UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO E
TEMPERATURA NAS CARACTERÍSTICAS DE
RESFRIAMENTO DAS SOLUÇÕES DO SAL AWS-20
USADAS NA TÊMPERA**

Engº FRANCISCO EGIDIO MESSIAS

Dissertação apresentada à Área Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais

ORIENTADOR: Profa. Dra. Lauralice de C. F. Canale

SÃO CARLOS

1998

Class.	TESE - EESC
Cutt.	3634
Tombo	CC23/99

7-1-21-3

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M585a

Messias, Francisco Egidio

Análise da influência da concentração e temperatura nas características de resfriamento das soluções do sal AWS-20 usadas na têmpera / Francisco Egidio Messias. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Área Interunidades: Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Profa. Dra. Lauralice de C. F. Canale.

1. Têmpera. 2. Curva de resfriamento. 3. Meios de têmpera. 4. Soluções de sal. I. Título.

Área Interunidades

Ciência e Engenharia de Materiais

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

Instituto de Física de São Carlos

Instituto de Química de São Carlos

CAIXA POSTAL - 369

CEP 13560-970 - São Carlos/SP - Brasil

Tel/Fax: (016) 273-9777

E-mail: erica@if.sc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FRANCISCO EGÍDIO MESSIAS, APRESENTADA A ÁREA INTERUNIDADES EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA EESC-IFSC-IQSC, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 12/8/1998.

COMISSÃO JULGADORA:

Profª. Dra. Lauralice C. Franceschini Canale (SMT-EESC-USP)

Profª. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia (UNICAMP)

Prof. Dr. Antonio Carlos Guastaldi (UNESP)

À minha filha
Ana Carolina Messias

AGRADECIMENTOS

A Professora Dra. Luralice de Campos Franceschini Canale, pela orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Dr. Ovídio Richard Crnkovic, pela orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Aos técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC-USP e, em especial ao Eliezer Dias Francisco, pela valiosa colaboração na parte prática deste trabalho.

~~À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)~~ pela bolsa de estudo concedida.

À BRASIMET Comércio e Indústria S/A, pelo fornecimento do sal para têmpera AWS-20.

A todos que direta ou indiretamente, contribuíram para esta realização.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
 I - INTRODUÇÃO.....	 1
 II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 3
II.1-Tratamentos térmicos.....	3
II.2-Fenômenos que possibilitam os tratamentos térmicos.....	3
II.2.1-Princípios metalúrgicos do processo.....	4
II.2.2-Estudos dos produtos da decomposição da austenita.....	6
II.3-Têmpera.....	7
II.3.1-Temperabilidade.....	8
II.3.1.1-Curvas TTT.....	9
II.3.1.2-Temperabilidade como característica do resfriamento.....	15
II.3.2-Taxa de resfriamento.....	16
II.3.2.1-Meios de têmpera.....	20
II.3.2.1.1-Efeito da agitação.....	27
II.3.2.1.2-Efeito da concentração.....	27

II.3.2.1.3-Efeito da temperatura.....	29
II.3.3-Métodos usados para avaliar as características do resfriamento.....	31
II.3.3.1-Teste da curva de resfriamento.....	32
II.3.3.1.1-Padrões para teste da curva de resfriamento.....	33
II.3.3.1.2-Testes padronizados de alguns países.....	34
II.3.3.1.3-Sistemas de agitação para ensaios.....	35
II.3.3.1.4-Interpretação da curva de resfriamento por inspeção.....	37
II.3.3.1.5-Temperatura e taxas críticas de resfriamento.....	39
II.3.3.1.6-Área sobre a curva temperatura vs taxa de resfriamento.....	41
II.3.3.1.7-Fator-H severidade de têmpera de Grossman.....	42
II.3.3.1.8-Método poder de têmpera (<i>hardening power</i> - HP).....	46
II.3.3.1.9-Fator de têmpera Q.....	50
II.3.3.1.10-Método de Tamura.....	54
II.3.3.1.11-Método do gradiente térmico.....	59
 III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	 64
III.1 - Corpo de prova.....	64
III.2 - Soluções de sal.....	65
III.3 - Tratamentos térmicos.....	65
III.4 - Perfil de dureza.....	66
III.5 - Índice de endurecimento.....	67
III.6 - Análise metalográfica.....	67
III.7 - Curvas de resfriamento.....	68
 IV - RESULTADOS.....	 71
IV.1 - Perfil de dureza.....	71

IV.2 - Índice de endurecimento.....	82
IV.3 - Análise metalográfica.....	82
IV.4 - Curvas de resfriamento.....	90
V - DISCUSSÕES.....	94
V.1 - Perfil de dureza.....	94
V.2 - Índice de endurecimento.....	95
V.3 - Análise metalográfica.....	95
V.4 - Curvas de resfriamento.....	96
VI - CONCLUSÕES.....	98
VII - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
VIII - ANEXO.....	101
IX - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1:	Diagrama de fase ferro carbono. A linha pontilhada representa o equilíbrio Fe-C e a linha cheia, o equilíbrio Fe-Fe ₃ C. METALS HANDBOOK (1972).....	5
FIGURA 2:	Relação entre teor de carbono e de martensita na dureza HRC. METALS HANDBOOK(1981).....	7
FIGURA 3:	Transição de microestrutura martensítica para perlítica entre uma região endurecida e não endurecida de um aço temperado. KRAUSS(1988).....	9
FIGURA 4:	Representação esquemática do diagrama de transformação isotérmica. BROPHY et al. (1972).....	10
FIGURA 5:	Superposição de curvas de resfriamentos num diagrama CCT para um aço hipoeutetóide.....	11
FIGURA 6:	Curva TTT do aço tipo a) SAE 1050 composição : Fe 0,50%C - 0,91%Mn tamanho de grão:7 - 8 austenitizado em 910°C (1670°F) b) SAE 4340 composição Fe - 0,42%C - 0,78%Mn - 1,79%Ni - 0,80%Cr - 0,33%Mo tamanho de grão 7-8 austenitizado em 843°C (1500° F). VANDER VOORT(1991).....	13
FIGURA 7:	Efeito do teor de carbono na temperatura de formação da martensita. SILVA & MEI (1988).....	13
FIGURA 8:	Influência do tamanho de grão no diagrama TTT de um aço com 0.87% C, 0.3% Mn e 0.27% V. COLPAERT(1974).....	14
FIGURA 9:	Influência da homogeneidade da austenita no diagrama TTT de um aço com 0.87% C, 0.3% Mn e 0.27% V. COLPAERT(1974).....	14
FIGURA 10:	Curva de resfriamento para óleo e água. TOTTEN et al. (1993).....	17
FIGURA 11:	Curvas de resfriamento em varias posições de uma barra de 1 polegada (25,4mm) de diâmetro temperada com uma severidade de têmpera H = 4. KRAUSS (1988).....	18

FIGURA 12:	Efeito da espessura da seção na taxa de resfriamento. BERGEN (1979).....	19
FIGURA 13:	Efeito da taxa de resfriamento na dureza. BERGEN(1979).....	19
FIGURA 14:	Os três estágios da curva de resfriamento. THELNING (1983).....	21
FIGURA 15:	Verificação de uma curva diferencial de taxa de resfriamento BERGEN (1979).....	22
FIGURA 16:	Efeito do fluxo de água na taxa de resfriamento, para um jato com fluxo de ar constante. Distancia entre o jato e a peça é 140mm, e a taxa de ar consumida é 14Nm ³ /h. SEGERBERG(1988).....	23
FIGURA 17:	Curvas de resfriamento do centro de vários cilindros de 25mm de diâmetro, temperados em água a diversas temperaturas. APRAIZ BARREIRO (1985).....	24
FIGURA 18:	Mecanismo das soluções de sais. HOUGHTON.....	25
FIGURA 19:	Relação de dureza em função da concentração de sal. BOYER (1988).....	28
FIGURA 20:	Efeito da concentração do polímero na (a) máxima taxa de resfriamento e (b) taxa de resfriamento em 300°C, testado em 30°C e velocidade do fluido de 0,5m/s. HILDER(1987).....	29
FIGURA 21:	Curvas de resfriamento do centro de uma amostra de aço inoxidável 18-8 de 0,5 pol. de diâmetro e 2,5 pol. de comprimento, sem agitação em água e em solução de 10% de NaCl. BOYER (1988).....	30
FIGURA 22:	Efeito da temperatura do polímero na (a) máxima taxa de resfriamento e (b) taxa de resfriamento em 300°C testado na concentração de 15%, e velocidade do fluido de 0,5m/s. HILDER(1987).....	30
FIGURA 23:	Corpo de prova segundo o padrão internacional (ISO/DIS 9950) baseado na especificação do Wolfson Heat Treatment Centre Engineering Group. BODIN & SEGERBERG(1993).....	33
FIGURA 24:	Corpo de prova segundo padrão japonês JIS K 2242-1980. BODIN & SEGERBERG(1993).....	35

FIGURA 25:	Diagrama esquemático do sistema de agitação hélice propulsora com anteparo. Hilder (1985).....	36
FIGURA 26:	Diagrama esquemático do tanque de têmpera usado em conjunto com a bomba de velocidade variável, mostrando também a entrada do fluxo vertical e horizontal. HILDER(1985).....	37
FIGURA 27:	Três curvas de resfriamento, TOTTEN et al. (1988).....	38
FIGURA 28:	Parâmetros críticos da curva de resfriamento. TENSI & STEFFEN(1985).....	41
FIGURA 29:	A área sob a curva de resfriamento. THELNING (1986)...	41
FIGURA 30:	Princípio experimental da avaliação do valor H. LISCIC (1988).....	43
FIGURA 31:	Fator de temperabilidade de GROSSMAN. TOTTEN et al. (1989).....	45
FIGURA 32:	Prognóstico de PODER DE TÊMPERA HP, de óleos: a) determinação dos três pontos na curva, temperatura vs taxa de resfriamento usado para calcular o valor de HP; b) valores de HP calculado para têmpera de óleos. Aplicado apenas para o endurecimento de um aço sem ligas. BODIN & SEGERBERG (1993).....	47
FIGURA 33:	Prognóstico do poder de têmpera de polímeros: a) definição dos dois pontos na curva temperatura vs taxa de resfriamento usados para cálculos de HP; b) A relação entre medidas de dureza numa amostra de 16 mm de diâmetro x 48 mm de aço de médio carbono SS1672 (SAE 1045) e valores de HP. BODIN & SEGERBERG (1993).....	48
FIGURA 34:	Relação entre medidas de dureza na amostra de 16 mm de diâmetro x 48 mm do aço 38C2 e valores de HP (HRC) calculado do teste com: a) sonda de INCONEL; b) sonda de prata. BODIN & SEGERBERG(1993).....	49
FIGURA 35:	Ilustração esquemática do método para calcular o fator de têmpera Q. BATES (1987).....	52
FIGURA 36:	Correlação entre dureza calculada e medida em 18 locais numa peça temperada. BATES et al. (1992).....	53
FIGURA 37:	Ilustração esquemática mostrando o método para	

	encontrar a temperatura de início do estágio de convecção. TAMURA (1984).....	54
FIGURA 38:	Ilustração esquemática da relação entre o diagrama CCT e a faixa de temperatura onde se requer resfriamento rápido. TAMURA (1984).....	55
FIGURA 39:	Relação entre as temperaturas características na superfície de uma amostra de prata e uma de aço. TAMURA (1984).....	56
FIGURA 40:	Relação entre as temperaturas de início do estágio de convecção na superfície de uma amostra de prata e uma de aço. TAMURA (1984).....	57
FIGURA 41:	Relação entre duas faixas de temperaturas. Uma é o estágio de bolhas no processo de resfriamento do óleo e a outra é a faixa de transformação do aço que requer resfriamento rápido. Cálculo do valor V. TAMURA (1984).....	58
FIGURA 42:	Relação entre as dureza das amostras e o valor V dos óleos. TAMURA (1984).....	59
FIGURA 43:	Sonda LISCIC - NANMAC: LISCIC (1988).....	60
FIGURA 44:	Curva de resfriamento registrada para a superfície da sonda (T_n), para o ponto 1.5 abaixo da superfície (T_i) e para o centro (T_c) da secção transversal do corpo de prova. LISCIC (1988).....	61
FIGURA 45:	Curva relevante do fluxo de calor x tempo. LISCIC (1988).....	61
FIGURA 46:	Curva relevante do fluxo de calor vs temperatura da superfície. LISCIC (1988).....	62
FIGURA 47:	Diferença de temperatura entre a superfície e o centro do corpo de prova vs tempo. Liscic(1988).....	63
FIGURA 48:	Corpo de prova de aço SAE1045 com 25,4mm x 101,6mm.....	64
FIGURA 49:	Esquema da amostra retirada do corpo de prova temperado para análise de dureza e metalográficas.....	66
FIGURA 50:	Representação esquemática do sistema modular de análise de imagem.....	68

FIGURA 51:	Esquema do equipamento usado para obtenção das curvas, temperatura vs. Tempo e temperatura vs. taxa de resfriamento.....	69
FIGURA 52:	Tela que faz a monitoração das temperaturas no equipamento FACQUENCH.....	70
FIGURA 53:	Fluxograma para ilustração do procedimento experimental.....	70
FIGURA 54:	Curvas de distribuição da dureza para amostras de aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S925, S1125, S1325 e S1525.....	72
FIGURA 55:	Curvas de distribuição da dureza para amostras de aço SAE 1045 com 1 pol. (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S930, S1130, S1330 e S1530.....	73
FIGURA 56:	Curva de distribuição de dureza para as amostras de aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S935, S1135, S1335 e S1535.....	74
FIGURA 57:	Curvas de distribuição da dureza para amostra do aço SAE 1045 com 1 pol. (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S940, S1140, S1340 e S1540.....	75
FIGURA 58:	Curvas de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S945, S1145, S1345 e S1545.....	76
FIGURA 59:	Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S950, S1150, S1350 e S1550.....	77
FIGURA 60:	Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S925, S930, S935, S940, S945 e S950.....	78
FIGURA 61:	Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S1125, S1130, S1135, S1140, S1145 e S1150.....	79
FIGURA 62:	Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S1325, S1330, S1335, S1340, S1345 e S1350.....	80

FIGURA 63:	Curva de distribuição da dureza para amostras do açoSAE1045 com 1 pol (25,4) mm de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S1525, S1530, S1535, S1540, S1545 e S1550.....	81
FIGURA 64:	Diagrama de inter-relação do índice de endurecimento, concentração e temperatura.....	82
FIGURA 65:	Microestrutura do aço SAE 1045 temperado na solução de sal S935. Região central. Áreas de martensitas (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. Aumento de 280x.....	83
FIGURA 66:	Microestrutura do aço SAE 1045 temperado na solução de sal S1335. Região central. Áreas de martensita (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. Aumento 280x.....	84
FIGURA 67:	Microestrutura do aço SAE 1045 temperado na solução de sal S1325. Região de ½ raio. Áreas de martensita (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. a) Aumento de 280x. b) Aumento de 700x.....	85
FIGURA 68:	Microestrutura do aço SAE 1045 temperado na solução de sal S1350. Região de ½ raio. Áreas de martensitas (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. a) Aumento 280x. b) Aumento de 700x.....	86
FIGURA 69:	Microestrutura da região central aço SAE 1040 temperado na solução de sal S1325. Áreas de martensitas (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%.Aumento 200x.....	87
FIGURA 70:	Microestrutura da região central do aço SAE 1040 temperado no óleo padrão a 25°C. Áreas de ferrita (regiões claras nos contornos de grão) e perlita. Ataque nital 2%.Aumento 200x.....	87
FIGURA 71:	Microestrutura da região de 6 mm da superfície aço SAE 1040 temperado na solução de sal S1325. Áreas de martensitas (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. a) Aumento 200x. b) Aumento de 500x.....	88
FIGURA 72:	Microestrutura da região de 6 mm da superfície do aço SAE 1040 temperado no óleo padrão a 25°C. Áreas de ferrita (regiões claras nos contornos de grão) e perlita. Ataque nital 2%. a) Aumento 200x. b) Aumento de 500x..	89

FIGURA 73:	Curvas de resfriamento para calibrar a sonda a) tempo vs temperatura, b) Curva temperatura vs taxa de resfriamento para um óleo padrão.....	91
FIGURA 74:	Curvas de resfriamento a) temperatura em função do tempo b) Curva temperatura vs taxa de resfriamento, para a solução S1325.....	92
FIGURA 75:	Diagrama de inter-relação da taxa de resfriamento, concentração e temperatura.....	93
FIGURA 76:	Curvas de resfriamento para a solução de sal S925, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	101
FIGURA 77:	Curva de resfriamento para a solução de sal S935, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	102
FIGURA 78:	Curvas de resfriamento para a solução de sal S950, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	103
FIGURA 79:	Curvas de resfriamento para a solução de sal S1125, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	104
FIGURA 80:	Curva de resfriamento para a solução de sal S1135, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	105
FIGURA 81:	Curva de resfriamento para a solução de sal S1150, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	106
FIGURA 82:	Curva de resfriamento para a solução de sal S1325, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	107
FIGURA 83:	Curva de resfriamento para a solução de sal S1335, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	108
FIGURA 84:	Curvas de resfriamento para a solução de sal S1350, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.....	109

- FIGURA 85: Curva de resfriamento para a solução de sal S1525, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento..... 110
- FIGURA 86: Curva de resfriamento para a solução de sal S1535, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento..... 111
- FIGURA 87: Curva de resfriamento para a solução de sal S1550, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento..... 112

LISTA DE TABELAS

TABELA 1:	Número de Grossman para meios de têmpera mais representativos. DAKINS et al.(1989).....	42
TABELA 2:	Parâmetros do modelo estatístico usados para calcular o fator H.....	44
TABELA 3:	Variáveis do modelo estatístico.....	45
TABELA 4:	Faixa de temperatura que requer resfriamento rápido.....	56
TABELA 5:	Composição química do aço SAE 1045.....	64
TABELA 6:	Relação entre o número da solução de sal com a temperatura e concentração.....	65
TABELA 7:	Relação entre máxima taxa de resfriamento, temperatura e concentração.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Fe-C	- Ferro carbono
Fe-Fe ₃ C	- Ferro cementita
A ₃	- Temperatura de transformação $\gamma \Rightarrow \gamma$ +ferrita
γ	- Austenita
TCC	- Tetragonal de corpo centrado
CCC	-Cúbico de corpo centrado
HRC	-Dureza rockwell C
TTT	-Temperatura – tempo- transformação
ITT	-Isotérmico – tempo – transformação
CCT	-Transformação – resfriamento – contínuo
M _i	-Temperatura de início de transformação da martensita
M _f	-Temperatura de fim de transformação de martensita
SAE	- Society of Automotive Engineers
Rh	-Índice de endurecimento
HRC _q	- Valor de dureza após o resfriamento
HRC _{max}	-Máximo valor possível de dureza do aço
ISO	-International Organization for Standardization
ASTM	-American Society for Testing and Materials
T _s	-Temperatura na superfície
T _{1,5}	-Temperatura 1.5 mm abaixo da superfície
H	- Fator de severidade de têmpera de Grossman
h	- Coeficiente da transferência de calor
k	- Condutividade térmica

HV	- Dureza Vickers
PVA	- Polyvinil alcohol
PAG	- Polyalkylene glycol
PVP	- Polyvinil pyrrolidone
NaCl	- Cloreto de sódio
pot	- Potegada
IFHT	- International Federation for Heat Treatment
DIS	- Draft International Standards
JIS	- Japanese Industrial Standard
ASM	- American Society for Metals
MR_{max}	-Máxima taxa de resfriamento
R_{300}	-Taxa de resfriamento em 300°C
C	-Concentração
T	-Temperatura
V	-Velocidade do fluido
t_u	-Tempo de transição do primeiro para o segundo estágio
T_u	-Temperatura de transição do primeiro para o seundo estágio
$\dot{T}_{DHmin}$	-Taxa de resfriamento na temperatura de transição do primeiro para o segundo estágio.
$\dot{T}_{max}$	-Máxima taxa de resfriamento
T_{Tmax}	-Temperatura da máxima taxa de resfriamento
$\dot{T}_{200}$	-Taxa de resfriamento em 200°C
$\dot{T}_{300}$	- Taxa de resfriamento em 300°C
H_q	-Fator H de Grossman calculado por LISCIC
Δt_q	-Tempo de resfriamento de 700 para 300°C

X	-Taxa de resfriamento em 750°C
A	-Parâmetro estatístico, segundo dimensões da sonda
B	-Parâmetro estatístico
C	-Parâmetro estatístico
D	-Parâmetro estatístico
CR _p	-Taxa de agitação
HP	- Poder de têmpera (<i>hardening power</i>)
T _{vp}	-Temperatura de transição do primeiro para o segundo estágio
CR	- Taxa de resfriamento na faixa de temperatura 600-500°C
T _{cp}	- Temperatura de transição do terceiro para o segundo estágio
K ₁	- Constante
K ₂	- Constante
K ₃	- Constante
K ₄	- Constante
K ₅	- Constante
CR _f	- Taxa de resfriamento no cotovelo da curva TTT
CR _M	- Taxa de resfriamento na temperatura de formação da martensita
HP(HRC)	- Dureza calculada
O ₂	- Temperatura de transição do segundo para o terceiro estágio
V ₄₀₀	- Taxa de resfriamento em 400°C
C _i	- Variável de DECK
K'	- Variável de DECK
V _{max}	- Máxima taxa de resfriamento
O _{max}	- Temperatura da máxima taxa de resfriamento
O _t	- Temperatura do meio refrigerante
Q	- Fator de têmpera
TTP	- Tempo - temperatura - propriedade
C _T	- Função que descreve a cinética de transformação da liga
R	- Constante universal dos gases
q	- Fator incremental de têmpera

Δt	- Tempo do passo na curva de resfriamento
HP_{HRC}	- Dureza calculada
H_{min}	- Dureza mínima para a liga
H_{max}	- Dureza máxima para a liga
$K1$	- Constante
T_c	- Temperatura característica
T_d	- Temperatura do início do estágio de convecção
AISI	- American Iron and Steel Institute
χ	- Faixa de temperatura que requer resfriamento rápido
P	- Perlita
B	- Bainita
T_s	- Temperatura de início de transformação
T_f	- Temperatura de fim de transformação
V	- Fator de temperabilidade de TAMURA
ϕ	- Fluxo de calor
λ	- Condutividade térmica
$\frac{\partial T}{\partial N}$	- Gradiente de temperatura
T_n	- Temperatura na superfície
T_i	- Temperatura 1,5mm abaixo da superfície
T_c	- Temperatura no centro
q_{max}	- Máximo fluxo de calor
$T_{N_{qmax}}$	- Temperatura do máximo fluxo de calor
I	- Intensidade de resfriamento
t_{qmax}	- Tempo quando ocorre o máximo fluxo de calor
$\int_{t_0}^{t_{100}} q \, dt$	- Calor extraído
$t_{TC=300}$	- Tempo para a temperatura do centro atingir 300°C
ΔT	- Variação de temperatura

$T_{N_{qmax}}$	- Temperatura do máximo fluxo de calor
I	- Intensidade de resfriamento
t_{qmax}	- Tempo quando ocorre o máximo fluxo de calor
$\int_{t_0}^{t_{100}} q \, dt$	- Calor extraído
$t_{TC=300}$	- Tempo para a temperatura do centro atingir 300°C
ΔT	- Variação de temperatura

RESUMO

A determinação das curvas de resfriamento como alternativa para análise do meio de resfriamento usado nos tratamentos térmicos de têmpera, mostra-se como um dos métodos mais poderosos e eficientes para avaliar e/ou quantificar a severidade de têmpera do meio refrigerante. Assim, as soluções de sal AWS-20 testadas como meio de têmpera, tiveram o seu desempenho avaliado pelos métodos tradicionais como perfil da distribuição de dureza em corpos de prova e análise metalográfica e também através das suas curvas de resfriamento. Os resultados obtidos permitiram a sugestão de uma faixa de trabalho para temperatura e concentração com excelente rendimento e sendo confirmado pelo método de análise das curvas de resfriamento.

ABSTRACT

The determination of the cooling curves as alternative for analysis of the quenching media used in the heat treatments of hardening, is shown as one of the most powerful and efficient methods to evaluate and/or to quantify the quench severity of the quenchant. Thus, the solutions of salt AWS-20 tested as quenching media, had its acting evaluated by the traditional methods as profile of the distribution of hardness in test bodies and analysis metallographic and also through its cooling curves. The obtained results allowed the suggestion of a work strip for temperature and concentration with excellent revenue and being confirmed by the method of analysis of the cooling curves.

I - INTRODUÇÃO

Uma das principais etapas durante o processo de fabricação na indústria metal-mecânica, diz respeito ao processo de tratamento térmico das peças confeccionadas. Isto se deve ao fato de que muitas vezes estas peças necessitam adquirir propriedades mecânicas específicas que serão exigidas do produto final.

Entre os diversos tipos de tratamentos térmicos existentes, um dos mais importantes, em se tratando das características metalúrgicas finais da peça, é a têmpera. No caso dos aços, a têmpera proporciona uma estrutura de alta dureza e extremamente resistente ao desgaste, a martensita, que quando revenida pode desenvolver combinações ótimas de dureza e tenacidade.

O sucesso no processo de tratamento térmico de têmpera depende de vários fatores, dos quais podem ser destacados: temperabilidade da liga, geometria da peça e taxa de resfriamento. Esta última, por sua vez, está intimamente relacionada ao meio de têmpera, e às condições do banho como a sua agitação, temperatura e concentração (no caso de soluções de sais e polímeros). Esse conjunto de fatores determinam a taxa de extração de calor, o que, em última instância, será responsável pela microestrutura resultante.

Devido à sua importância, muitas pesquisas vem sendo realizadas para se determinar a capacidade de extração de calor de peças nos processos de têmpera. Um mecanismo que vem sendo bastante utilizado é o das curvas de resfriamento, pois sua derivada fornece a taxa de resfriamento em cada instante do processo de resfriamento, tornando-se assim, uma eficiente ferramenta de avaliação e controle da severidade do meio de têmpera, segundo o tipo de fluido de resfriamento utilizado e também da variação de seus parâmetros (concentração, temperatura e agitação).

O controle ou o acompanhamento desses fatores, seguidos de medidas apropriadas, podem resultar numa otimização do processo, o que

pode contribuir para a melhoria ou a manutenção da qualidade do produto final.

Este trabalho tem como objetivo verificar a influência da concentração do sal AWS - 20 e da temperatura, nas características de resfriamento da solução, determinando-se uma faixa de trabalho, onde o desempenho da solução se mantém constante. São também empregados outros métodos para avaliar as características do resfriamento da têmpera segundo o meio de resfriamento empregado no processo.

A análise das características de resfriamento, feita através do levantamento das curvas de resfriamento para cada condição experimental, foi realizada através de um sistema de aquisição de dados desenvolvido especialmente para este fim.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 - TRATAMENTOS TÉRMICOS

Tratamento térmico pode ser definido como o conjunto de operações que englobam aquecimento e resfriamento controlados para alterar a estrutura cristalina e granular, com o objetivo de dar ao material propriedades especiais tais como: dureza, tenacidade, ductilidade, etc. "Os tratamentos térmicos a que são submetidas as peças metálicas, constituem o meio mais usual seguro e eficiente de controle da sua estrutura, principalmente quando se trata de ligas ferrosas" (CHIAVERINI, 1987).

Desta forma diversos materiais, são submetidos aos mais variados tipos de tratamentos térmicos, visando a otimização de suas propriedades mecânicas, atendendo assim aos requisitos de resistência e dureza impostos pelas diversas aplicações.

II.2 - FENÔMENOS QUE POSSIBILITAM OS TRATAMENTOS TÉRMICOS

A despeito da grande variedade de materiais existentes, os aços desempenham um importante papel para a indústria e engenharia, devido as propriedades mecânicas que eles atingem após os tratamentos térmicos.

Há muito, as operações e conceitos de tratamentos térmicos eram baseados nas experiências práticas daqueles que executavam esse tipo de atividade. Essa experiência era então absorvida, utilizada e passada de geração para geração.

Foram desenvolvidos estudos científicos baseados nestes conceitos empíricos, a fim de se obter um número maior de informações sobre os fenômenos que ocorrem durante o tratamento térmico, com a finalidade de otimizar o processo utilizando-se de controle do fenômeno.

Na maioria dos materiais é possível a realização de tratamentos térmicos. Segundo PEREIRA(1972), no caso particular dos metais isso é possível devido à vários fatores, podendo-se destacar dois de maior

importância: a recristalização do material e a mudança de fase que ocorre em diferentes temperaturas. É possível observar na maioria dos diagramas de equilíbrio das fases das ligas em geral, a existência de fases distintas no estado sólido. "Teoricamente, desde que a variação de temperatura atinja a pelo menos dois desses campos do diagrama, há possibilidade de tratamento térmico" (PEREIRA, 1972, p.53).

II.2.1 - PRINCÍPIOS METALÚRGICOS DO PROCESSO

Para o estudo do comportamento das ligas metálicas no processo de aquecimento e resfriamento, são utilizados os diagramas de equilíbrio das fases.

Sendo construído experimentalmente através de pontos, os diagramas de equilíbrio apresentam as diversas transformações que ocorrem no material em função da variação da temperatura e da concentração de elementos de ligas.

A figura 1 apresenta o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, onde pode ser observado regiões do material formadas por diferentes fases, separadas por linhas que limitam transformações de uma fase para outra em função da temperatura e concentração de carbono.

Neste diagrama é possível verificar que as alterações na microestrutura de produtos siderúrgicos ocorrem devido às transformações alotrópicas no ferro puro. Esse fenômeno é responsável pelas formas do arranjo cristalino dos átomos de ferro, que junto com a ação do carbono, tornam-se de fundamental importância nas transformações de fase durante as etapas de aquecimento e resfriamento no processo de tratamento térmico. São estas transformações que serão responsáveis pelas propriedades finais adquiridas nesse processo.

II.2.2 - ESTUDOS DE PRODUTOS DA DECOMPOSIÇÃO DA AUSTENITA

A configuração cúbica de face centrada do ferro é denominada austenita, ou ferro γ . Nas temperaturas entre 912 e 1394°C é a forma estável do ferro puro.

Segundo SILVA & MEI (1988), a austenita é definida como sendo a solução sólida de carbono em ferro. Na figura 1 pode ser observado que a região austenítica (γ) do aço é função da temperatura e concentração de carbono, sendo que para uma determinada composição, a temperatura na qual se obtém uma estrutura inteiramente austenítica é denominada "temperatura de austenitização".

Para diferentes composições e diferentes velocidades de resfriamento esta austenita transformar-se-á em microestruturas como ferrita, perlita e martensita.

Em um resfriamento lento a partir da temperatura de austenitização até a temperatura ambiente (processo definido na metalurgia como tratamento térmico de recozimento), os produtos resultantes da austenita serão: ferrita, perlita e cementita, dependendo do teor de carbono.

Em resfriamentos rápidos a partir da temperatura de austenitização até a temperatura ambiente (processo este, definido como tratamento térmico de têmpera), o produto resultante poderá ser a martensita. A martensita é uma solução sólida super saturada de carbono em ferro tetragonal de corpo centrado (tcc), sendo uma forma distorcida do ferro

cúbico de corpo centrado (ccc), o que resulta na alta dureza da martensita. Como pode ser observado pela figura 2, a dureza da martensita depende do teor de carbono existente no aço, para um mesmo teor de carbono, a dureza por sua vez, será tanto maior quanto maior a porcentagem de martensita presente na microestrutura.

FIGURA 2 - Relação entre teor de carbono e porcentagem de martensita na dureza HRC. METALS HANDBOOK(1981).

A martensita é um constituinte de grande importância metalúrgica, devido às propriedades mecânicas alcançadas após o revenimento, aliando dureza e tenacidade.

É uma fase metaestável e a sua formação ocorre fora do equilíbrio termodinâmico, a partir de um resfriamento rápido da fase austenítica, não havendo tempo para o processo de difusão ocorrer, resultando apenas de uma ação cisalhante.

II.3 - TÊMPERA

Dos tratamentos térmicos existentes, a têmpera é um dos mais importantes, permitindo que um material atinja propriedades relevantes de dureza e resistência ao desgaste para o seu emprego em peças de alta responsabilidade nos mais diversos campos da engenharia, transporte, aviação e navegação.

A têmpera pode ser aplicada em vários materiais e, como já citado, é bastante usado nas ligas de ferro-carbono e, em particular, nos aços.

Este processo como já comentado, consiste em aquecer o material a ser tratado até a temperatura de austenitização (fase γ) e resfriá-lo em um meio que provoque um resfriamento rápido como: jato de ar, água, óleo, solução de sais e soluções poliméricas. Este resfriamento rápido impedirá que outras estruturas se formem, o que causaria uma diminuição na dureza e resistência mecânica.

A escolha do meio de resfriamento a ser utilizado na têmpera depende do material a ser temperado, tamanho e geometria da peça e ainda das propriedades desejadas, de tal forma a obter uma estrutura martensítica, livre das tensões internas que possam gerar deformações e trincas no produto final.

A qualidade do tratamento térmico de têmpera é bastante influenciada pela escolha adequada dos parâmetros como tempo e temperatura de austenitização, tipo de material e também da velocidade de resfriamento utilizado.

II.3.1 - TEMPERABILIDADE

O termo temperabilidade refere-se à habilidade ou, a capacidade de um material transformar-se da fase austenítica para a martensítica sob determinadas condições. É a temperabilidade que determinará a velocidade de resfriamento necessária para se obter uma estrutura martensítica.

A temperabilidade é uma característica específica de cada material. Para aços temperáveis de composições químicas diferentes, surgem diferenças na resposta do material ao tratamento térmico.

A temperabilidade de um material é medida, segundo a profundidade de têmpera atingida no processo, considerando o fato de que um material é dito temperado, se a sua estrutura, for constituída de no mínimo 50% de martensita. Segundo KRAUSS (1988) a razão para a escolha de 50% deve-se ao fato de que a diferença, entre a parte temperada e não temperada, é mais claramente definida neste nível, figura 3.

FIGURA 3 - Transição de microestrutura martensítica para perlítica entre uma região endurecida e não endurecida de um aço temperado. KRAUSS(1988).

Como a temperabilidade é uma característica relacionada ao tipo de material, torna-se necessário conhecer o comportamento destes materiais em relação a velocidade de resfriamento.

II.3.1.1 CURVAS TTT

Para acompanhar e controlar as transformações das fases originadas da austenita, decorrentes ou não do equilíbrio, lança-se mão das curvas TTT

(temperatura, tempo, transformação), que segundo SILVA & MEI(1988) podem ser subdivididas em:

a) ITT (*isothermal, time, transformation*), que são curvas TTT que representam as transformações que ocorrem isotermicamente.

b) CCT (*continuous, cooling, transformation*), que são as curvas TTT, obtidas através de resfriamento contínuo.

A figura 4 apresenta um modelo esquemático de uma curva TTT, evidenciando, faixas de transformações e os produtos resultantes do processo de resfriamento a partir da austenita.

FIGURA 4 - Representação esquemática do diagrama de transformação isotérmica. BROPHY et al.(1972).

Como pode ser observado na figura 4, o diagrama TTT é um mapa que contém faixas para as diferentes transformações de fases, como função do tempo e temperatura, incluindo a fase metaestável martensítica. O campo hachurado, limitado pelas curvas de início e fim, representa a região de

transformação para produtos da austenita, que se formam pelo processo difusional, onde ocorre nucleação e crescimento. As linhas horizontais M_i e M_f marcam o início e fim da região de transformação do constituinte martensita, que se forma pelo processo de cisalhamento.

Conforme KUBAN et al (1986) as curvas TTT para transformações isotérmicas, não apresentam muito valor para prognosticar um tratamento térmico. Isto porque na prática a maioria dos casos de tratamentos térmicos ocorre pelo processo de resfriamento contínuo. Assim, as curvas CCT, figura 5, segundo KASPAR & HOPPE(1990) se apresentam como as mais adequadas para se prever a formação de constituintes decorrentes desse resfriamento contínuo. Diagramas CCT para varias ligas são relacionados em atlas conforme ATKINS(1977).

Superpondo-se curvas de resfriamento sobre um diagrama CCT, pode-se verificar, as microestruturas resultantes como função da velocidade de resfriamento, figura 5.

FIGURA 5 - Superposição de curvas de resfriamentos num diagrama CCT para um aço hipoeutetóide.

Com relação a figura 5:

- Uma velocidade baixa de resfriamento, como representa a curva 1, resultará em ferrita mais perlita.

- Uma velocidade mais alta como a curva 2, vai fornecer ferrita, perlita e bainita e, martensita em menor proporção.

- A curva 3 corresponde à velocidade crítica de resfriamento, que vem a ser a menor velocidade de resfriamento onde, a estrutura resultante é composta inteiramente por martensita.

- Através da curva 4 obtém-se uma estrutura completamente martensítica, mas a uma velocidade superior à crítica o que, na prática, não é recomendado pelo risco de aparecimento de trincas.

Com isto verifica-se claramente que quanto mais a direita do eixo das ordenadas estiver o cotovelo da curva CCT, menor será sua velocidade crítica e, assim, mais facilmente será temperado o material, uma vez que o processo de transformação da austenita em ferrita, cementita, perlita e bainita torna-se mais demorado.

Então, o posicionamento das curvas se relaciona à temperabilidade do material, sendo tanto mais temperável quanto mais à direita estiver sua curva. Este posicionamento depende da composição química, do tamanho do grão e da homogeneidade da austenita.

De uma maneira geral elementos de ligas adicionados ao aço favorecem a temperabilidade, figuras 6a e 6b. O carbono também influencia na temperatura de formação da martensita, ou seja, quanto maior a concentração de carbono menor a temperatura de início e fim de formação da martensita, figura 7.

FIGURA 6 - Curva TTT do aço tipo a) SAE 1050 composição: Fe 0,50%C - 0,91%Mn tamanho de grão: 7 - 8 austenitizado em 910°C (1670°F) b) SAE 4340 composição Fe - 0,42%C - 0,78%Mn - 1,79%Ni - 0,80%Cr - 0,33%Mo tamanho de grão 7-8 austenitizado em 843°C (1500°F). VANDER VOORT(1991).

FIGURA 7 - Efeito do teor de carbono na temperatura de formação da martensita. SILVA & MEI (1988).

Outros fatores como tamanho de grão e homogeneidade da austenita também influem na temperabilidade figura 8 e 9

FIGURA 8 - Influência do tamanho de grão no diagrama TTT de um aço com 0.87% C, 0.3% Mn e 0.27% V. COLPAERT(1974).

FIGURA 9 - Influência da homogeneidade da austenita no diagrama TTT de um aço com 0.87% C, 0.3% Mn e 0.27% V. COLPAERT(1974).

II.3.1.2 - A TEMPERABILIDADE COMO CARACTERÍSTICA DO RESFRIAMENTO

Como já citado, o conceito de temperabilidade está associado à capacidade de endurecimento do material, pela formação da martensita à determinada profundidade durante o processo de tratamento térmico de têmpera. Foram então desenvolvidos ensaios para averiguar a temperabilidade, relacionando dureza e distância da superfície temperada. Pode-se citar, entre eles o método de Grossman conforme GROSSMAN et al. (1939), e o método Jominy, que foram desenvolvidos relacionando dureza e distância da superfície temperada.

O teste de temperabilidade, em alguns casos, também pode caracterizar o resfriamento.

Conforme LAKIN(1979), o efeito real do resfriamento pode ser observado realizando teste de temperabilidade usando um aço padrão. Amostras cilíndricas de aço são temperadas em diferentes banhos, e então, posteriormente, são feitas as determinações das durezas na seção transversal. De acordo com DAKINS et al. (1992), uma estimativa da severidade de têmpera, por este método, está sujeito a problemas de reprodutibilidade devido a grandes variações na composição químicas do aço.

Conforme RÉTI et al. (1993), um método para quantificar a performance do endurecimento do meio é temperando uma amostra cilíndrica de um aço equivalente ao SAE 1045(0,45%C, 0,65%Mn, 0,25%Si), com diâmetros de 16mm (0,64pol.) ou 25mm (1pol.). Calcula-se então o índice de endurecimento R_h introduzido por JUST¹ apud RÉTI(1993), de acordo com a expressão:

$$R_h = 100 \times \frac{HRC_q}{HRC_{max}} \quad (1)$$

onde:

R_h = Índice de endurecimento [%];

¹ Just, e., Wolff, J. Zeitschrift fur Wirtschaftliche Fertigung, 74, pp.442-444, 1979.

HRC_q = Valor da dureza após o resfriamento;

HRC_{max} = É o máximo valor possível de dureza do aço.

O valor de HRC_{max} pode ser calculado como uma função da concentração de carbono:

$$HRC_{max} = 20 + 60\sqrt{\%C} \quad (2)$$

Segundo BODIN & SEGERBERG(1993), o uso do teste, Jominy (ISO 642 e ASTM A 255), também tem sido proposto. “Apesar do teste apresentar bons resultados, a sua sensibilidade depende efetivamente da característica Jominy do padrão do aço escolhido, relativo à característica de resfriamento do banho”(LAKIN,1979,p.60).

De acordo com LAKIN(1979) a desvantagem do método, é que o jato (*spray*) destrói rapidamente a camada de vapor escondendo diferenças significativas e, também, não existe nenhum aço que seja apropriado para todos os banhos.

II.3.2 TAXA DE RESFRIAMENTO

Segundo METALS HANDBOOK(1981), quando um aço carbono é temperado a partir da temperatura de austenitização é necessário uma taxa de resfriamento maior que 55°C/seg, medido em 705°C para evitar o nariz da curva TTT. A seção transversal total da peça deve resfriar nesta taxa para obter a máxima quantidade de martensita.

Uma têmpera realizada em água pode produzir uma taxa de 2760°C/seg na superfície da peça. Esta taxa de resfriamento é bem menor no centro da peça.

Quando usado água ou banho de sais para o resfriamento, altos gradientes de temperatura são desenvolvidos entre a superfície e o centro. Este gradiente de temperatura resulta em grandes distorções e trincas, devido às altas tensões internas.

Resfriamentos realizados em óleos resultam em menores gradientes de temperaturas, figura 10, diminuindo as distorções e riscos de trincas. Assim a qualidade final da têmpera bem como a dureza, profundidade da têmpera e ausência de tensões internas podem variar com a taxa de resfriamento.

Figura 10 - Curva de resfriamento para óleo e água. TOTTEN et al.(1993)

BODIN & SEGERBERG (1993), consideram a parte mais crítica do processo de têmpera, como sendo o resfriamento, e por isso deve ser conduzido sob condições nas quais, a extração de calor na peça quente deve ser feita a uma taxa apropriada, para produzir microestruturas e dureza desejadas, aliado a baixas tensões residuais.

Segundo KRAUSS (1988) existem dois fatores importantes que influenciam a taxa de resfriamento ou taxa de extração de calor do material:

- a) A capacidade do calor difundir do interior para a superfície do material
- b) A capacidade do meio de resfriamento, remover calor da superfície do material.

A capacidade do calor difundir do interior para a superfície do material é definido como transferência de calor em um material, e é caracterizado pela sua difusibilidade térmica ou a razão da sua condutividade térmica pelo volume do calor específico.

A difusibilidade térmica é responsável pela distribuição da temperatura como função da posição em um dado tempo, durante o processo de resfriamento para determinado meio, figura 11.

FIGURA 11 - Curvas de resfriamento em varias posições de uma barra de 1 polegada (25,4mm) de diâmetro temperada com uma severidade de têmpera $H = 4$. KRAUSS (1988).

Segundo APRAIZ BARREIRO (1985), se estudarmos o resfriamento de um cilindro, aquecido a altas temperaturas, fica claro entender que a camada superficial do cilindro, que está em contato com o líquido, se resfriará primeiro. A camada seguinte não se resfriará com tanta velocidade, e o calor não será transmitido diretamente para o líquido, terá que atravessar a camada superficial que possui uma condutibilidade térmica limitada, e uma outra camada, localizada mais próxima do centro se resfriará mais lentamente, e assim por diante até chegar ao centro, que apresentará a menor taxa de resfriamento.

Portanto é comum encontrar em um mesmo material, diferentes microestruturas ao longo do diâmetro após a realização de uma têmpera. Este fato evidencia a forte dependência das dimensões da peça no processo de têmpera. Quanto mais afastado da superfície menor será a taxa de resfriamento, havendo assim um maior tempo para as transformações de

difusão controlada, resultando em pontos de baixa dureza no centro pela não formação da martensita.

Assim, para as regiões que apresentaram taxa de resfriamento menor que a taxa crítica, a dureza será menor. A figura 12 ilustra o efeito da espessura na velocidade de resfriamento.

FIGURA 12 - Efeito da espessura da seção na taxa de resfriamento. BERGEN (1979).

Quando existe a necessidade de uma têmpera mais profunda, pode-se utilizar um aço de maior temperabilidade, com sua curva CCT deslocada mais a direita com relação ao aço da figura anterior, como observado na figura 6.

Há também a possibilidade e, muitas vezes seja a opção mais viável, alterar a taxa de resfriamento através de mudanças no meio de resfriamento, figura 13.

FIGURA 13 - Efeito da taxa de resfriamento na dureza. BERGEN(1979).

O fator que influencia a taxa de resfriamento, citado aqui como capacidade do meio de resfriamento remover calor da superfície do material, é também conhecido como severidade de têmpera .

Conforme IMAMURA & CAPOCCHI (1986) a severidade de têmpera é definida como um parâmetro metalúrgico que avalia o quão drástico é um meio de têmpera, existindo uma escala de valores padronizada para comparação, sendo a sua determinação fundamental para caracterizar, selecionar ou até controlar um meio de resfriamento.

Um índice que tem sido usado para descrever e/ou caracterizar a severidade de têmperas, é o fator H.

De acordo com BATES (1987), DAKIN et al (1992), BODIN & SEGERBERG (1993), o fator H , introduzido por GROSSMAN para caracterizar e classificar os meios de têmperas, foi definido como sendo o coeficiente da transferência de calor (h) dividido por duas vezes a condutividade térmica do material (k).

$$H = h/2k \quad (3)$$

Segundo GROSSMAN et al. (1939), o fator H pode ser calculado graficamente através de um conjunto de resultados da têmpera de várias barras com um diâmetro mínimo para que exista uma região central do material não atingida pela têmpera.

II.3.2.1 - MEIOS DE TÊMPERA.

O meio de têmpera ou meio de resfriamento, em conjunto com outros fatores como a sua agitação, concentração, temperatura, tamanho e forma da peça, irão determinar a taxa de resfriamento.

De acordo com BERGEN (1979), para se obter uma eficiência máxima do processo de têmpera, é necessário entender como ocorre o resfriamento, ou seja, o que acontece quando uma peça de aço incandescente é temperada.

Conforme THELNING (1983), na têmpera em meio líquido, o resfriamento ocorre em três estágios distintos, cada qual possuindo

diferentes características. A figura 14 apresenta um esquema da curva de resfriamento temperatura vs tempo, definindo os três estágios do resfriamento.

FIGURA 14 - Os três estágios da curva de resfriamento. THELNING (1983).

- O primeiro estágio ou estágio de vapor refere-se a fase de vapor, caracterizado pela formação de uma camada de vapor em torno da peça aquecida. A taxa de resfriamento neste estágio é baixa, pois o processo de extração de calor, da peça pelo meio, é por radiação através da camada de vapor.
- O segundo estágio ou estágio de bolhas, inicia-se quando a camada de vapor entra em colapso, e dá lugar à formação e subsequente desprendimento de bolhas. Este estágio normalmente tem uma duração curta, e possui uma alta taxa de extração de calor.
- O terceiro estágio inicia-se quando a temperatura da peça é insuficiente para vaporizar o meio de têmpera, e caracteriza-se por baixas taxas de extração de calor, que ocorre por condução e convecção.

Os três estágios mostrados na curva de resfriamento temperatura vs tempo, podem também ser representados como um gráfico diferencial, taxa de resfriamento ($^{\circ}\text{C} / \text{seg}$) vs temperatura, figura 15.

