UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

“CLASSIFICAÇÃO DOS ÓLEOS DE TÊMPERA NACIONAIS”

Juliano Emílio Ruggieri

Dissertação apresentada à Área Interunidades
em Ciência e Engenharia de Materiais da
E.E.S.C., I.F.S.C. e I.Q.S.C., Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para a
obtenção do Título de Mestre em Ciência e
Engenharia de Materiais.

Orientador: Lauralice de Campos Franceschini Canale

São Carlos - São Paulo

1998

Class.	TC
Cutt.	4993
Tombo	7.1.1.18

it 964520

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

R931c Ruggieri, Juliano Emílio
Classificação dos óleos de têmpera nacionais /
Juliano Emílio Ruggieri. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Área Interunidades em Ciência e Engenharia
Materiais da EESC, IFSC, IQSC.

Orientador: Prof^º. Dr^ª. Lauralice de Campos
Franceschini Canale.

1. Tratamentos térmicos. 2. Têmpera. 3. Meios
de resfriamento. 4. Severidade de têmpera.

I. Título.

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

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
JULIANO EMILIO RUGGIERI APRESENTADA A ÁREA INTERUNIDADES EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA EESC-IFSC-IQSC, UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO, EM 06/04/1998

COMISSÃO JULGADORA:

Profa. Dra. Lauralice de Campos F Canale (EESC-SMT-USP)

Prof. Dr. Ovidio Richard Crnkovic (EESC-SMT-USP)

Prof. Dr. Claudio Shyinti Kiminami (UFSCar-DEMa)

***“É melhor compreender pouco
do que não compreender muito”
(Anatole France)***

AGRADECIMENTOS

*“Os sábios são os que buscam a sabedoria.
Os tolos pensam já tê-la encontrado”
(Napoleão Bonaparte)*

Agradeço a Deus, por ter me concedido inteligência e determinação para a realização deste trabalho.

Agradeço às companhias de petróleo que enviaram amostras dos respectivos produtos para a realização deste trabalho.

Agradeço à Professora Doutora Lauralice de Campos Franceschini Canale pela orientação e amizade, presentes na elaboração deste trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor Ovídio Richard Crnkovic pela co-orientação e amizade, na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus pais pela dedicação, apoio e incentivo que forneceram em todos os momentos.

Agradeço, em especial, à Érika Negrão Leal, que sempre apoiou-me e incentivou-me durante a realização do trabalho.

Agradeço ao Sr. João Dalton Falleiros Jr. pela amizade e auxílio prestado durante a execução do trabalho.

Agradeço ao Sr. Claudinei Maschietto pela amizade e auxílio na execução dos ensaios.

Agradeço ao Professor Doutor Samuel Irati Novaes Gomes pela primeira orientação.

Agradecimentos a todos os professores do Departamento de Materiais pela amizade.

Agradeço à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Aos funcionários do Departamento de Materiais, Eliete e Regina; Eliezer, Silvano, Pedro, Alberto e João; Alexandre e Elza, pela amizade e serviços prestados.

Aos funcionários da Biblioteca, pela dedicação e amizade.

Agradeço a todos os colegas do Departamento de Materiais pela amizade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	iv
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
I - INTRODUÇÃO.....	1
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
II.1 - Aspectos Gerais.....	2
II.2 - Características de Resfriamento em Meio Líquido.....	4
II.3 - Meios de Resfriamento.....	9
II.3.1 - Óleos de Têmpera.....	11
II.3.1.1 - Composição dos Óleos de Têmpera.....	11
II.3.1.1.1 - Óleos de Têmpera Derivados de Petróleo.....	11
II.3.1.1.2 - Óleos de Têmpera Derivados de Gorduras.....	12
II.3.1.2 - Tipos de Óleos de Têmpera.....	13
II.3.1.2.1 - Óleos de Têmpera Convencionais.....	13
II.3.1.2.2 - Óleos de Têmpera Acelerados.....	14
II.3.1.2.3 - Óleos de Martêmpera ou Óleos Quentes.....	15
II.3.1.3 - Características dos Óleos de Têmpera.....	15

II.3.1.3.1 - Viscosidade.....	15
II.3.1.3.2 - Ponto de Fulgor.....	16
II.3.1.3.3 - Volatilidade.....	16
II.3.1.3.4 - Estabilidade à Oxidação.....	17
 II.4 - Parâmetros que Influenciam o Resfriamento.....	 17
II.4.1 - Agitação.....	17
II.4.2 - Temperatura do Banho.....	19
II.4.3 - Degradação do Óleo de Têmpera.....	20
II.4.4 - Contaminação do Óleo de Têmpera.....	22
 II.5 - Seleção do Óleo de Têmpera.....	 24
 II.6 - Medidas das Características de Resfriamento.....	 25
II.6.1 - Testes de Poder de Têmpera.....	25
II.6.2 - Testes de Poder de Resfriamento.....	27
II.6.2.1 - General Motors Quenchometer (Teste de Bola de Níquel).....	27
II.6.2.2 - Teste do Arame Quente e Teste de Intervalo de 5s.....	28
II.6.2.3 - Análise de Curvas de Resfriamento.....	29
II.6.2.4 - Fator de Severidade de Têmpera H.....	32
II.6.2.5 - Método de Liscic.....	35
II.6.2.6 - Índice Castrol.....	37
II.6.2.7 - Fator Q de Bates.....	38
II.6.2.8 – Valor V de Tamura.....	38
II.6.2.9 - Predquench Software.....	39
II.6.2.10 - Sensor Supervisor de Têmpera.....	40
II.6.2.11 - IVF QuenchoTest e HP.....	41
 III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	 45

III.1 - Materiais Utilizados.....	45
III.2 - Descrição do Equipamento.....	49
III.3 - Procedimentos.....	51
III.4 - Avaliação do Poder de Têmpera.....	53
IV - RESULTADOS.....	55
IV.1 - Apresentação dos Resultados.....	55
IV.2 – Apresentação dos Resultados Calculados Matematicamente....	64
IV.3 – Apresentação das Classificações.....	65
IV.4 – Apresentação Gráfica dos Resultados.....	68
V - DISCUSSÃO.....	72
V.1 - Classificação por Taxa Máxima de Resfriamento.....	72
V.2 - Classificação por Índice Castrol.....	73
V.3 - Classificação por valor V.....	74
V.4 - Classificação por HP.....	76
V.5 – Discussões finais.....	78

VI – CONCLUSÃO.....	81
VII – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
VIII.1 – Obra Consultada.....	91
IX – ANEXO.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Estágios de Resfriamento em Meio Líquido.....	05
Figura 02 - Os Três Estágios na Curva de Resfriamento.....	06
Figura 03 - Relação da Superfície de Molhamento e o Ângulo de Contato.....	08
Figura 04 - Efeitos da Agitação em um Óleo de Têmpera.....	19
Figura 05 - Influência da Temperatura do Banho de Óleo na Velocidade de Resfriamento.....	20
Figura 06 - Efeito da Oxidação na Taxa de Resfriamento.....	21
Figura 07 - Efeito da Contaminação do Óleo por Água.....	23
Figura 08 - Princípio de Operação do GM Quenchometer.....	28
Figura 09 - Severidade de Têmpera em Função de Duas Temperaturas.....	30
Figura 10 - Princípio Experimental de Avaliação do Valor H.....	34
Figura 11 - Sonda Liscic-Nanmac.....	36
Figura 12 - Sensor Supervisor de Têmpera.....	41
Figura 13 - Sonda Wolfson - Norma ISO DIS/9950.....	41
Figura 14 - Método de Obtenção da Temperatura de Início do Terceiro Estágio de Resfriamento.....	43
Figura 15 - Vista Geral do FAC Quench.....	50
Figura 16 - