 \cdot (\% Mn) \cdot 1,40 \cdot (\% Si) \cdot 3,275 \cdot (\% Mo) \cdot 1,47(\% Ni) \quad (\% \text{ em peso}) \quad (2.11)$$

Este método vale somente para um determinado meio, havendo a mudança deste, serão necessárias novas medidas, confirma Sousa (1982).

b) Teste de temperabilidade Jominy

Apesar de mais precisos, os testes de Grossmann são de alto custo e de pequena realização, confirma Patrocínio (1999). Jominy e Goegehold desenvolveram um método mais barato, de maior simplicidade e rapidez de execução.

Conhecido como ensaio Jominy, consiste na têmpera de um corpo de prova padronizado através do resfriamento de uma de suas extremidades por meio de um jato refrigerante. Desta forma, a velocidade de resfriamento diminui ao longo do comprimento do provete, resultando em diferentes valores de dureza, que decrescem da ponta à outra extremidade.

c) Velocidade crítica de resfriamento

É definida como a taxa na qual a formação de perlita ou bainita é evitada, ou seja, a estrutura formada é inteiramente martensítica, durante a têmpera.

Patrocínio (1999) diz que há grande discrepância e confusão nas fórmulas presentes na literatura para calcular as velocidades críticas de resfriamento, optando para a análise dos resultados nos ensaios de resfriamento por:

- \checkmark curvas de dureza em U; e,
- ✓ ensaio Jominy e curvas de correlacionamento.

Neste trabalho adotar-se-á metodologia semelhante, uma vez que esta já se demonstrou adequada e suficiente para garantir a exatidão dos resultados.

2.10 Severidade de têmpera

A performance de um meio de têmpera pode ser caracterizada pela habilidade deste em extrair calor de uma peça. Normalmente é avaliada através da medição da dureza da superfície da amostra resfriada ou pela medição de dados de tempo e temperatura em locais predefinidos da peça. A segunda forma é a mais utilizada atualmente, sendo os dados desta utilizados para estimar a severidade de têmpera, os chamados índices de severidade, tais como: potência de endurecimento (HP), Índice Castrol (CI), valores em V, fator de têmpera (QFA) e fator de severidade de têmpera (H). Todos estes índices podem ser relacionados à dureza da peça temperada confirma Shuhui Ma e colaboradores (2003).

a) Potência de endurecimento (HP)

Desenvolvido na Suécia para testar óleos. O valor HP é calculado pela fórmula, Shuhui Ma (2002):

$$HP = 91,5 + 1,34T_{vp} + 10,88CR - 3,85T_{cp}$$
(2.12)

onde: T_{vp} – temperatura de transição entre o primeiro e segundo estágio do resfriamento;

CR – taxa de resfriamento para a faixa de 500 a 600 °C

 T_{cp} – temperatura de transição entre o segundo e o terceiro estágio do resfriamento.

b) Valores V

Os valores V foram desenvolvidos para determinar a severidade de óleo. A vantagem deste é que ele inclui as características de transformação do aço através das curvas de resfriamento. São especificados pela equação, Shuhui Ma (2002):

$$V = \begin{pmatrix} T_c & -T_d \\ T_s & -T_f \end{pmatrix}$$
(2.13)

onde: T_c – temperatura na qual inicia o segundo estágio do resfriamento, em °C;

T_d – temperatura na qual inicia o terceiro estágio do resfriamento, em °C;

T_s – temperatura na qual inicia a transformação martensítica, em °C;

 $T_{\rm f}$ – temperatura na qual termina a transformação martensítica, em °C.

c) Fator de análise de têmpera

Relaciona a forma da curva de resfriamento com a dureza do material temperado. É calculado através da determinação da temperatura média entre os pontos da curva de resfriamento. Pode-se utilizar a equação, Shuhui Ma (2002):

$$C_T = -K_1 \cdot K_2 \cdot Exp\left[\frac{K_3 \cdot K_4^2}{RT(K_4 - T)^2}\right] \cdot Exp\left[\frac{K_5}{RT}\right]$$
(2.14)

Onde: CT – Tempo necessário para formar uma quantidade constante de uma nova fase ou reduzir a dureza a um valor específico;

 $K_1 a K_5 - constantes$ R = 8.3143 J/K mol

T – temperatura absoluta, em K

O fator de têmpera é calculado para cada ponto da curva de resfriamento por:

$$q_f = \frac{\Delta t_i}{C_{T_i}} \tag{2.15}$$

Onde Δt é o tempo de cada amostra de dados da curva de resfriamento.