FIGURA 15 - Verificação de uma curva diferencial de taxa de resfriamento. BERGEN (1979).

A taxa de resfriamento é dado pela inclinação da curva temperatura vs tempo, isto é, uma inclinação suave no primeiro e terceiro estágio, indica baixas taxas de resfriamento, enquanto uma inclinação maior no segundo estágio dá a indicação de altas taxas de resfriamento nesse período.

Segundo BERGEN (1979), a curva taxa de resfriamento vs temperatura é bastante sensível e se modifica sob efeito de fatores como agitação, temperatura, efeitos de contaminantes e efeito da concentração.

Conforme já comentado, dentre os meios de resfriamentos mais comuns utilizados nos processos de têmpera pode-se citar: Jato de ar, água, óleo, solução de sais (banho de sal ou salmoura) e soluções de polímero.

a) Jato de ar ou *spray*

O resfriamento efetuado por esse processo, como o próprio nome já diz, consiste em resfriar o material a partir da temperatura de austenitização

através da aplicação de jatos de ar na peça. Neste caso a velocidade de resfriamento é função do comportamento do fluxo de gás na peça.

SEGERBERG(1988) estudando características do resfriamento em *spray*, que é uma aplicação simultânea de ar e água sob pressão, concluiu que o jato pode penetrar a camada de vapor provocando sua extinção, facilitando a transferência de calor. A taxa de resfriamento é influenciada pelo fluxo de água, figura 16.

FIGURA 16 - Efeito do fluxo de água na taxa de resfriamento, para um jato com fluxo de ar constante. Distancia entre o jato e a peça é 140mm, e a taxa de ar consumida é $14\text{Nm}^3/\text{h}$.SEGERBERG(1988).

b) Água

Em termo de custo a água é o meio líquido mais econômico. Entretanto, por apresentar um primeiro estágio longo pode, em algumas situações, comprometer o resultado final.

É conveniente, para este meio, que a temperatura oscile entre 15 e 20 °C, pois se a temperatura for superior a 30 °C, será prolongada de forma exagerada, a camada de vapor, figura 17, diminuindo a velocidade do resfriamento na faixa entre 750 e 500 °C.

FIGURA 17 - Curvas de resfriamento do centro de vários cilindros de 25mm de diâmetro, temperados em água a diversas temperaturas. APRAIZ BARREIRO (1985).

c) Óleo

Como meio de resfriamento, os óleos mais comuns empregados são os minerais, obtidos através da destilação fracionada do petróleo.

Para GRISHIN & CHURYUKIN (1986), a melhor característica de resfriamento, para a maioria das ligas de aço, é exibida pelos óleos minerais. De acordo com DICKEN (1986), os óleos são os mais utilizados nos processos de resfriamentos, por proporcionarem comportamento no resfriamento bastante interessante.

d) Soluções de sais.

Os banhos de sais são bastantes empregados nos processos de tratamento térmicos devido à qualidade atingida na têmpera.

Esses banhos são constituídos, na sua maioria, por concentrações variadas de cloretos, carbonatos, nitritos, nitratos e cianetos de sódio, potássio e boro.

Uma das principais características dos resfriamento em sais são as altas velocidades obtidas através da redução do tempo no primeiro estágio.

Como já comentado a água pura como meio de resfriamento apresenta um primeiro estágio longo. A adição de sal na água (banho de sais), apresenta um excelente efeito na redução deste primeiro estágio, devido ao fato que minúsculos cristais são incorporados na superfície da peça durante o estágio de vapor e, a alta temperatura na superfície da peça, causa uma violenta fragmentação desses cristais. Em consequência, cria-se uma turbulência destruindo a camada de vapor fornecendo assim, altas taxas de resfriamento, figura 18.

FIGURA 18 – Mecanismo das soluções de sais. HOUGHTON.

De acordo com ILDER(1987), com a adição de sal na água ocorre uma deposição dos cristais de sal na superfície do metal quente, promovendo uma acentuada nucleação de sítios para o borbulhamento.

Segundo BOYER (1988), a têmpera em soluções de sais oferece algumas vantagens quando comparada à água e, em algumas circunstâncias, até mesmo ao óleo. Por exemplo:

- Requer um menor grau de agitação para alcançar a mesma taxa de resfriamento;
- A possibilidade de pontos moles na peça é menor pois a camada de vapor é reduzida;
- Apresenta um resfriamento mais uniforme, sendo que as distorções nas peças temperadas nos banhos de sais são geralmente menores do que na água.

Embora a corrosão possa ser um dos efeitos negativos no processo de têmpera em soluções de sais, a sua utilização se faz necessária quando os demais meios não se mostram eficientes.

e) Soluções de polímeros

Nesta classe, estão relacionados uma grande faixa de fluídos sintéticos desenvolvidos para resfriamento de têmpera.

Conforme METALS HANDBOOK (1981) certos polímeros orgânicos solúveis em água, vêm sendo usados para modificar as características de resfriamento da água. Inicialmente as soluções poliméricas, eram usadas quando se desejava características de resfriamento intermediárias, entre água pura e óleo mineral. Atualmente consegue-se colocá-las em uma ampla faixa de utilização, substituindo muitas vezes os óleos minerais.

Dos vários tipos de polímeros usados comercialmente destacam-se quatro classes: PVA (*polyvinyl alcohol*), PAG (*polyalkylene glycol*), PVP (*polyvinyl pyrrolidone*) e *polyacrylate*.

De acordo com VON BERGEN (1991), tecnicamente os polímeros possuem grande flexibilidade na taxa de resfriamento por meio da concentração e temperatura conseguido por meio de alterações na concentração e temperatura.

Para VON BERGEN (1991), a característica de resfriamento dos polímeros depende muito do nível de agitação. MONROE & BATES (1983), afirmam que altas temperaturas e agitação inadequada, proporcionam baixas taxas de resfriamentos.

II.3.2.1.1 - EFEITO DA AGITAÇÃO

De acordo com BERGEN(1979), em geral a agitação do meio de têmpera acelera a remoção de calor pela limitação da duração da fase de vapor, diminuindo o período de duração do primeiro estágio, resultando num aumento da severidade de têmpera.

Além disso, garante também a temperatura uniforme do fluído e faz com que o meio de têmpera envolva toda a peça, melhorando a uniformidade da têmpera.

MONROE & BATES(1983), estudando características no resfriamento, concluíram que o efeito da agitação é maior na água do que no óleo. Conforme MASON & CAPEWELL(1986), a agitação não afeta apenas a característica do resfriamento, mas também diminui o risco de fogo durante o resfriamento em óleos, devido ao aumento excessivo da temperatura do banho, que pode atingir o ponto de fulgor.

II.3.2.1.2 - EFEITO DA CONCENTRAÇÃO.

A concentração exerce forte influência nas características de resfriamento das soluções, no caso dos polímeros e soluções de sais.

Segundo BOYER (1988), nas tâmporas convencionais realizadas com solução de cloreto de sódio (NaCl), tem-se observado que uma concentração de 10% é mais efetiva do ponto de vista do endurecimento. A figura 19 mostra uma relação entre dureza e concentração de sal como meio de tâmpora. Embora concentrações na ordem de 24% sejam interessantes para se reduzir a fase de vapor no primeiro estágio de resfriamento, a figura 19 mostra que nesses níveis a dureza adquirida pela peça não é máxima.

FIGURA 19 - Relação de dureza em função da concentração de sal. BOYER (1988).

HILDER(1987) estudando comportamento de polímeros como banho de tâmpora, concluiu que o aumento da concentração traz uma diminuição nas taxas máximas de resfriamento, figura 20.

FIGURA 20 - Efeito da concentração do polímero na (a) máxima taxa de resfriamento e (b) taxa de resfriamento em 300°C, testado em 30°C e velocidade do fluido de 0,5m/s. HILDER(1987)

II.3.2.1.3 - EFEITO DA TEMPERATURA

BOYER (1988), estudando o efeito de temperatura no tratamento térmico observou que os fluidos de têmpera como água, soluções de polímeros, sais e óleos são influenciados por alterações na temperatura. Concluiu também que pequenas variações de temperatura não tem efeito significativo na capacidade de resfriamento das soluções de sais. Sendo que estas soluções são usadas em temperaturas em torno de 20 °C nas quais ocorrem a máxima capacidade de resfriamento.

A Figura 21 mostra o efeito relativamente pequeno da temperatura na velocidade de resfriamento do banho de sal.

Segundo MONROE & BATES (1983) o efeito da temperatura é mais significativo quando o meio de resfriamento é somente água.

FIGURA 21 - Curvas de resfriamento do centro de uma amostra de aço inoxidável 18-8 de 0,5 pol. de diâmetro e 2,5 pol. de comprimento, sem agitação em água e em solução de 10% de NaCl. BOYER (1988).

No caso das soluções de polímeros, a situação é diferente. Segundo HILDER(1987) o aumento na temperatura dessas soluções, traz uma diminuição na máxima taxa de resfriamento, figura 22.

FIGURA 22 Efeito da temperatura do polímero na (a) máxima taxa de resfriamento e (b) taxa de resfriamento em 300°C testado na concentração de 15%, e velocidade do fluído de 0,5m/s. HILDER(1987).

II.3.3. - MÉTODOS USADOS PARA AVALIAR AS CARACTERÍSTICAS DO RESFRIAMENTO

Como já mencionado segundo TAMURA et al. (1984), o comportamento do endurecimento mediante a têmpera depende da inter-relação entre o comportamento de transformação do aço e o comportamento de resfriamento do aço.

O comportamento de transformação dos aços é controlado pelo teor de carbono, elementos de ligas e tamanho de grão da austenita, sendo bem expressado pelo diagrama TTT dos aços.

O comportamento de resfriamento dos aços é controlado por dois fatores. Um é a característica de resfriamento do meio e o outro é o tamanho e forma da peça.

Segundo TOTTEN et al. (1988) um procedimento comum usado para caracterizar o resfriamento do meio, é medir sua força de resfriamento. Neste caso estão incluídos o teste magnético, teste do arame quente, teste de intervalo de cinco segundos e o teste da curva de resfriamento. De acordo com METALS HANDBOOK(1981) e RETI et al.(1993), desses procedimentos, o teste da curva de resfriamento tem sido geralmente aceito como o meio mais proveitoso para descrever o complexo mecanismo de resfriamento, caracterizando a força de resfriamento de um determinado meio.

Um número muito grande de pesquisas envolvendo curvas de resfriamento vem sendo publicado trazendo um significativo entendimento do processo de resfriamento e sua influência nas propriedades dos materiais temperados.

Um dos fatores que está influenciando positivamente neste progresso é a velocidade com que avança a tecnologia na área da informática, fornecendo ferramentas que possibilitam um melhor entendimento entre o banho de têmpera e o material temperado, encorajando pesquisas no desenvolvimento de métodos padronizados que possam prognosticar os resultados da têmpera.

II.3.3.1 - TESTE DA CURVA DE RESFRIAMENTO

De acordo com BODIN & SEGERBERG(1993), este é um método útil para se medir a capacidade do meio extrair calor da peça, desde que o processo completo de resfriamento seja registrado.

Este método é realizado através da monitoração do resfriamento de um corpo de prova aquecido, com um termopar fixado no seu centro geométrico (sonda). Conforme MONROE & BATES (1983) a sonda é mais sensível para detectar mudanças nas condições do meio, do que as medidas de dureza nas barras.

Alguns pesquisadores como LISCIC(1978) utilizam vários termopares, que podem ser fixados na superfície, próximo à superfície e no centro geométrico do corpo de prova, obtendo com isso um número maior de informações para auxiliar em suas conclusões.

Normalmente os materiais utilizados no corpo de prova são: aço inoxidável austenítico, níquel, liga de níquel ou prata. A forma do corpo de prova pode ser cilíndrica ou esférica.

Apesar de alguns pesquisadores como LAKIN(1979) usarem esferas de prata para o corpo de prova, muitos escolhem a forma cilíndrica por motivo de fabricação.

A sensibilidade das medidas das curvas de resfriamentos registradas é influenciada por vários fatores, como: condutividade térmica do material, tamanho do corpo de prova, posição do termopar no corpo de prova.

Quanto maior a condutividade térmica do material e quanto menor for o tamanho do corpo de prova maior será a sensibilidade das medidas de temperaturas (caso o termopar esteja fixado no centro geométrico do corpo de prova).

A relação entre a sensibilidade, custo de fabricação e vida útil, é que vai determinar as características do corpo de prova, como: material, tamanho, e posição do termopar.

2.3.3.1.1- PADRÕES PARA TESTES DE CURVAS DE RESFRIAMENTO

A International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering(IFHT) tem trabalhado na padronização do teste para banho de têmpera.

Esses padrões são baseados em propostas de teste realizados em alguns países e submetidos à International Organization for Standardization (ISO).

A primeira proposta submetida a ISO, envolve teste de óleos usando um corpo de prova cilíndrico de 12,5mm de diâmetro x 60mm de comprimento feito de inconel 600 (UNS N06600), figura 23.

Figura 23 - Corpo de prova segundo o padrão internacional (ISO/DIS 9950) baseado na especificação do Wolfson Heat Treatment Centre Engineering Group. BODIN & SEGERBERG(1993).

Conforme a INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (1995), o teste é realizado pelo resfriamento do corpo de prova (sonda) de 850°C em uma amostra de 2 litros do óleo em estudo, sem agitação.

Os resultados do teste são expressos através das curvas: temperatura vs tempo e temperatura vs taxa de resfriamento. Destas curvas são lidos os seguintes dados: tempo do resfriamento para 600, 400, 200°C, máxima taxa de resfriamento, temperatura na qual ocorre a máxima taxa de resfriamento, taxa de resfriamento em 300°C.

II.3.3.1.3 - TESTES PADRONIZADOS DE ALGUNS PAÍSES

De acordo com ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION (1989), a norma NF T 60-185, é o padrão francês para teste de óleos. É usado um corpo de prova cilíndrico de prata de 16mm de diâmetro por 48mm de comprimento. O teste é feito sem agitação, resfriando o corpo de prova a partir de 800°C em uma amostra de 700ml de óleo.

Conforme STATE BUREAU OF STANDARDS OF THE PEOPLES'S REPUBLIC OF CHINA(1988), a norma GB 9449 - 88 é o padrão chinês aplicado para testes de meios de têmpera a base de óleo e a base de água. O padrão chinês é idêntico ao francês com relação ao tamanho e material do corpo de prova e temperatura do óleo. A principal diferença está na sensibilidade das medidas, onde se faz uso de termopar com 0.5mm de diâmetro ao invés de 1.0mm.

De acordo com JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD(1991), a norma JIS K 2242 1991, é o padrão japonês. O teste envolve um corpo de prova de prata de forma cilíndrica com 10mm de diâmetro por 30mm de comprimento, equipado com termopar sua superfície como mostra a figura 24. O teste é feito resfriando o corpo de prova a partir de 810°C em uma amostra de 250ml de óleo

Figura 24 - Corpo de prova segundo padrão japonês JIS K 2242-1980. BODIN & SEGERBERG(1993).

Embora não formalmente padronizado, a especificação Wolfson que é similar ao desenho ISO, tem de fato sido aceito como padrão dentro das indústrias britânicas desde a sua publicação em 1982.

II.3.3.1.3.- SISTEMAS DE AGITAÇÃO PARA ENSAIOS

Como já citado, a agitação é um parâmetro extremamente importante na transferência de calor, influenciando significativamente nas características do resfriamento.

Segundo HILDER(1985), alguma forma de agitação é necessário quando se avalia as características de resfriamento, principalmente de banhos aquosos.

Entre os sistemas de agitação mais comuns usados nos testes de laboratórios, para avaliar as característica de resfriamento, estão: agitador magnético, plataforma giratória, hélice propulsora com anteparo e bomba hidráulica.

HILDER(1985), estudando sistemas de agitação empregados em testes de resfriamento concluiu que:

- O sistema constituído por agitador magnético provoca um turbilhonamento no banho;
- O sistema constituído por plataforma giratória acelera drasticamente a característica do resfriamento, através do ajuste da velocidade do banho e posição da sonda;
- O sistema hélice propulsora com anteparo, figura 25, tem pouco efeito na característica global do resfriamento.

FIGURA 25 - Diagrama esquemático do sistema de agitação hélice propulsora com anteparo. Hilder (1985).

O sistema de agitação por bombas usado por HILDER, figura 26, é constituído por bombas tipo centrífuga com um motor de 1/30 HP e um reostato para controlar a velocidade do escoamento. O tanque de ténpera possui uma capacidade de 2,5 litros. De acordo com a direcção do corpo de prova o escoamento do fluxo poderá ser vertical ou horizontal.

FIGURA 26 - Diagrama esquemático do tanque de têmpera usado em conjunto com a bomba de velocidade variável, mostrando também a entrada do fluxo vertical e horizontal. HILDER(1985).

O sistema constituído por bombas tem sido melhor aceite para ensaios de laboratório. Apesar do problema com limpeza que podem surgir em ensaios com óleos, testes estatísticos revelam que este método é o mais adequado para esse meio.

II.3.3.1.4 - INTERPRETAÇÃO DA CURVA DE RESFRIAMENTO POR INSPEÇÃO

De acordo com TOTTEN et al. (1988), a avaliação da força de resfriamento do meio a partir da curva de resfriamento, era inicialmente realizada pela comparação visual das curvas.

A base da inspeção visual consiste na avaliação de três itens: a) o tempo necessário para completar o primeiro estágio, b) a inclinação da curva no segundo estágio, c) a região de curvatura no terceiro estágio.

A figura 27 apresenta as características do resfriamento de três meios diferentes (água, polímero 1 e polímero 2) representados pelas curvas de resfriamento plotadas no mesmo eixo para efeito de comparação.

FIGURA 27 - Três curvas de resfriamento, TOTTEN et al. (1988).

Através do exemplo da figura 27 observa-se que a água possui o primeiro estágio mais curto, uma elevada inclinação no segundo estágio e uma maior curvatura no terceiro estágio. Conclui-se, com base no método de inspeção, que a ordem da severidade de têmpera desses meios são: Água > Polímero 1 > Polímero 2.

Dessa forma vários meios e condições de resfriamento podem ser comparados e avaliados pela superposição das curvas de resfriamento.

O uso do método de inspeção das curvas de resfriamento em conjunto com outros métodos pode aumentar a confiabilidade do teste.

Assim vários meios com diferentes condições de resfriamento podem ser comparados e avaliados pela superposição de curvas de resfriamento de interesse.

Conforme TOTTEN et al. (1988), a desvantagem desse método é que, curvas de resfriamento de laboratórios diferentes não podem ser comparados, devido às condições nas quais foram realizados.

De fato, o método só permite a comparação entre curvas de resfriamento se estiverem plotadas no mesmo sistema de coordenadas.

II.3.3.1.5 - TEMPERATURAS E TAXAS CRÍTICAS DE RESFRIAMENTOS

Segundo TOTTEN et al. (1988), os métodos descritos até aqui usando uma ou mais curvas de resfriamento para resumir a capacidade de um meio de têmpera em endurecer o aço são geralmente incompletos. Para descrever completamente o desempenho de um meio de têmpera, é importante conhecer o tempo gasto para concluir cada estágio do resfriamento.

O tempo para realizar o segundo estágio é crítico para quantificar a capacidade de endurecimento do meio de têmpera, enquanto que o tempo para completar o terceiro estágio é importante para caracterizar a tendência ao trincamento desse meio de têmpera.

HILDER (1987), usando curvas de resfriamento para caracterizar um meio de têmpera, descreve um procedimento que consiste em determinar a máxima taxa de resfriamento (MR_{max}) e a taxa de resfriamento em 300°C (R_{300}). A taxa máxima do resfriamento ocorrerá no início do segundo estágio e é inversamente proporcional ao tempo necessário para completar este estágio. A taxa de resfriamento em 300°C é significativa e caracteriza o terceiro estágio, pois está geralmente dentro da transformação martensítica para os aços.

HILDER(1987), desenvolveu modelos matemáticos para calcular essas taxas usando polímeros como meio de resfriamento:

$$PAG \Rightarrow MR = 244,7 - 4,3C - 1,7T + 47,2V \quad (4)$$

$$R_{300} = 83 - 1,68C - 0,36T + 14,1V \quad (5)$$

$$\text{PVP} \Rightarrow \text{MR} = 223,7 - 2,94C - 1,9T + 71,9V \quad (6)$$

$$\text{R}_{300} = 96,3 - 1,8C - 1,02T + 37,68V \quad (7)$$

$$\text{Polyacrylate} \Rightarrow \text{MR} = 160,59 - 5,63C - 1,10T + 114,8V \quad (8)$$

$$\text{R}_{300} = 58,6 - 2,5C - 0,57T + 43,4V \quad (9)$$

onde:

MR = Máxima taxa de resfriamento ($^{\circ}\text{C/s}$)

R_{300} = Taxa de resfriamento em 300°C ($^{\circ}\text{C/s}$)

C = Concentração do polímero(% em volume)

T = Temperatura da solução($^{\circ}\text{C}$)

V = Velocidade do fluido(m/s)

De acordo com esse método um bom meio de têmpera possui valores altos para MR_{max} e baixo para R_{300} .

Apesar da determinação de MR_{max} e R_{300} ser considerado um método excelente, ele não descreve o completo processo de têmpera caracterizado pela forma ou tipo da curva de resfriamento.

O tempo gasto para completar o primeiro estágio é um importante parâmetro para caracterizar o meio de têmpera, daí a necessidade de modelos que utilizam mais pontos, podendo caracterizar com mais propriedade o processo de têmpera através de pontos de transição nas curvas de resfriamento.

TENSI & STEFFEN(1985), descrevem um modelo usando as seguintes informações da curva de resfriamento, figura 28.

- Tempo de transição do primeiro para o segundo estágio t_u , temperatura T_u , e a taxa $\dot{T}_{\text{DHmin}}$. Esses parâmetros caracterizam a mudança do estágio de vapor para bolhas.

- A máxima taxa de resfriamento $\dot{T}_{\text{max}}$ e a temperatura onde esta ocorre $T_{\dot{T}_{\text{max}}}$.

- Taxas de resfriamento em 200°C ($\dot{T}_{200}$) e 300°C ($\dot{T}_{300}$).

Cada um desses fatores é importante para descrever o comportamento global de um meio de têmpera usado para endurecer o aço, porque quantifica completamente as características de transformação do primeiro para o segundo estágio, e do segundo para o terceiro estágio nas curvas de resfriamento.

FIGURA 28 - Parâmetros críticos da curva de resfriamento. TENSI & STEFFEN(1985).

II.3.3.1.6 - ÁREA SOB A CURVA TEMPERATURA VS TAXA DE RESFRIAMENTO

THELNING (1986), propõe um método que consiste no cálculo da integral sob a curva temperatura vs taxa de resfriamento, numa faixa de temperatura considerada como crítica, figura 29.

FIGURA 29 -. A área sob a curva de resfriamento. THELNING (1986).

Foi concluído que essa faixa crítica de temperatura, compreende os limites de 600 a 300°C para a maioria dos materiais.

Quanto maior o valor numérico da integral, maior o valor da velocidade média do resfriamento.

Como este método caracteriza o desempenho do resfriamento, se usado em conjunto com outras técnicas como o modelo de TENSI, pode fornecer conclusões significativas.

II.3.3.1.7 - FATOR H - SEVERIDADE DE TÊMPERA DE GROSSMAN

O fator H ou fator de severidade de têmpera de GROSSMAN, tem sido um dos índices mais importantes para caracterizar a severidade de têmpera. O fator-H para vários meios de resfriamento são dados na tabela 1.

TABELA 1 - Número de Grossman para meios de têmpera mais representativos. DAKINS et al.(1989).

MEIOS DE TÊMPERA	FATOR - H (pol ⁻¹)
ÓLEO	0.25 - 0.8
MEIOS SINTÉTICOS	0.20 - 1.2
ÁGUA	0.90 - 2.0
SAL	2.0 - 5.0

De acordo com TOTTEN et al. (1988), o fator H é um dos métodos que mais vem sendo usado, particularmente para caracterizar a severidade de têmpera dos óleos.

TOTTEN et al. (1989), estudando os métodos usados para calcular a severidade de têmpera, concluiu em seu trabalho que o método desenvolvido para se determinar o fator H através do teste de barras, no qual o valor figurava sobre a razão do raio total e o raio não temperado, possuía algumas desvantagens:

- A variação da concentração dos elementos de ligas resultará numa variação no valor do fator H.

- Este é um teste destrutivo, já que as barras não podem ser reutilizadas.

Devido a esses fatores, muitos pesquisadores vem tentando desenvolver métodos alternativos para calcular o fator H.

LISCIC (1988), propõe um método que consiste em se determinar o tempo de resfriamento entre o intervalo de temperaturas que varia de 700 a 300°C.

Para tanto é usado corpos de prova tipo sonda de 12,7 mm de diâmetro, como mostrado na figura 30.

FIGURA 30 - Princípio experimental da avaliação do valor H. LISCIC (1988).

De acordo com LISCIC (1988), o valor do H para um determinado meio de resfriamento pode ser calculado como sendo o inverso do tempo gasto para que a temperatura alcance os limites de temperatura compreendido entre 700 e 300°C, como mostra a expressão matemática (10).

$$H_q = \frac{1}{\Delta T_q} \quad (10)$$

DAKINS et al.(1992), usando corpo de prova tipo sonda, desenvolveu um modelo estatístico que consiste em calcular o valor do fator H através da seguinte expressão.

$$H = (AX^C)\exp(BX^D) \quad (11)$$

onde:

X = Taxa de resfriamento em 705°C (1300° F) e deve ser expresso em °C/seg (°F / seg).

A,B,C,D = São parâmetros do modelo estatístico, e depende do diâmetro do corpo de prova, tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do modelo estatístico usados para calcular o fator H

Diâmetro (pol.)	A	B	C	D
0.5	0.002802	0.1857×10^{-7}	1.201	2.846
1.0	0.002348	0.2564×10^{-9}	1.508	4.448
1.5	0.002309	0.5742×10^{-9}	1.749	5.076
2.0	0.003706	0.3546×10^{-10}	1.847	6.631

Outro modelo estatístico foi também desenvolvido usando corpos de prova tipo sonda para caracterizar polímeros sintéticos através do fator H, segundo a concentração, temperatura e taxa de agitação do banho. Resultando na seguinte expressão.

$$H = 1.954 + 0.006CR_p + 0.02650C - 0.00975T \quad (12)$$

O desvio padrão para esse modelo é $\pm 0,09073$ e as variáveis CR, C e T são dados na tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis do modelo estatístico

Variáveis	Unidades	Baixo	Médio	Alto
Taxa de agitação CR_p	pes / mim	50	75	100
Concentração do polímero C	%	15	20	25
Temperatura do banho T	° F	100	120	140

A figura 31 mostra os valores do fator H calculado através do modelo estatístico, para diferentes temperaturas, concentração e taxa de agitação do polímero.

FIGURA 31 - Fator de temperabilidade de GROSSMAN. TOTTEN et al. (1989).

II.3.3.1.8 - MÉTODO PODER DE TÊMPERA (*HARDENING POWER* - HP)

Segundo BODIN & SEGERBERG (1993), este método descreve a capacidade de endurecimento na têmpera através de um valor único (HP), obtido pela regressão de dados da curva de resfriamento elaborado de acordo com o padrão ISO / DIS 9950 para óleos.

A expressão matemática desenvolvida para calcular o valor de HP para óleos é a seguinte:

$$HP = K_1 + K_2 T_{VP} + K_3 CR - K_4 T_{CP} \quad (13)$$

onde:

T_{VP} = Temperatura de transição entre a fase de vapor e fase de bolhas (°C);

CR = Taxa de resfriamento na faixa de temperatura de 600 a 500°C (°C/S);

T_{CP} = Temperatura de transição entre a fase de bolhas e a fase de convecção (°C);

K_1 , K_2 , K_3 e K_4 = Constantes.

Para um aço carbono comum (aço sem elementos de liga) a expressão seria a seguinte:

$$HP = 91.5 + 1.34T_{VP} + 10.88CR - 3.85T_{CP} \quad (14)$$

A figura 32a mostra os três pontos de interesse na curva da taxa de resfriamento para cálculo do valor de HP. A figura 32b apresenta uma classificação para o desempenho em dureza e valores de HP para um aço carbono comum (SAE 1045) temperado em vários óleos comerciais.

FIGURA 32 - Prognóstico de PODER DE TÊMPERA HP, de óleos: a) determinação dos três pontos na curva, temperatura vs taxa de resfriamento usado para calcular o valor de HP; b) valores de HP calculado para têmpera de óleos. Aplicado apenas para o endurecimento de um aço sem ligas. BODIN & SEGERBERG (1993).

Para aços ligas, o coeficiente será diferente, assim como a classificação dos óleos.

Para têmpera realizada em polímero, foi adotado um procedimento similar. Contudo o resfriamento em polímero apresenta um comportamento diferente. A fase de vapor é quase que inexistente e a transição entre a fase de bolhas e convecção não é tão marcante. A expressão que calcula o valor de HP é a seguinte:

$$HP = K_1 CR_f + K_2 CR_m - K_3 \quad (15)$$

onde:

CR_f = Taxa de resfriamento no cotovelo perlita/ferrita (°C/S);

CR_m = Taxa de resfriamento na temperatura de formação da martensita, M_i (°C/S);

K_1, K_2, K_3 = Constantes.

A figura 33 mostra os dois pontos na curva temperatura vs taxa de resfriamento usados para cálculo de HP e a relação entre dureza e valores do HP.

FIGURA 33 - Prognóstico do poder de têmpera de polímeros: a) definição dos dois pontos na curva temperatura vs taxa de resfriamento usados para cálculos de HP; b) A relação entre medidas de dureza numa amostra de 16 mm de diâmetro x 48 mm de aço de médio carbono SS1672 (SAE 1045) e valores de HP. BODIN & SEGERBERG (1993).

DECK² et al apud BODIN & SEGERBERG (1993) desenvolveram expressões similares para cálculo de HP usando o padrão ISO e o padrão francês para a sonda e o aço 38C2 com 16 mm de diâmetro e 48 mm de comprimento como amostra para medidas de dureza. Para sonda de padrão ISO a expressão é a seguinte:

$$HP(HRC) = 99.6 - 0.17O_2 + 0.19V_{400} \quad (16)$$

onde:

O_2 = Temperatura de transição entre a fase de bolhas e a fase de convecção (°C);

V_{400} = Taxa de resfriamento em 400°C (°C/S).

² DECK M., DAMAY P. and LE STRAT F. Castrol index: une method de classification des huiles de trempe. ATTT 90 Internationaux de France du Traitement Thermique (Conference proceedings, Le Mans, 19/21 Sept 1990). PIC Edition, Paris, France, 49-70

Para o padrão francês ou seja amostra de prata, as leis empíricas descritas, não poderiam ser aplicadas com exatidão suficiente. Baseando no raciocínio termocinético, a fórmula (17) foi desenvolvida na qual independe do material e tamanho da sonda:

$$HP (HRC) = 3.1Ci - 5.7 \quad (17)$$

onde:

$$Ci = K'V_{\max} / (O_{\max} - O_t)$$

e:

$$K' = 11.5 \{ (O_{\max} - O_t) / V_{\max} \}$$

onde:

$V_{\max}$ = A máxima taxa de resfriamento ($^{\circ}\text{C}/\text{S}$);

$O_{\max}$ = A temperatura na qual a máxima taxa ocorre ($^{\circ}\text{C}$);

O_t = Temperatura do meio ($^{\circ}\text{C}$).

A figura 34 mostra a relação entre valores de HP calculado e medidas de dureza na amostra de aço.

FIGURA 34 - Relação entre medidas de dureza na amostra de 16 mm de diâmetro x 48 mm do aço 38C2 e valores de HP (HRC) calculado do teste com: a) sonda de INCONEL; b) sonda de prata. BODIN & SEGERBERG(1993).

II.3.3.1.9 - FATOR DE TÊMPERA Q

De acordo com BATES et al. (1993) o fator de têmpera Q, é um valor único que relaciona a taxa de resfriamento a espessura da secção e a taxa de transformação da liga que pode ser representada pela curva TTP (tempo, temperatura, propriedade).

O conceito básico por trás do fator de têmpera, é que o endurecimento do aço durante o resfriamento pode ser prognosticado segmentando uma curva de resfriamento (tempo vs temperatura) em incrementos discretos e determinando a razão da quantidade de tempo na temperatura média dividido pela quantidade do tempo requerido para obter uma quantidade específica de transformação naquela temperatura.

A soma dos valores incrementais numa determinada faixa de temperatura será o fator de têmpera Q.

O valor crítico do fator de têmpera Q é o máximo valor que resultará no valor de dureza desejado, e pode ser definido em termos do teor de martensita desejado (99, 95, 90%).

O cálculo do fator Q é realizado com os dados da curva de resfriamento e a equação de EVANCHO & STALEY³ apud BATES(1987), que descreve a cinética de transformação da liga de interesse (função C_T), representando a curva TTP quando definida a quantidade específica de transformação.

A função C_T pode ser representada matematicamente pela expressão:

$$C_T = -K_1 K_2 \exp \left[\frac{K_3 K_4^2}{RT(K_4 - T)^2} \right] \exp \left[\frac{K_5}{RT} \right] \quad (18)$$

³ J.W. EVANCHO and J.T. STANLEY: "Kinetics of Precipitation in Aluminium Alloys During Continuous Cooling", Metallurgical Transactions, 1974, 5, January 43-47.

onde:

C_T = Tempo crítico requerido para formar uma quantidade constante de uma nova fase;

K_1 = Constante;

K_2 = Constante;

K_3 = Constante;

K_4 = Constante;

K_5 = Constante;

$R = 8,3143 \text{ J / (K mol)}$;

T = temperatura, k.

Um fator de têmpera incremental para cada tempo do passo na curva de resfriamento é calculado usando a equação (19).

$$q = \frac{\Delta t}{C_T} \quad (19)$$

onde:

q = Fator incremental de têmpera;

Δt = Tempo do passo usado na curva de resfriamento;

C_T = Definido pela equação (18).

O fator de têmpera Q , é definido como sendo a somatória dos incrementos em um intervalo de temperatura. Segundo BATES(1987) e TOTTEN et al. (1988), para ligas de alumínio, essa faixa de temperatura, normalmente varia de 425 a 150°C.

De acordo com BATES & TOTTEN(1992), para os aços essa faixa varia da temperatura A_3 à temperatura M_s .

O cálculo do fator Q para os aços, poder ser realizado através da expressão:

$$Q = \sum q = \sum_{T=A_3}^{T=M_i} \frac{\Delta t}{C_T} \quad (20)$$

A figura 35 ilustra um esquema para o cálculo do fator Q usado em liga de alumínio.

FIGURA 35 - Ilustração esquemática do método para calcular o fator de tmpera Q. BATES (1987).

Segundo BATES et al. (1992), o fator de tmpera Q reflete as caractersticas de extrao de calor do banho, efeito da espessura da seo na taxa de resfriamento e a taxa de transformao da liga como funo da temperatura.

O fator de têmpera pode ser usado para prognosticar a dureza nos aços temperados, usando a seguinte expressão:

$$HP_{HRC} = H_{\min} + (H_{\max} - H_{\min}) \exp(K_1 Q) \quad (21)$$

onde:

HP_{HRC} = Dureza prognosticada;

$H_{\min}$ = Dureza mínima para a liga;

$H_{\max}$ = Dureza máxima para a liga;

$K_1 = \ln 0,995 = -0,00501$;

Q = fator de têmpera.

A figura 36 apresenta uma correlação entre o fator de têmpera, dureza medida e prognosticada.

FIGURA 36 - Correlação entre dureza calculada e medida em 18 locais numa peça temperada. BATES et al. (1992).

II.3.3.1.10 - MÉTODO DE TAMURA

Estudando o comportamento da têmpera em óleos, TAMURA (1984), desenvolveu um critério para avaliar o endurecimento da têmpera levando em conta as características de resfriamento do meio e o material.

Os ensaios foram feitos usando uma sonda de prata de formato cilíndrico com 10mm de diâmetro de acordo com o padrão JIS K 2242 1991, figura 24.

Segundo TAMURA (1984), os resultados obtidos com a prata apresentaram uma reprodutibilidade melhor do que com aços, devido o fato da prata apresentar uma difusibilidade térmica maior do que os aços, e também a dificuldade de medir o resfriamento na superfície dos aços pelo efeito da oxidação.

IMAO TAMURA, concluiu também que a capacidade de resfriamento dos óleos é controlada pela temperatura característica (T_c) e temperatura de início do estágio de convecção (T_d). A figura 37 mostra o método adotado para determinar a temperatura de início do estágio de convecção.

FIGURA 37 - Ilustração esquemática mostrando o método para encontrar a temperatura de início do estágio de convecção. TAMURA (1984).

Para facilitar a aplicação desse método, IMAO TAMURA reduziu os diagramas CCT em quatro grupos, classificando os aços em tipos.

A figura 38 mostra os quatro tipos de diagrama CCT: a) tipo ferrita, perlita e bainita tal como AISI 1045, b) tipo perlita tal como AISI 1085 (SK5) aço eutetóide, c) tipo perlita e bainita, tal como AISI 52100, e d) tipo bainita tal como AISI 4135 e 8620. Na figura 38, X indica a faixa de temperatura que requer resfriamento rápido.

FIGURA 38 - Ilustração esquemática da relação entre o diagrama CCT e a faixa de temperatura onde se requer resfriamento rápido. TAMURA (1984).

A tabela 4 mostra exemplos de cada tipo de diagrama CCT. Como uma aproximação, podem ser usadas essas faixas de temperatura como faixa representativas para cada tipo de diagrama CCT.

Tabela 4. Faixa de temperatura que requer resfriamento rápido.

Aço	Faixa de temperatura de resfriamento rápido	Faixa de temperatura	Tipo de diagrama CCT
S 45 C	650°C ~ 300°C	350°C	F. P. B
SK 5	620°C ~ 480°C	140°C	P
SUJ 2	650°C ~ 340°C	310°C	P.B
SCM 435	580°C ~ 310°C	270°C	B

T_s : Temperatura de início de transformação

T_f : Temperatura final de transformação

O método consiste em medir as temperaturas T_c e T_d na superfície de uma amostra de prata e converter esse valor para aço usando a relação da figura 39 e 40. Isto porque o valor dessas temperaturas varia da prata para o aço.

FIGURA 39 - Relação entre as temperaturas características na superfície de uma amostra de prata e uma de aço. TAMURA (1984).

FIGURA 40 - Relação entre as temperaturas de início do estágio de convecção na superfície de uma amostra de prata e uma de aço. TAMURA (1984).

A faixa de temperatura que requer resfriamento rápido, $X = (T_s - T_f)$, é tomado do diagrama CCT do aço a ser temperado. Se o diagrama CCT não é conhecido, pode-se estimar a faixa X , pela classe na qual o aço pertence na classificação dos aços como descrito anteriormente, figura 38 e tabela 4.

Quando comparado T_c e T_d com X , faixa de temperatura que requer resfriamento rápido, existirão quatro casos diferentes e o valor V pode então

ser determinado usando a curva de resfriamento e o diagrama CCT como mostra a figura 41.

$T_s \geq T_c$	$T_d \geq T_f$		$V = \frac{T_c - T_d}{X}$
$T_s \geq T_c$	$T_d \leq T_f$		$V = \frac{T_c - T_f}{X}$
$T_s \leq T_c$	$T_d \geq T_f$		$V = \frac{T_s - T_d}{X}$
$T_s \leq T_c$	$T_d \leq T_f$		$V = \frac{T_s - T_f}{X}$

FIGURA 41 - Relação entre duas faixas de temperaturas. Uma é o estágio de bolhas no processo de resfriamento do óleo e a outra é a faixa de transformação do aço que requer resfriamento rápido. Cálculo do valor V. TAMURA (1984).

A figura 42 apresenta uma relação entre a dureza da superfície e o valor V para aços temperados em óleos.

FIGURA 42 - Relação entre as dureza das amostras e o valor V dos óleos. TAMURA (1984).

Segundo TOTTEN et al. (1988), o valor V usado para caracterizar meio de resfriamento foi originalmente desenvolvido para óleos onde a taxa de resfriamento em T_c e T_d são semelhantes. Já os meios sintéticos apresentam diferentes taxas de resfriamento nestas duas temperaturas. Assim este método não pode ser aplicado para quantificação de curva de resfriamento derivada de meios sintéticos.

II.3.3.1.11 - MÉTODO DO GRADIENTE TÉRMICO

LISCIC (1978) estudando características de resfriamento concluiu que o fluxo de calor na superfície de um corpo é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura na superfície multiplicado pela condutividade térmica do material do corpo, podendo ser expresso pela equação (22):

$$\Phi = \lambda \frac{\partial T}{\partial N} \quad (22)$$

onde:

ϕ = Quantidade de calor que passa perpendicularmente à superfície em uma unidade de tempo, $[W/m^2]$;

λ = Condutividade térmica do material, $[W/Km]$;

$\frac{\partial T}{\partial N}$ = Gradiente de temperatura através da superfície do corpo, perpendicular a superfície, $[K/m]$.

Com base neste conceito físico, LISCIC (1988), desenvolveu um método para medir, registrar e avaliar a intensidade de resfriamento na prática, levando em conta as diferentes espécies de banhos, condições e técnicas de resfriamento.

Usando uma sonda feita de aço AISI 304 contendo 3 termopares para registrar as temperaturas como mostra a figura 43, define-se T_n (temperatura na superfície), T_i (1,5mm abaixo da superfície) e T_c (centro).

FIGURA 43 - Sonda LISCIC - NANMAC: LISCIC (1988).

O sistema desenvolvido permite que cada termopar registra cerca de 2050 dados durante o processo total de resfriamento, levando em conta a mudança da condutividade térmica com a temperatura, figura 44.

FIGURA 44 - Curva de resfriamento registrada para a superfície da sonda (T_n), para o ponto 1.5 abaixo da superfície (T_i) e para o centro (T_c) da secção transversal do corpo de prova. LISCIC (1988).

Através das temperaturas relevantes (T_n) e (T_i), calcula-se o gradiente de temperatura na superfície e o fluxo de calor, figura 45.

FIGURA 45 - Curva relevante do fluxo de calor x tempo. LISCIC (1988).

Também, como ferramenta de análise é construída a curva do fluxo de calor em função da temperatura da superfície, figura 46.

FIGURA 46 - Curva relevante do fluxo de calor vs temperatura da superfície. LISCIC (1988).

Assim, a intensidade de resfriamento (I) pode ser definida e expressa por quatro valores característicos:

- Máximo fluxo de calor: $q_{máx}$. [Mw/m²];
- Tempo quando $q_{máx}$ ocorre: $t_{qmáx}$ [s];
- Integral abaixo da curva de fluxo de calor no momento da imersão até 100 segundos: T_{100} .

$$\int_{t_0}^{t_{100}} q \, dt \quad [MJ/m^2] \text{ (representa o calor extraído);}$$

- Tempo da imersão até a temperatura do centro (T_c) cair para 300°C (representando a extração de calor do centro).

A intensidade de resfriamento I é alta se os valores de q_{max} e

$$\int_{t_0}^{t_{100}} q \, dt \text{ forem altos e os tempos } T_{qmax} \text{ e } t_{TC=300} \text{ forem pequenos. "Definido desta}$$

maneira complexa, a intensidade de resfriamento (I) será sempre

proporcional à profundidade de endurecimento obtida no resfriamento”(LISCIC 1988,p.164).

Um fato importante observado por LISCIC (1988) para controlar a qualidade do processo é que se pode avaliar as condições de resfriamento segundo tensões térmicas.

A figura 47 apresenta a curva da diferença da temperatura da superfície (T_n) e do (T_c) vs tempo.

FIGURA 47 - Diferença de temperatura entre a superfície e o centro do corpo de prova vs tempo. Liscic(1988).

Como $\Delta T = T_n - T_c$ é diretamente proporcional às tensões térmicas durante o processo de resfriamento, os valores de ΔT_{max} e $\Delta t = T_{N2} - T_{N1}$ caracterizam as condições de resfriamento.

- Como pôde ser visto, existem inúmeros métodos que separadamente ou em associações podem revelar características de resfriamento de um dado meio de resfriamento.
- No presente trabalho optou-se por estudar as condições de resfriamento do banho de sal, através dos seguintes métodos: Perfil de dureza, Índice de endurecimento, Análise metalográfica(quantitativa), Curvas de resfriamento(taxa máxima).

III – MATERIAIS E MÉTODOS

A parte pratica do trabalho, envolveu o levantamento das curvas de resfriamento de soluções salinas para diversas concentrações de sais (de 9 a 15%) e diferentes temperaturas do banho (25 a 50 °C).

Alem disso, para cada condição do banho, uma amostra de aço tipo SAE 1045 foi temperada na qual foram feitas medidas de dureza ao longo do diâmetro e verificação da microestrutura resultante e também o cálculo do fator de endurecimento para cada caso em estudo.

III.1 - Corpo de prova

Para o levantamento do perfil de dureza foram confeccionados corpos de prova de formato cilíndricos com 25,4 mm de diâmetro por 101,6 mm de comprimento como mostrado na figura 48, para serem submetidos à têmpera em solução salina. Os aços utilizados foram: o SAE 1045, para a têmpera nas soluções de sal e, o SAE1040 usado na têmpera com sal e com óleo mineral para confirmar a severidade da têmpera do sal, as composições químicas são dadas na tabela 5.

FIGURA 48 – Corpo de prova de aço SAE1045 com 25,4mm x 101,6mm.

TABELA 5 – Composição química do aço SAE 1045 e do SAE 1040

Elementos	C	Mn	P	S	Si	Fe
% em peso	0,48	0,86	0,018	0,017	0,28	bal
% em peso	0,43	0,85	0,016	0,019	0,19	bal

III.2 – Soluções de sal

O sal utilizado foi o AWS – 20, um composto químico de nitrito e nitrato de sódio produzido pela BRASIMET COMÉRCIO E INDÚSTRIA S/A.

As concentrações dos banhos utilizadas para os ensaios foram: 9, 11, 13 e 15% (porcentagens em peso). Para cada concentração de sal variou-se 5°C na temperatura, numa faixa compreendida entre 25 a 50°C, totalizando 24 condições de ensaio.

Para facilitar a análise, cada solução de sal foi numerada de acordo com sua concentração e temperatura, como mostrado na tabela 6.

TABELA 6 - Relação entre o número da solução de sal com a concentração e temperatura.

	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C
9%	S925	S930	S935	S940	S945	S950
11%	S1125	S 1130	S1135	S1140	S1145	S1150
13%	S1325	S1330	S1335	S1340	S1345	S1350
15%	S1525	S1530	S1535	S1540	S1545	S1550

Essas soluções foram utilizadas para o tratamento térmico de têmpera e para as curvas de resfriamento.

III.3 – Tratamentos térmicos

Os corpos de prova do aço SAE 1045 (figura48) foram austenitizados à temperatura de 900°C (por uma hora), seguido de um resfriamento nas diversas soluções de sais da tabela 6.

Para cada condição do banho foram feita três amostras, gerando no total 72 corpos de prova.

III.4 – Perfil de dureza

Para a obtenção da distribuição de dureza da seção transversal dos corpos de prova cilíndricos (figura 48), utilizou-se uma máquina de dureza Vickers com carga de 10kg.

As medidas de dureza foram feitas ao longo do diâmetro da seção transversal desses corpos de prova, retirados da sua porção central, como mostrado na figura 49. Isto foi feito para eliminar os efeitos do resfriamento das extremidades.

FIGURA 49 – Esquema da amostra retirada do corpo de prova temperado para análise de dureza e metalográficas.

Os pontos escolhidos no diâmetro foram: superfície, $\frac{3}{4}$ do raio, $\frac{1}{2}$ raio, centro, $\frac{1}{2}$ raio, $\frac{3}{4}$ do raio e superfície. Os resultados obtidos para cada ponto representam a média de 6 medidas realizadas.

III.5 - Índice de endurecimento (R_h)

Através das expressões $R_h = \frac{100 \cdot HRC_q}{HRC_{max}}$ e $HRC_{max} = 20 + 60\sqrt{\%C}$ e,

das medidas de dureza realizadas no centro das amostras e com a concentração de carbono igual a 0,48%, calculou-se os índices de endurecimento para cada amostra do aço SAE 1045 temperada nas soluções de sal da tabela 6.

III.6 – Análise Metalográfica

A análise metalográfica foi realizada para verificação da presença da fase martensítica em diversos pontos ao longo do diâmetro das amostras do aço SAE 1045 temperadas nas soluções de sal em estudo, bem como a sua relação com a concentração e temperatura da solução. As amostras embutidas foram submetidas aos processos convencionais de polimento e atacadas com o reagente nital a 2%.

O sistema utilizado para as análises de imagem é constituído basicamente de um microscópio óptico LEICA, modelo LEITZ-DMRX, com acoplamento simultâneo de câmara fotográfica automática WILD MPS 28 e sistemas de polarização e filtros de luz, conforme representado pela Figura 50.

Para cada amostra, foram observadas a distribuição e a percentagem das fases presentes, utilizando-se os recursos de análise quantitativa de imagem. Para isso as imagens foram digitalizadas e tratadas, sofrendo modificação na intensidade de brilho e de contraste. Isto resultou na otimização da definição de algumas características microestruturais da imagem, possibilitando a remoção de possíveis ruídos, melhor contraste e brilho e maior definição dos contornos dos objetos, sendo este tratamento realizado pelo programa aplicativo de análise de imagem "MOCHA".

FIGURA 50- Representação esquemática do sistema modular de análise de imagem.

- (1)- Impressora de vídeo
- (2)- Fotômetro
- (3)- Câmera CCD/RGB
- (4)- Câmera fotográfica
- (5)- Microscópio óptico
- (6)- Monitor de vídeo
- (7)- Placa digitalizadora
- (8)- Impressora
- (9)- Microcomputador 486 DX4

III.7 - Curvas de resfriamento

Para a obtenção das curvas de resfriamento para cada solução de sal da tabela 6, foram feitos segundo a norma ISO 9950, adaptada para sais, com sonda de INCONEL 600 de forma cilíndrica com 12,7 mm de diâmetro por 60 mm de comprimento.

Os ensaios foram feitos com a sonda aquecida até a temperatura de 850°C e imediatamente resfriada em dois litros da solução de sal a ser analisada, sem agitação. Para cada condição de ensaio foram realizadas no mínimo 3 curvas.

O equipamento utilizado para obtenção das curvas de resfriamento foi desenvolvido pela indústria FAC em colaboração com o Departamento de Eng. de Materiais da EESC-USP. É de grande sensibilidade, podendo registrar pequenas variações da temperatura, o que lhe confere grande precisão nos resultados das análises.

O equipamento, figura 51, é constituído de um forno para o aquecimento da sonda. A sonda tem no seu centro geométrico o termopar tipo K (cromel – alumel) com isolamento mineral, usado como sensor de temperatura. Uma placa A/D faz a interface com o computador na aquisição de dados. Existe ainda um software específico que faz o tratamento desses dados obtidos pela sonda, fornecendo como saída a curva temperatura em função do tempo e a curva temperatura em função da taxa de resfriamento.

O sistema possui alguns recursos como: monitoração das temperaturas (sonda, meio refrigerante, forno e ambiente), controle do tempo de ensaio, ajuste do fator K que é responsável pela calibração da sonda, possibilitando a reprodutibilidade das medidas, obtendo com isso uma maior confiabilidade dos resultados. A figura 52 ilustra a tela que faz a monitoração das temperaturas do ensaio.

FIGURA 51 – Esquema do equipamento usado para obtenção das curvas, temperatura vs. tempo e temperatura vs. taxa de resfriamento.

FIGURA 52 - Tela que faz a monitoração das temperaturas no equipamento

O fluxograma da figura 53 ilustra de forma esquemática o procedimento experimental utilizado.

FIGURA 53 - Fluxograma para ilustração do procedimento experimental

IV - RESULTADOS

IV.1 – Perfil de dureza

O perfil de dureza, medido na seção transversal das amostras do aço SAE 1045, fornece a distribuição da dureza ao longo do diâmetro como resposta ao tratamento térmico de têmpera em banho de sais.

Os resultados obtidos foram relacionados em gráficos de dureza HV em função do diâmetro.

Como esperado a distribuição de dureza para as amostras do aço SAE 1045, obtidas após tratamentos térmicos apresentaram os maiores valores próximos a superfície e os menores valores no centro

As figuras de 54 a 59 referem-se as curvas de dureza para as concentrações em estudo (9, 11, 13 e 15%) mantendo-se a temperatura constante em cada caso.

- Para as soluções de sal a 25°C as durezas medidas apresentaram valores muito próximos sendo que na superfície variou de 826 a 840 HV enquanto que no centro de 329 a 368 HV, como mostrado no gráfico de distribuição da dureza da figura 54. Observa-se também que a solução de 13% apresentou valores ligeiramente maiores que as outras concentrações.

FIGURA 54- Curvas de distribuição da dureza para amostras de aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S925, S1125, S1325 e S1525.

- Para as soluções de sal a 30 °C os valores da dureza também apresentaram poucas variações, na superfície variaram de 772 a 813 HV e no centro de 345 a 359 HV, como pode ser observado na figura 55.

FIGURA 55 – Curvas de distribuição da dureza para amostras de aço SAE 1045 com 1 pol. (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S930, S1130, S1330 e S1530.

- Para as soluções de sal a 35 °C as medidas de dureza apresentaram valores muito próximos, de 790 a 830 HV para a superfície e, 328 a 346 HV para o centro, como mostra a figura 56.

FIGURA 56 – Curva de distribuição de dureza para as amostras de aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S935, S1135, S1335 e S1535.

- Para as soluções de sal a 40 °C os valores para as durezas medidas não apresentaram variações no centro mas uma pequena diferença em torno de 3/4 de raio e 1/2 raio, a figura 57 mostra o gráfico de distribuição da dureza onde pode ser observado também o desempenho da solução de 13%.

FIGURA 57 – Curvas de distribuição da dureza para amostra do aço SAE 1045 com 1 pol. (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S940, S1140, S1340 e S1540.

- Para as soluções de sal a 45°C os valores de dureza divergiram muito pouco no centro e na superfície sendo verificado que o desempenho das

soluções de sal a 13% tiveram resultados um pouco melhores que as outras concentrações, como pode ser observado na figura 58.

FIGURA 58 – Curvas de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S945, S1145, S1345 e S1545.

- Para as soluções de sal a 50°C as medidas de dureza apresentaram variações de 764 a 798 HV na superfície e coincidindo no centro como pode ser observado na figura 59.

FIGURA 59 – Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S950, S1150, S1350 e S1550.

Para que se possa melhor observar os efeitos da temperatura, os dados foram reagrupados em curvas de distribuição da dureza mantendo-se constante a concentração e variando-se a temperatura, gerando as figuras 60 a 63.

- Para as soluções de sal a 9% os valores de dureza medido no centro não apresentaram diferença enquanto que na superfície houve um melhor desempenho para a temperatura de 25°C, como pode ser visto na figura 60 onde é mostrado também valores variando de 782 a 826 HV para a superfície.

FIGURA 60 – Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S925, S930, S935, S940, S945 e S950.

• Para as soluções de sal a 11%, também houve pouca variações para as medidas de dureza no centro enquanto que na superfície os valores variaram de 770 a 840 HV, com o mínimo obtido na temperatura de 50°C e o máximo na temperatura de 25°C. A figura 61 mostra o gráfico de distribuição da dureza.

FIGURA 61 – Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S1125, S1130, S1135, S1140, S1145 e S1150.

- Para as soluções de sal a 13%, similar às condições anteriores, também houve pouca variação para as medidas de dureza no centro enquanto que na superfície os valores foram mais dispersivos, de 798 a 860 HV, com o mínimo obtido na temperatura de 50°C e o máximo na temperatura de 25°C. A figura 62 mostra o gráfico de distribuição da dureza.

FIGURA 62 – Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4 mm) de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S1325, S1330, S1335, S1340, S1345 e S1350.

• Para as soluções de sal a 15%, não houve alterações das medidas de dureza para o centro enquanto que na superfície os valores variaram de 764 HV em 50° C e 847 HV para 25 °C, figura 63

FIGURA 63 – Curva de distribuição da dureza para amostras do aço SAE 1045 com 1 pol (25,4) mm de diâmetro temperadas nas soluções de sais: S1525, S1530, S1535, S1540, S1545 e S1550.

IV.2 - Índice de endurecimento

A figura 64 apresenta o diagrama onde estão relacionados os valores calculados dos índices de endurecimento, concentrações e temperaturas, para cada condição de ensaio.

FIGURA 64 - Diagrama de inter-relação do índice de endurecimento, concentração e temperatura.

Com estes índices é possível verificar variações mais significativas para a temperatura de 25°C, atingindo um mínimo de 53,92 e um máximo de 60,9. A menor alteração acontece para a temperatura de 50°C com valores de 53,87 e 55,71.

IV.3- Análise metalográfica

Para avaliar a microestrutura resultante nos corpos de prova de aço SAE 1045 temperados nas soluções de sal, foram realizados exames metalográficos na seção transversal das amostras, o que possibilitou a comparação quantitativa de martensita formada numa determinada

profundidade da amostra em relação a superfície temperada, para cada condição de ensaio. Com isso foi possível de ser feita a comparação da severidade de têmpera das soluções de sal em relação ao óleo padrão.

As figuras 65 e 66 ilustram a microestrutura resultante no centro das amostras temperadas a 35°C para as concentrações de 9 e 13% da sal, onde pode ser observado a presença de fase martensítica representada nas regiões claras e perlita nas regiões escuras. A situação da figura 65 proporcionou o aparecimento de 29% de martensita, enquanto que na figura 66 a análise quantitativa indicou 37%.

FIGURA 65 – Microestrutura do aço SAE 1045 temperado na solução de sal S935. Região central. Áreas de martensitas (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. Aumento de 280x.

FIGURA 66 - Microestrutura do aço SAE 1045 temperado na solução S1335. Região central. Áreas de martensita (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. Aumento 280x.

As figuras 67 e 68 ilustram a microestrutura resultante na região de meio raio para as amostras temperadas na solução de 13% nas temperaturas de 25 e 50°C, onde pode ser observado a presença de martensita nas regiões claras, atingindo 78% de martensita para a temperatura de 25°C e 65% de martensita para a temperatura de 50°C.

a)

b)

FIGURA 67 - Microestrutura do aço SAE 1045 temperado na solução de sal S1325. Região de $\frac{1}{2}$ raio. Áreas de martensita (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. a) Aumento de 280x. b) Aumento de 700x.

a)

b)

FIGURA 68 - Microestrutura do aço SAE 1045 temperado na solução de sal S1350. Região de $\frac{1}{2}$ raio. Áreas de martensitas (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. a) Aumento 280x. b) Aumento de 700x

As figuras de 69 a 72 ilustram microestruturas do centro e em 6 mm da superfície de um aço SAE 1040 temperado numa solução de 13% de sal a 25°C e com o óleo padrão usado para calibração da sonda a 25°C. Como já esperado, o centro apresentou menor quantidade de martensita, com 29% de martensita para a figura 69. No caso da figura 70, o óleo padrão não proporcionou nenhuma transformação martensítica no centro, ilustrando a maior severidade das soluções salinas.

i) Centro das amostras temperadas

FIGURA 69 – Microestrutura da região central aço SAE 1040 temperado na solução de sal S1325. Áreas de martensitas (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%.Aumento 200x.

FIGURA 70 – Microestrutura da região central do aço SAE 1040 temperado no óleo padrão a 25°C. Áreas de ferrita (regiões claras nos contornos de grão) e perlita. Ataque nital 2%.Aumento 200x.

Regiões mais próximas à superfície como esperado apresentaram maiores quantidades de martensita. No caso da figura 71a, há a presença de 78% de martensita.

ii) Região de 6 mm abaixo da superfície das amostras temperada

FIGURA 71 - Microestrutura da região de 6 mm da superfície aço SAE 1040 temperado na solução de sal S1325. Áreas de martensitas (regiões claras) e perlita. Ataque nital 2%. a) Aumento 200x. b) Aumento de 500x.

Para a têmpera em óleos, nem mesmo em regiões próximas à superfície apresentaram transformações martensíticas, figuras 72 a e b.

FIGURA 72 - Microestrutura da região de 6 mm da superfície do aço SAE 1040 temperado no óleo padrão a 25°C. Áreas de ferrita (regiões claras nos contornos de grão) e perlita. Ataque nital 2%. a) Aumento 200x. b) Aumento de 500x.

IV.4 - Curvas de resfriamento

Os resultados dos ensaios para as soluções de sal são apresentados sob a forma de curvas de temperatura em função do tempo e também temperatura vs taxa de resfriamento, anexo. Serão apresentadas aqui somente as curvas de calibração realizadas com óleo padrão e as curvas realizadas com a solução de sal de concentração 13% na temperatura de 25°C.

Após a calibração do equipamento com um meio de resfriamento padrão, ou seja um meio de resfriamento cuja taxa máxima é conhecida, foi definido o fator K da sonda para uma bateria de dez ensaios. Após essa bateria de ensaios se fez necessária uma nova calibração, permitindo assim que a sonda apresente resultados reprodutíveis. A correção da constante da sonda (K) é feita de tal maneira que o óleo mineral padrão apresente 60°C/Seg de taxa máxima estando a 60°C.

A figura 73 apresenta uma curva de calibração para sonda realizada com um óleo padrão cuja máxima taxa de resfriamento é de 60°C/Seg.

A figura 74 apresenta as curvas de resfriamento para a solução de sal com concentração de 13% na temperatura de 25°C, onde é possível observar o curto tempo de duração do primeiro estágio, que é uma característica de resfriamento das soluções salinas, característica essa que permite altas taxas de resfriamento para este tipo de solução, mesmo sem agitação.

A tabela 7 relaciona a máxima taxa de resfriamento para as concentrações em estudo nas temperaturas de 25, 35 e 50°C, que são suficientes para descrever o efeito da temperatura no processo de resfriamento da têmpera.

a)

b)

Figura 73 - Curvas de resfriamento para calibrar a sonda a) tempo vs temperatura, b) Curva temperatura vs taxa de resfriamento para um óleo padrão.

a)

b)

FIGURA 74 - Curvas de resfriamento a) temperatura em função do tempo b) Curva temperatura vs taxa de resfriamento, para a solução S1325.

TABELA 7 - Relação entre máxima taxa de resfriamento, temperatura e concentração.

	25°C	35°C	50°C
9%	220	212	204
11%	223	217	212
13%	252	237	226
15%	229	226	212

FIGURA 75 - Diagrama de inter-relação da taxa de resfriamento, concentração e temperatura.

Através da tabela 7 e da figura 75, construídas a partir das curvas de resfriamento, em anexo, pode-se observar que os valores para taxa máxima aumentam quando a concentração se aproxima de 13% e diminui com o aumento da temperatura, o que confirma também as afirmações de BOYER(1988).

V - DISCUSSÕES

V.1 - Perfil de dureza

Como mostrado no capítulo de resultados os perfis de dureza estão agrupados em dois grupos de acordo com as condições de ensaio: temperatura constante e concentração constante.

a) Temperatura constante

Como mostrado nas figuras 54 a 59, a dureza obtidas com os tratamentos térmicos nas soluções de sais com concentrações 9, 11, 13, e 15% apresentaram valores muito próximos com poucas variações para a faixa de 9 a 15%, confirmando os achados de BOYER (1988).

A concentração de 13% apresentou valores de dureza ligeiramente melhores que as encontradas com outras concentrações em estudo, principalmente em temperaturas, de 25°C.

b) Concentração constante

Como observado nas figuras 60 a 63 as curvas de distribuição de dureza, estão plotadas de tal forma que permitem a análise da influência da temperatura no desempenho das soluções de sal como meio refrigerante nos tratamentos térmicos de têmpera. Assim o que pôde ser observado apesar do exame de dureza não fornecer informações muito claras do efeito da temperatura foi que:

- Pequenas variações de temperatura, dentro da faixa estudada, não causam influência significativa nos tratamentos térmicos, confirmando os achados de BOYER (1988).

- As temperaturas abaixo de 40°C apresentaram melhores valores de dureza, com ligeira vantagem para a temperatura de 25°C onde foram

obtidos os melhores valores de dureza para todas as concentrações em estudo.

V.2 - Índice de endurecimento

Como mostrado na figura 64, o índice de endurecimento que mede a porcentagem temperada da amostra numa determinada região, permitiu relacionar as variáveis temperatura e concentração com a dureza medida no centro das amostras, para cada condição de ensaio. Assim foi possível observar que:

-Para a faixa de trabalho analisada, o índice de endurecimento apresentou uma variação muito pequena, em torno de 7%, que foi a diferença entre o valor mínimo obtido com a solução S945 com um índice de endurecimento de 53,8% e o máximo com a solução S1325 com um índice de endurecimento de 60,9%

-Os maiores valores para os índices de endurecimento foram obtidos com concentrações de 13% nas temperaturas mais baixas, quanto mais próximas de 25°C maiores os índices.

-A concentração de 9% apresentou excelentes resultados, mostrando-se que para algumas temperaturas como 30, 35 e 40°C, foi igual ou melhor que as concentrações 11 e 15%.

-Para concentrações de 15% onde os valores para o índice de endurecimento girou em torno do valor mínimo, o seu melhor resultado se deu na temperatura de 40°C.

V.3 - Análise metalográfica

Através das análises dos microconstituintes presentes nas amostras temperadas foi possível quantificar a fase martensítica presente em determinadas regiões.

Como observado nas figuras 65 e 66, que ilustram uma microestrutura constituída de martensita e perlita na região central das amostras temperadas, a concentração de 13% apresentou uma quantidade de martensita maior que para a concentração de 9%, ambas temperadas em 35°C.

Já as figuras 67 e 68 que ilustram as microestruturas da região de meio raio para as amostras temperadas na concentração de 13% nas temperaturas de 25 e 50°C, é possível observar o melhor desempenho para as temperaturas mais baixas, proporcionando uma maior quantidade da fase martensítica.

As figuras de 69 a 72 ilustram as microestruturas resultantes de tratamentos térmicos de têmpera realizado com o óleo padrão e na solução de sal S1325 com o aço SAE 1040 que é um aço de menor temperabilidade que o SAE 1045 podendo ser observado de forma mais clara o efeito de um meio com maior severidade de têmpera, com isso nota-se que:

-O aço 1040 resfriado na solução de sal produziu uma grande quantidade de martensita na região central da amostra em torno de 29 %, como mostrado na figura 69, enquanto que o mesmo material resfriado em óleo não apresentou a fase martensítica na região central e sim uma microestrutura formada por perlita e ferrita nos contornos de grão. A fase mais clara no interior dos grãos também é perlita, diferenciando apenas na orientação cristalográfica, como pode ser observado na figura 70.

-Com isso foi possível ressaltar, através quantificação da fase martensítica, a alta severidade de tempera das soluções de sal ocasionado pelas altas taxas de resfriamento.

V.4 - Curvas de resfriamento

As curvas de resfriamento permitiram uma análise mais clara sobre os efeitos da temperatura e concentração no desempenho das soluções de

sal nos tratamentos térmicos de têmpera do que as medidas de dureza, confirmando os achados de BERGEN(1979).

A análise foi realizada através da taxa máxima, uma vez que os meios analisados foram soluções de sal onde a presença do primeiro estágio do resfriamento é praticamente inexistente como pode ser observado na figura 74. Essa variável pode ser observada em outros meios de resfriamento como nos óleos minerais. A figura 73 mostra um tempo de aproximadamente dez segundos para o primeiro estágio em óleo padrão. As taxas de resfriamento na temperatura de 300°C para as soluções de sal apresentaram valores muito próximos umas das outras. Assim as análises foram realizadas somente com as taxas máximas.

Como pode ser observado na figura 75 que ilustra um diagrama que relaciona taxa máxima, concentração e temperatura, agora visto de uma forma mais clara, os resultados são muito próximos com uma ligeira vantagem para concentrações de 13%. O aumento na temperatura das soluções de sais ocasionam uma diminuição na máxima taxa de resfriamento. Esse efeito da temperatura pode ser observado em todas as concentrações estudadas.

A concentração de 9% quando usada em temperaturas de 25°C apresenta uma severidade de têmpera relativamente alta.

VI - CONCLUSÕES

- A aplicação das curvas de resfriamento é uma boa técnica de análise da severidade de têmpera dos meios refrigerantes nos tratamentos térmicos. Os efeitos das alterações das variáveis como a concentração e temperatura no desempenho das soluções do sal AWS-20 usadas nos tratamentos térmicos de têmpera são muito mais claras nas análises das curvas de resfriamento do que nos exames de dureza e metalográficos.
- O índice de endurecimento é também uma ferramenta bastante sensível para avaliar as diferentes severidade de têmpera.
- As soluções de sal como sabido se apresentam como meio extremamente severo, principalmente quando comparados aos óleos minerais comuns.
- Os efeitos das alterações das variáveis como a concentração e temperatura no desempenho das soluções do sal AWS-20 usadas nos tratamentos térmicos de têmpera são muito mais claras nas análises das curvas de resfriamento do que nos exames de dureza e metalográficos.
- O comportamento das soluções do sal AWS-20 como um meio refrigerante usado nos tratamentos térmicos de têmpera, apresenta resultados muito próximos para a faixa de concentrações variando entre 9 a 15%.
- Pequenas variações de temperatura não apresentam efeitos significativos nos resultados dos tratamentos térmicos de têmpera.

- Numa análise mais sensível observa-se que as soluções do sal AWS-20 testadas, apresentam ligeiro aumento da severidade de têmpera para as concentrações de 13%, e para temperaturas mais baixas. Entretanto em termos de quantidade de martensita presente, esse aumento é irrelevante.
- Assim, uma faixa de trabalho econômica seria a de 9% de sal, podendo a temperatura variar dentro dos valores utilizados nesse trabalho, sem que haja nenhum prejuízo quanto à dureza do material temperado.

VII - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver métodos que calculem o fator H de Grossman utilizando dados da curva de resfriamento.
- Estudar os efeitos dos sentidos dos fluxos provocados por agitações na severidade de têmpera em soluções de sais.
- Estudar os efeitos do gradiente de temperatura entre o centro e a superfície das amostras temperadas com óleos, com sal e com polímeros na geometria das peças temperadas.
- Realizar estudos dos efeitos da agitação por bombas, na severidade de têmpera das soluções de sal, utilizando curvas de resfriamento.
- Comparar os diversos tipos de sais, utilizados para soluções de têmpera, quanto às características do resfriamento.

VIII- ANEXO

Curvas de resfriamento para as soluções de sal em estudo

a)

b)

FIGURA 76 - Curvas de resfriamento para a solução de sal S925, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 77 - Curva de resfriamento para a solução de sal S935, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 78 - Curvas de resfriamento para a solução de sal S950, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 79 - Curvas de resfriamento para a solução de sal S1125, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 80 - Curva de resfriamento para a solução de sal S1135, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 81 - Curva de resfriamento para a solução de sal S1150, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 82 - Curva de resfriamento para a solução de sal S1325, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 83 - Curva de resfriamento para a solução de sal S1335, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 84 - Curvas de resfriamento para a solução de sal S1350, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 85 - Curva de resfriamento para a solução de sal S1525, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 86 - Curva de resfriamento para a solução de sal S1535, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

a)

b)

FIGURA 87 - Curva de resfriamento para a solução de sal S1550, a) temperatura em função do tempo, b) temperatura em função da taxa de resfriamento.

IX - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APRAIZ BARREIRO, J.(1985). Tratamiento termicos de los aceros. 8ed. Madrid, Dossat, 739p.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (1989). Drasticité des hules de trempe. Essai au capteur d' argent N F T 60-178 1989, Association Française de Normalisation, Paris, France, p.26.
- ATKINS, M.(1980). Atlas of continous cooling transformation diagrams for engineering steels. Metals Park, Ohio, ASM.
- BATES, C. E. (1987). Seleting quenchants to maximize distortion in aluminum parts. J. heat treating, v.5, n1, p.27-40.
- BATES, C. E.; TOTTEN, G.E. (1992). Method for predicting quench severity effects on the properties of aluminum and steel alloys: I. Industrial heating, p.19, August.
- BATES, C. E.; TOTTEN, G. E.; ORSZAK, K. B. (1993). Quench severity effects on the properties of selected steel alloys. In: THIRD INTERNATIONAL SEMINAR OF THE INTERNATIONAL FEDERATION FOR HEAT TREATMENT AND SURFACE ENGINEERING, Melbourne, 1991. Proceedings. Great Britain The Institute of Materials. P.55-70.
- BODIN, j.; SEGERBERG, S. (1993). Meassurement and evaluation of power of quenching media for hardening. Heat Treatment of Metals. v.20, n.1, p.15-23.

- BOYER, H. E. (1988). Quenching and control of distortion. Metals Park, Ohio, ASM International, 289p.
- BROPHY, J. H.; ROSE, R. M.; WIFF, J. (1972). Ciência dos materiais. Trad. por Juarez Tavora Veado. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científico. V. 2.
- CANALE, L. C. F. et al. (1995). Características de resfriamento de soluções de polímero para têmpera. In: CONGRESSO ANUAL, 50. Anais, SÃO PEDRO, SÃO PAULO, ABM. v.2, p.517-529.
- CHIAVERINI, V. (1987). Tratamentos térmicos das ligas ferrosas. Associação Brasileira de Metais. 2.ed. São Paulo, 232p.
- COLPAERT, H. (1974). Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3 ed. São Paulo, Edgard Blucher, 412p.
- DAKINS, M. E.; Bates, C. E; TOTTON, G. E. (1989). Calculation of the Grossman hardenability factor from quenching cooling curves. v.56, n.12, p.58-59.
- DAKINS, M. E.; Bates, C.E; TOTTON, G. E. (1992). Estimating quench severity with cooling curves. Heat Treating, v.24,n.3/4, April.
- DICKEN, T. W. (1986). Modern quenching oils: an overview. HEAT Treatment of Metals, v.13, n.1, p.6-8.
- GRISHIN, S. A.; CHURYUKIN, Yu. N. (1986). Evaluation of the cooling capacity of quenching media based on water. Metal Science and Heat Treatment, v.28, n.9/10. p.744-745. October.

- GROSSMANN, M. A.; ASIMOW, M.; URBAN, S. F. (1939). Hardenability, its relation to quenching, and some quantitative data of alloy steels. AMERICA SOCIETY FOR METALS, p.124-190.
- HILDER, N. A. (1985). A pump agitation sistem for assessing the cooling characteristics of quenchants. Heat Treating of Metals, v.12, n.3, p.63-68.
- HILDER, N. A. (1987). The behaviour of polymer quenchants. Heat Treatment of Metal. v.2, p.31-46.
- HOUGHTON (s.d.). Houghton on quenching. s.n.t.
- IMAMURA, G. M.; CAPOCCHI, J. D. T. (1986). Avaliação da severidade de têmpera em leito fluidificado. Metalurgia- ABM, v.42, n.340, p.161-166. Março.
- INTERNATIONAL STANDAR ORGANIZATION (1995). Industrial quenching oils- Determination of cooling characteristics-Laboratory method. Draft international standard ISO 9950, p.14.
- JAPONESE INDUSTPIAL STANDARD (1991). Heat treating oils. JIS k 2242 1991, Japanese Standards Association, Tokyo, Japan, p.16.
- KASPAR, R.; Hoppe, H. (1990). Modified deformation dilatometry.material prüfung, v.32, n.6, p.186-189.
- KRAUSS, G. (1988). Principles of Heat Treatment of steel. Metals park, Ohio: American Society for Metals, 291p.
- KUBAN, M. B.; JAYARAMAN, R.; HAWBOLT, E. B.; BRIMACOMBE, J. K. (1986). An Assessment of additivity principle in predicting continuous-

cooling austenite- to – perlite transformation kinetics using isothermal transformation data. Metal. Trans. A, v.17A, n.9 , p.1493-1503. Sept.

LAKIN, J. J. (1979). Testing of quenching media. Heat Treatment of Metals, v.6, n.3, p.59–62.

LISCIC, B. (1978). Der temperaturgradient auf der oberfläche als Kenngröße für die reale abschreckintensität beim Härten. v.33, n.4, p.179–191.

LISCIC, B. (1988). A new method to measure and record the quenching intensity in workshop practice. In: 6 th CONGRESS INTERNATIONAL: HEAT TREATMENT OF MATERIALS, 1988. Proceedings. A S M international. p.157–66.

MASON, K. J.; CAPEWELL, I. (1986). The effect of agitation on the quenching characteristics of oil and polymer quenchants. v.13, n.4, p.99-103.

METALS HANDBOOK (1972). Engineering properties of steel. 8 ed. Ohio, v.8. Metals Park, American Society for Metals.

METALS HANDBOOK (1981). Heat treating. 9 ed. Ohio, v.4, American Society for Metals.

MONROE, R. W.; BATES, C. E. (1983). Evaluating quenchants and facilities for hardening steel. J. Heat Treating. v.3,n2, p.83-101. Dec.

PEREIRA, R. L. (1972). Curso de tratamentos térmicos dos metais . Seção de publicações E E S C–USP. 2 ed. São Carlos, 351p.

- RÉTI, T.; TAKÁCS, J.; CZINEGE, I.; REGER, M. (1993). Quantitative characterization of quenching performances. *heat treating*, v.25, n.2, p.24–28. February.
- SEGERBERG, S. (1988). Spray quenching – A method with great flexibility. In: *INTERNATIONAL CONGRESS ON HEAT TREATMENT OF MATERIALS*, 6, Chicago. Proceeding. Metals Park, Ohio, ASM, 1988. p.177-181.
- SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. (1988). *Aços e ligas especiais*. Eletro Metal. 2.ed. Sumaré, 528p.
- STATE BUREAU OF STANDARDS OF THE PEOPLES'S REPUBLIC OF CHINA (1988). Test method for cooling properties of quenching média. G. B. 9449 88. State Boreau of standards of the people's Republic of China, Beijing, China.
- TAMURA, I.; SHIMIZU, N.; OKADA, T. (1984). A method to judge the quench-hardening of steel from cooling curves of quenching oils. *J. Heat Treating*, v.3, n.4, p.335-343. December.
- TENSI, H. M.; ESTEFFEN, E. (1985). Meassuring of the quenching efect of liquid hardening agents on the basis of synthetics. *Steel Research*, v.56, n. 2, p.489-495.
- THELNING, K. E. (1983). New aspects on the appraisal of cooling process during hardening of steel. *J. Heat Treating*, v.3, n.2, p.100–113. December.
- THELNING, K. E. (1986). Correlation of the meassured quenching intensity with the hardness distribution in quenched parts. In: *INTERNATIONAL CONGRESS ON HEAT TREATMENT OF MATERIALS*, 5, Budapest,

Hungary, 1986. Proceeding, Hungary, Budapest, Scientific Society of Mechanical Engineers, 1986. v.3, p1737–1759.

TOTTEN, G. E.; DAKINS, M. E.; HEINS, R. W. (1988). Cooling curve analysis of synthetic quenchants - A historical perspective. J. Heat Treating, v.6, n.2, p.87-95.

TOTTEN, G. E.; DAKINS, M. E.; JARVIS, L. M. (1989). How H-factor can be used to characterize polymers. Heat Treating, p.28-29. December.

TOTTEN, G. E.; BATES, C. E.; CLINTON, N. A. (1993). Handebook Of quenchants and quenching tecnology. 2.ed. Materials Park, Ohio, ASM International, 507p.

VOORT, G. F. V. (1991). Atlas of time–temperature diagrams for irons and steels. United States of America, ASM international. (material data series).

VONBERG, R. T. (1979). Quenching principles and pratice. In: ANNUAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE INTITUTE OF METALLURGICAL TECHNICIANS HELD IN THE UNIVERSITY OF ASTON, 5, Birmingham, 1979. Theat Treatment: methods and media. London, Chameleon, p.81–97.

VON BERGEN, R. T. (1991). The control and monitoring of polymer quenchant systems. Heat Treatment of Metals, n.2, p.37-42.