O somatório destes fatores pontuais, na faixa entre as temperaturas de austenitização até o início da transformação martensítica, dá o fator de têmpera, ou seja:

$$Q_{f} = \sum q_{f} = \sum_{T=M_{s}}^{T=Ar_{s}} \frac{\Delta t_{i}}{C_{T_{i}}}$$
[2.16]

Entre as vantagens do fator de análise de têmpera (QFA), estão:

- Descrever a severidade através de um simples número;
- Ser relacionado à dureza obtida no produto;
- Não necessitar de interpretações intermediárias nem a consulta de tabelas;

Como desvantagem cita-se a baixa quantidade de material já publicado sobre tais coeficientes.

d) Fator de severidade de têmpera

Classifica a severidade do meio sob a forma de um número. É determinado experimentalmente através da têmpera de uma série de barras redondas de um determinado aço. Assumindo-se que 50% de martensita representa uma microestrutura temperada, a relação entre o diâmetro máximo onde ocorre a presença de martensita neste percentual (D_u) e o diâmetro da peça (D), isto é D_u / D , dividido pelo valor correspondente do produto severidade x diâmetro (HD), poderá ser interpretado através do gráfico D_u / D , figura 2.14.



Figura 2.14 – Taxa de D_u/D em função do diâmetro da barra para barras de aço 3140 temperadas em água e óleo, Krauss (1990)

Tabela 2.1 – Severidade de têmpera	ra de vários meios	de têmpera (ASM I	nternational – Metals
	handbook, 198	\$1)	

	Ar	Óleo	Água	Salmoura
Sem agitação ou circulação	0,02	0,25 a 0,30	0,9 a 1,0	2
Agitação ou circulação moderada	-	0,3 a 0,40	1,0 a 1,3	2 a 2,2
Boa agitação	-	0,4 a 0,5	1,4 a 1,5	-
Agitação forte	0,05	0,5 a 0,8	1,6 a 2,0	-
Agitação violenta	-	0,8 a 1,1	4	5

e) Análise das curvas de resfriamento

Vários métodos têm sido desenvolvidos para simplificar o dimensionamento do fator de têmpera. A análise das curvas de resfriamento tem sido geralmente aceita como a mais importante maneira de descrever o mecanismo de têmpera, afirma Shuhui Ma (2003). O estudo das curvas de resfriamento são particularmente sensíveis aos fatores que afetam a habilidade do meio refrigerante em extrair calor, assim como: o tipo de meio, suas propriedades físicas, temperatura do banho e agitação deste.

Idealmente, a análise das curvas de resfriamento induz à comparação com as propriedades físicas de interesse no processo de têmpera. Um método de uso mais generalizado é encontrar a primeira derivada da curva tempo-temperatura obtida e identificar a taxa de resfriamento máxima para aquele meio de refrigeração. Uma outra análise viável é a comparação destas curvas de resfriamento com os diagramas CCT, tornando possível identificar as taxas de resfriamento máxima e crítica para o meio refrigerante/material a temperar.

Uma outra possibilidade de análise citada por Totten (1993), e utilizada neste trabalho, consiste em determinar as taxas de resfriamento a 705 e 205 °C, a taxa de resfriamento máxima e o tempo necessário para resfriar-se a amostra de 730 a 260 °C. Os motivos indicados para estas escolhas são os de que as taxas de resfriamento a 705°C devem ser maximizadas para que se evite a região de transformação da perlita e, para 205 °C, esta taxa deve ser minimizada para evitar as tendências de deformação, haja vista ser esta a temperatura do início da transformação da martensita (M_s) de muitos aços. Também, é desejável que o tempo de resfriamento entre 730 e 260 °C seja minimizado de forma a garantir a formação da perlita, otimizando o limite de resistência do material.

Liscic citado por Shuhui Ma (2002) demonstrou que integrando a área sob a curva da taxa de resfriamento pode-se obter uma correlação forte entre esta e a dureza. Thelning, citado por pelo mesmo autor, descreve método semelhante utilizando a área entre as temperaturas de 300 e 600 °C.

Outros relacionamentos das curvas de resfriamento possíveis são os índices: fator de severidade de Grossmann (H), valores V de Tamura, índice Castrol, potência de endurecimento (HP), dentre outros, de menor utilização.

Capítulo 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 3.1):

Tabela 3.1 - Composição química nominal dos aços 1045, 8620 e 8640 (ABNT, SAE, AISI)

	С	Mn	P _{máx}	S _{máx}	Si	Ni	Cr	Мо
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 %

As barras foram adquiridas no comércio de São Luís – MA e de São José dos Campos - SP, em barras cilíndricas de 1" e 1 1/4" de diâmetro e, conforme certificação, com autenticidade e composição garantidas. As barras foram cortadas em pedaços menores, cerca de 1 m, e levadas para a oficina do NUTENGE/UEMA para usinagem. Foram preparados, além das amostras para os ensaios de têmpera, os corpos de prova para o teste Jominy.

3.2 Meios

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 o dispositivo, figura 3.1, a seguir esquematizado.



Figura 3.1 - Bancada para agitação do meio de refrigeração

O sistema é composto de um tanque com capacidade de 70 litros, um motor de corrente contínua com sensor de rotação preso ao seu eixo, uma hélice e componentes eletroeletrônicos de controle.

Para determinar a rotação do motor, acopla-se um osciloscópio à saída do sensor magnético, instalado em seu eixo, para capturar o período de rotação deste, conforme figuras 3.1 e 3.2. A rotação é dada por:

$$R = \frac{60}{T}, onde: \begin{cases} \text{R} - \text{rotação em RPM} \\ \text{T} - \text{período em segundos} \end{cases}$$
[3.1]

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 (vide anexo 1 – relatório de calibração) 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, figura 3.3.



Componentes:

S1 – Chave geral	T – Temporizador	D1/D2 – Diodos
T1 – Transformador 220/9V	M – Motor	C1 – Capacitor eletrolítico
Sw1 – Sensor magn. rotação	R1 – Resistor variável	P1 – Ponte retificadora

Figura 3.2 – Diagrama elétrico da bancada de agitação do meio

O forno utilizado foi o Brasimet tipo K400, 18,7 kW, temperatura máxima de 1300 °C do Laboratório de Materiais e Ensaios Mecânicos da Universidade Estadual do Maranhão.



Figura 3.3 – 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 3.4 ilustra-se estas etapas e a seqüência em que ocorreram.



Figura 3.4 - Metodologia de desenvolvimento do trabalho

a) Corte e usinagem das amostras e corpos de prova Jominy

No Laboratório de Usinagem da UEMA, as barras de 1" de diâmetro foram usinadas, rebaixado o diâmetro, até 25 mm e seccionadas em comprimentos equivalentes a cinco vezes este

diâmetro, 125 mm, com a finalidade de simular corpos de prova de dimensões semi-infinitas em termos de transmissão de calor, conforme Patrocínio (1999). Foram preparados 75 corpos de prova, isto é, 30 de aços 1045, 30 de 8620 e 15 do aço 8640. Também foram torneadas destas barras e das de 1 1/4" os corpos de prova para o ensaio Jominy, num total de 12, em conformidade com a norma ABNT 6339, e mais 9 amostras para os ensaios preliminares.

b) Tratamento térmico - têmpera preliminar

Um ensaio prévio foi realizado com a finalidade de produzir amostras para os ensaios de dureza e execução do teste Jominy. O aquecimento foi executada em forno elétrico a uma temperatura de austenitização de 840 °C, com tempo de permanência de 1 hora. O resfriamento foi executado em água parada (circulação mínima para evitar a estagnação), moderadamente agitada (550 rpm) e severamente agitada (900 rpm), ver figura 3.5, com a peça sendo mergulhada com seu eixo na horizontal e o termopar na parte superior.



Sem agitação

Agitação moderada

Agitação violenta

Figura 3.5 – Meio de resfriamento sem agitação, agitação moderada e com agitação violenta

Estas amostras, devidamente identificadas, foram temperadas e levadas ao laboratório para a realização dos ensaios prévios.

c) Ensaio de temperabilidade Jominy

Ensaios realizados no Laboratório de Materiais e Ensaios Mecânicos da UEMA em conformidade com a NBR 6339. Teve como objetivo identificar a temperabilidade do material

trabalhado, estimar composição do material e avaliar a profundidade de inserção dos termopares para captura das temperaturas durante o resfriamento.

Foi utilizado o aparelho para determinação da temperabilidade Jominy do Laboratório de Metalografia e Ensaios Mecânicos da UEMA, fabricado conforme a NBR 6339, com bico A, flange A1 para corpos de prova de 25,5 mm na realização do ensaio. Em seguida os corpos foram retificados 0,5 mm em cada face para a realização de medição da dureza nestas faces.

d) Ensaios de dureza

Também realizados no Laboratório de Metalografia e Ensaios Mecânicos da UEMA, possibilitaram o levantamento do perfil de dureza das seções médias dos corpos de provas. Estes dados, plotados em curvas de distribuição de dureza, evidenciaram a região de transição da mudança de fase, confirmando a profundidade de endurecimento e, permitiram a avaliação da eficiência do processo de têmpera.

Após seccionadas e lixadas, as amostras foram testadas utilizando-se o durômetro Pantec RBS, modelo RBS-M, do Laboratório de Metalografia e Ensaios Mecânicos da UEMA, na escala Rockwell C, ponta de diamante e carga de 150 kg, tempo de aplicação de carga automatizado. Os dados foram plotados e estão expostos em curvas em "U", no item durezas dos materiais – curvas U.

f) Furação, inserção dos termopares e solda da proteção

Os testes preliminares indicaram uma profundidade de 4 mm como ideal para medição das temperaturas de resfriamento dos corpos de prova. A furação foi executada logo após a usinagem dos corpos de prova e consistiu em abrir um furo de 1,5 mm de diâmetro por 4 mm de profundidade utilizando-se broca de aço rápido. Para garantir a exatidão do furo foi utilizado um relógio comparador montado em uma base magnética rígida, fixada à mesa da furadeira e apoiada no porta mandril.

A fixação do termopar na cavidade foi executada manualmente, por interferência peça-furo. O assentamento da ponta do termopar na peça foi garantido através de solda elétrica por descarga capacitiva. Externamente, em volta do termopar, foi soldado à peça um tubo de aço inoxidável de 1/4" de diâmetro com a finalidade de proteger o sensor durante a realização do ensaio.

g) Levantamento das curvas de resfriamento

Para o levantamento das curvas de resfriamento utilizou-se termopares tipo K, faixa de operação de 0 a 1260 °C, interfaceados a um microcomputador através de um condicionador de sinais e uma placa conversora analógico-digital da Linx, e software compatível (Aqdados 5.0). Inseridos e fixados à peça na profundidade de 4 mm, equivalente à região de transição com 50% de martensita, determinada pelos ensaios de dureza, os termopares foram protegidos por tubos de aço inoxidável, soldados à amostra.

Definiu-se taxa de amostragem em 10 Hz e optou-se por utilizar amostras de aços vendidos no comércio em vez de sistemas comerciais já prontos.

h) Levantamento das taxas de resfriamento

Uma vez determinada a temperabilidade do material e suas regiões de transição, as amostras foram levadas ao forno, aquecidas até 840 °C, mantidas nesta temperatura por cerca de uma hora e, posteriormente, resfriadas bruscamente. As temperaturas, durante o resfriamento das amostras foram coletadas pelo sistema de aquisição de dados e plotadas em gráficos tempo-temperatura.

A partir das curvas de resfriamento, através da derivação destas, obteve-se as curvas das taxas de resfriamento para cada caso.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Temperabilidade dos materiais – Ensaio Jominy

Os ensaios de temperabilidade Jominy (NBR 6339) dos materiais utilizados são apresentados nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3.



Figura 4.1 – Valores obtidos no ensaio Jominy sobrepostos aos valores admissíveis de dureza para o aço ABNT, SAE, AISI 1045



Figura 4.2 – Valores obtidos no ensaio Jominy sobrepostos aos valores admissíveis de dureza para o aço ABNT, SAE, AISI 8620



Figura 4.3 – Valores obtidos no ensaio Jominy sobrepostos aos valores admissíveis de dureza para o aço ABNT, SAE, AISI 8640

Como se pode observar, as figuras evidenciam que os aços trabalhados encontram-se dentro dos valores de dureza esperados, conforme valores SAE/AISI 1045H, figuras 4.1, 4.2 e 4.3, o que caracteriza estes materiais como representativos de sua classe de composição química.

4.2 Dureza dos materiais – curvas U

Os materiais foram testados e apresentam os seguintes valores (tabela 4.1):

Material	Dureza(HRc)
Aço 1045	29
Aço 8620	14
Aço 8640	27

Tabela 4.1 – Dureza inicial dos materiais

Após a têmpera, os valores de dureza dos materiais deixam de ser iguais em toda a seção da barra para assumir um perfil de maior dureza na periferia e menor no centro desta. Para o caso do aço 1045 temperado em água, sem agitação do meio de resfriamento, temos o seguinte mostrado na figura 4.4



Figura 4.4 – Medidas de dureza na seção transversal do aço 1045, temperado sem agitação do meio de resfriamento

Pela figura anterior nota-se que somente até a distância 10,33 mm do centro da peça, temos dureza igual ou superior a 40 HRc. Na profundidade de 4,00 mm da superfície da peça (12,50 – 4,00) temos uma dureza de 33 HRc.

Para o aço 8620 temos o perfil mostrado na figura 4.5. Neste caso, aço 8620 temperado em água, pode-se afirmar que a têmpera é total e atinge valores próximos a 43 HRc. Para este aço, qualquer profundidade de inserção dos termopares poderá ser utilizada para o levantamento das curvas de resfriamento.



Figura 4.5 – Medidas de dureza na seção transversal do aço 8620, temperado em água, sem agitação do meio de resfriamento

O perfil para o aço 8640 é detalhado na figura 4.6. Também, conforme se pode notar, a têmpera é total para o aço 8640 e a profundidade poderá ser escolhida à vontade.

Após a análise dos perfis de dureza obtidos através da têmpera dos aços utilizando meio de resfriamento sem agitação optou-se por uma profundidade de inserção do termopar de 4,00 mm a partir da superfície do corpo de prova.



Figura 4.6 – Medidas de dureza na seção transversal do aço 8640, temperado em água, sem agitação do meio de resfriamento

4.3 Curvas e taxas de resfriamento

4.3.1 Aço 1045

Apresenta-se na figura 4.7 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.

Com o aumento da agitação do meio refrigerante nota-se uma redução do tempo necessário para resfriar a amostra na faixa de 730 a 260°C de 24,84%, no caso de agitação moderada, e de 28,67% para meio violentamente agitado.

No resfriamento **sem agitação** do meio, figura 4.8, verifica-se uma taxa de resfriamento máxima de **68,28** °**C/s**, ocorrendo a 661,73 °C. Para as temperaturas de 705°C e 205°C as taxas de resfriamento são, respectivamente, 84,71 e 29,66 °C/s.



Figura 4.7 – 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



Figura 4.8 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em água sem agitação do meio refrigerante



Figura 4.9 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em água com agitação moderada do meio refrigerante

Para a têmpera utilizando **agitação moderada** do meio tem-se uma taxa de resfriamento máxima de **87,16** °**C**/s que ocorre à temperatura de 661,73 °C. Na temperatura de 705 °C, a taxa de resfriamento é de 84,71 °C/s e de 29,66 °C/s, na temperatura de 205 °C, figura 4.9.

Já no resfriamento com **agitação violenta** atinge-se taxa máxima de **143,45** °C/s a 668,68 °C, figura 4.10; a taxa de resfriamento é 139,36°C/s a 705 °C e 28,56 °C/s a 205 °C.

No caso da taxa máxima de resfriamento, com o aumento da agitação, tem-se um aumento de 27,65% para o caso de agitação moderada e de 110,09% no caso da agitação violenta do meio, relativo ao caso em que não há agitação. No caso do aumento de agitação, da moderada para a violenta, a taxa máxima aumenta em 64,58%.

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 4.11, 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.



Figura 4.10 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em água com agitação violenta do meio refrigerante

Pode-se verificar que o aumento da agitação do refrigerante reduz o tempo em 7,55% quando se sai do estado sem agitação para o com agitação moderada; e de 8,96% quando se vai do meio sem agitação para o de agitação violenta, para peças temperadas em salmoura. A redução do tempo é de 19,15% para a troca do meio, água por salmoura, para o estado sem agitação, 0,55% para o com agitação moderada e de 3,19% no caso de agitação violenta.



Figura 4.11 – 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

Já no caso das taxas de resfriamento, a influência provocada pelo aumento da severidade foi destacado: enquanto na têmpera com água a taxa máxima atingida foi de **68,28** °**C**/**s** para resfriamento sem agitação, na têmpera com salmoura, para o mesmo estado de agitação, obtevese uma taxa de resfriamento máxima de **118,31** °**C**/**s**, 73,27% maior em relação àquela em água.

No primeiro caso, **sem agitação** do meio refrigerante, a taxa de resfriamento máxima, figura 4.12, atingida nos ensaios foi de **118,31** °**C/s** e ocorre na temperatura de 709,35°C. Para as temperaturas de 705°C e 205°C tem-se, respectivamente, as taxas de 118,28 e 16,69 °C/s.



Figura 4.12 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045, temperado em salmoura sem agitação do meio refrigerante



Figura 4.13 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045 temperado em salmoura com agitação moderada do meio refrigerante

Durante os testes com meio **moderadamente agitado**, obteve-se taxa máxima de **137,31** °C/s à temperatura de 686,17 °C e taxas de 136,51 °C/s e 23,95 °C/s nas temperaturas de 705 °C e 205°C, respectivamente. Nota-se, deste primeiro acréscimo da agitação, uma elevação na taxa máxima, atingida durante o resfriamento, de 16,06% em relação ao caso em que não há agitação do meio, figura 4.13.



Figura 4.14 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 1045 temperado em salmoura com agitação violenta do meio refrigerante

Aumentando-se ainda mais a agitação, caso de **agitação violenta**, figura 4.14, nota-se um aumento na taxa máxima de resfriamento, que atinge **138,82** °C/s na temperatura de 683,97 °C. Em relação à situação em que não há agitação do meio, este aumento representa um acréscimo de 17,34% e de 1,10%, relativamente ao caso em que há agitação moderada do meio. Para a temperatura de 705 °C obteve-se uma taxa de 137,62 °C/s e para a de 205 °C uma taxa de resfriamento de 23,70 °C/s.

Pode-se notar, ainda, que a mudança da severidade do meio, água, severidade 1, tabela 2.1, para salmoura, severidade 2, representa uma redução de 19,15% no tempo de resfriamento para o

intervalo de temperaturas compreendido entre 730 °C e 260 °C, e um aumento na taxa máxima de resfriamento de 73,27%, nos casos de têmpera sem movimentação do fluido refrigerante e, 57,54% para àquele com agitação moderada. Para os demais, o aumento da severidade de têmpera pela troca do refrigerante não representa ganhos expressivos nos tempos ou nas taxas de resfriamento para o aço 1045.

4.3.2 Aço 8620

Na figura 4.15 são apresentadas as curvas de resfriamento para o aço ABNT 8620, temperado em água, meio sem agitação, com agitação moderada e agitação violenta.

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.



Figura 4.15 – 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

Analisando a figura 4.15 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.

Confirma-se, ainda pela figura 4.15, uma diminuição no tempo de resfriamento das amostras de 20,49% quando se passa o meio de um estado sem agitação para um de agitação moderada, e de 30,90% quando o meio está violentamente agitado. Já a mudança da agitação moderada para a agitação violenta representa uma diminuição de 13,10% no tempo de resfriamento do primeiro estágio de agitação para o segundo.



Figura 4.16 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em água sem agitação do meio refrigerante

A análise da curva da taxa de resfriamento para a têmpera do aço ABNT 8620 demonstra que a taxa de resfriamento máxima atingida foi de **224,67** °**C**/**s**, na temperatura de 483 °C no caso de têmpera com **meio não agitado**, figura 4.16. Na temperatura de 705°C, a taxa situa-se em 137,40 °C/s, e 22,32 °C/s, na temperatura de 205 °C.

Para meio **moderamente agitado**, a taxa máxima de resfriamento é de 306,54 °C/s e ocorre a 522,49 °C. Na temperatura de 705 °C tem-se uma taxa de 232,83 °C/s e a 205 °C é de 23,33 °C/s, figura 4.17.



Figura 4.17 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em água com agitação moderada do meio refrigerante



Figura 4.18 – Taxa de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em água com agitação violenta do meio refrigerante

Nos testes com **agitação violenta** do meio de resfriamento obteve-se taxa máxima de resfriamento, figura 4.18, de **450,36** °**C**/s na temperatura de 604,77 °C; taxa de 347,97 °C/s à 705 °C; e de 36,45 °C/s à 205 °C.

Ainda, como tentativa de aumentar a amostra e precisão dos dados, experimentou-se a têmpera do aço 8620 em salmoura à 10%, semelhante àquela utilizada nos ensaios do aço ABNT 1045, mas os resultados obtidos não permitiram análise precisa dos tempos e taxas de resfriamento na forma requerida por este trabalho. Mostra-se, a título de ilustração, na figura 4.19, as curvas de resfriamento obtidas durante estes testes, porém, ressaltando, não serão feitas análises ou conclusões sobre estes.



Figura 4.19 – Curva de resfriamento do aço ABNT 8620, temperado em salmoura, sem agitação (SA), com agitação moderada(AM) e agitação violenta (AV) do meio refrigerante

4.3.3 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 4.20, o resfriamento para este material ocorre muito bruscamente, em menos de 2 segundos, confirmando a alta temperabilidade do material.



Figura 4.20 – Curva de resfriamento do aço ABNT 8640 temperado em água, sem agitação (SA), com agitação moderada (AM) e agitação violenta (AV) do meio refrigerante

No teste com meio não agitado, o tempo de resfriamento de 730 °C para 260 °C foi de **1,66** segundos; naquele utilizando meio moderadamente agitado, o tempo necessário foi de **1,53** segundos; e, no terceiro teste, com agitação violenta do meio, o tempo requerido foi de **0,61** segundos.

O aumento da agitação do meio, conforme se pode notar, representou uma diminuição de 7,83% e 63,25% nos tempos de resfriamento com agitação moderada e violenta, respectivamente,

em relação ao resfriamento sem agitação do meio refrigerante. Já para o caso de acréscimo de agitação, de moderada para violenta, esta diminuição foi de 60,13 %.

Na comparação dos tempos de resfriamento dos aços 8620 e 8640 pode-se verificar uma redução superior a 33% dos tempos necessários ao resfriamento na faixa 730-260°C do aço 8640. Esta diminuição confirma a influência do percentual de carbono do aço, maior para o 8640, nos tempos de resfriamento e conseqüentemente nas taxas de resfriamento.

A análise das taxas de resfriamento, conforme já mencionado, também, neste caso, não é executada devido ao fato da têmpera ser muito brusca, deixando dúvidas quanto a real precisão dos dados coletados.

4.4 Dureza dos materiais testados

O perfil de dureza da seção transversal média das amostras ensaiadas permitem confirmar ou não os ganhos de tempo, os aumentos das taxas de resfriamento e, eficazmente, a profundidade de têmpera atingida durante os testes das peças.



Figura 4.21-Perfil de dureza da seção média da amostra de aço ABNT 1045, temperado em água

Das amostras de aço 1045, temperadas em água, nota-se, figura 4.21, que o aumento da agitação do meio refrigerante proporciona uma penetração de têmpera maior, isto é, para uma mesma profundidade, a dureza encontrada é maior para aquela amostra que foi temperada com maior agitação do refrigerante. Para têmpera sem agitação a penetração foi até **10,33 mm** do centro da peça, com agitação moderada foi **9,17 mm**, e **8,83 mm** para agitação violenta.



Figura 4.22 – Perfil de dureza da seção média da amostra de aço ABNT 1045, temperado em salmoura

Para as curvas em U das amostras de aço 1045, temperado em salmoura, figura 4.22, embora não tão destacados, nota-se que o efeito da agitação do meio proporciona o aumento da penetração da têmpera no material. A penetração foi até **9,95 mm** do centro da peça para têmpera sem agitação, **9,69 mm** com agitação moderada e **8,30 mm** para agitação violenta.

A análise das durezas encontradas nas seções médias das amostras do aço ABNT 8620 mostram pouco ganho proporcionado pela mudança da agitação do estado sem agitação para o estado de agitação moderada. Também foi pequena a diferença de dureza para o caso de agitação violenta. O que se pode notar, pelas curvas de dureza, é que este aço atinge têmpera completa (mesma dureza do centro à periferia da peça), ao ser resfriado em água, figura 4.23.



Figura 4.23 - Perfil de dureza da seção média da amostra de aço ABNT 8620 temperado em água



Figura 4.24 – Perfil de dureza da seção média da amostra de aço ABNT 8640, temperado em

água

Para o aço ABNT 8640, os perfis de dureza das amostras temperadas mostram, também, uma têmpera completa do material, variando apenas a dureza média das seções, aumentando com a agitação, figura 4.24.

Todas estas curvas mostram, de forma geral, que um aumento na agitação do meio de resfriamento da peça proporciona um aumento na penetração da têmpera dos aços, bem evidenciado nos casos em que se trabalha com o aço ABNT 1045.

Na tabela 4.2 mostra-se um resumo das discussões, onde se destaca o tempo para o resfriamento de 730 para 260 °C, a taxa de resfriamento máxima atingida e a temperatura em que esta ocorre, para cada material e meio ensaiado.

MEIO	AÇO	AGIT.	Tempo 730-260°C (s)	Taxa Resfriamento Máxima (°C/s)	Temp. de TR _{Max} (°C)
	1045	SA	9,66	68,28	612,00
		AM	7,26	87,16	661,73
		AV	6,89	143,45	668,68
	8620	SA	2,88	224,67	483,29
Água		AM	2,29	306,54	522,49
		AV	1,99	450,36	604,77
	8640	SA	1,66	1368,93*	369,00
		AM	1,53	1338,36*	368,39
		AV	0,61	1241,87*	544,26
Salmoura	1045	SA	7,81	118,31	709,35
		AM	7,22	137,31	686,17
		AV	7,11	138,82	683,97
	8620	SA	2,44*	281,01*	541,43
		AM	2,62*	345,61*	576,87
		AV	2,62*	527,23*	726,93

Tabela 4.2 – Resumo dos ensaios realizados

*Dados não utilizados na análise

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 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Sugere-se ainda estudos que visem elucidar as seguintes questões:

- Qual a influência do acabamento superficial do material na têmpera?
- Qual a influência da temperatura inicial do meio de resfriamento?
- Qual o melhor ângulo para mergulhar a peça no meio de refrigeração?
- Como se processa o resfriamento em caso de severidades extremamente altas?

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Iron and Steel Institute, Philadelphia. Standard method for end-quench test for hardenability of steel. In: *Annual book os ASTM standards*. Philadelphia, PA, USA: ASTM, 1989, pp. 27-44

American Society for Metals. *Metals handbook*. 9 ed., v. 4. Ohio, EUA: ASM International, 1981. 826 p.

Askeland, D. Phule, P. *The science and engineering of materials*. 4 ed. New York, USA: Brooks Cole, 2002, 832 p.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. *Informações e documentação – trabalhos acadêmicos - apresentação: NBR 14724*. Rio de Janeiro: 2001, 6 p.

Bullens, D. K. *Steel and its heat treatment*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc. 5 ed. v. 1. 1948, 489 p.

Capdevila, C. Caballero, F. G. Andrés, C. García de. *Analysis of the effect of the alloying on the martensite-start temperature of the steels*. Madrid, Espanha: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas – CENIM, 1998.28 p.

Churchill, S. W. Free convection around immersed bodies. In: *Heat Exchanger Design Handbook*. New York, USA: Hemisphere Publishing Co., 1983.

Cota, A. B. et. al. Microstructure and mechanical properties of a microalloyed steel after thermal treatments.In: *Materials research*, v. 6, n. 2, 2003.

Da Cruz, Genesio Moreira. *Modelagem matemática em tratamentos térmicos de barras cilíndricas de aço*. São José dos Campos, SP: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1990. 132 p. Dissertação (mestrado).

Encyclopedia of Metallurgy. *AISI (SAE) steels*. [on line] http://www.geocities.com/ SiliconValley/Campus/8262/htdocs/steels/indx.html. Acessado em 05/mai/2003.

Fontecchio, Marco. *Quench probe and quench factor analysis of aluminum Alloys in Distilled Water*. Worcester, MA-USA: Worcester Polytechnic Institute. 2002. Dissertação (mestrado).

Höltz, Oddone A. *Noções de tratamentos térmicos*. 2 ed. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1992, 120 p.

Hömberg, D. A numerical simulation of the Jominy end-quench test. IMA, Appl. Math. 2000. 23 p.

Houghton. *Fundamentals of quenching*. [on line] http://www.houghton.co.uk/divisions/htreat/ fundamentals.asp. Acessado em 07/jul/2003.

Krauss, George. *Steels: heat treatment and processing principles*. 2 ed. Colorado, EUA: ASM International, 1990, 497 p.

Mackenzie, D. S. Gunsalus, L. Lazerev, I. *Effects of contamination on quench-oil cooling rate*. [on line] http://www.industrialheating.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features______ Item/0,2832,70014,00.html. Acessado em 15/jul/2003.

Magnabosco, Rodrigo. Banba, Claudio Mitsuo. *Diagrama mestre de revenimento para o aço ABNT 4140T*. Itajubá, MG: Faculdade de Engenharia de Itajubá, 1998, 8 p.

Maniruzzaman, Mohammed. Chaves, Juan C. mcgee, Celine. MA, Shuhui. Sisson Jr, Richard D. *CHTE quench probe system – a new quenchant characterization system*. In: 5th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, 2002, Dalian, China.

Mills, A. F. Heat transfer. 2 ed. New Jersey, USA: Prentice Hall Inc., 1999, 954 p.

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

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

Phillips, James W. *Steels: Hardening and Hardenability*. Illinois, USA: University of Illinois, 1998. 13 p.

Shackelford, James. *Introduction to materials science for engineers*. 5 ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1999, 800 p.

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

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

Society of Automotive Engineers. *Methods of determining hardenability of steels – SAE J406 nov* 90. Warrendale, PA-USA: SAE International, 1990, pp. 1.25-1.168

Souza, Francismar Rodrigues de et al. Temperabilidade e revenimento de aço de baixo carbono e alta resistência. Correlação entre microestrutura e propriedade mecânicas. *Metalurgia – ABM*, v. 40, n. 317, pp. 195-200, Abr/1984.

Souza, Francismar Rodrigues de. *Estudo da temperabilidade e revenimento de um aço de baixo carbono e de alta resistência. Correlações entre microestrutura e propriedade mecânicas.* Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1982, 182 p. Dissertação (Mestrado).

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

Totten, G. E. Webster, G. M. 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.

Vander Voort, G.F. *Microstructure of Ferrous Alloys*. [on line] http://www.industrialheating. com/CDA/ArticleInformation/coverstory/BNPCoverStoryItem/0,2830,17985,00.html. Acessado em 06/ago/2003.

Verein Deutscher Eisenhüttenleute. *Steel a handbook for materials research and engineering*. v. 1. Berlin: VDE, 1992. 737 p.

Von Bergen, R. T. *Quenching principles and pratice. Heat treatment – methods and media.* The Institute of Metallurgical Technicians, pp. 81 – 94, Jul/1979.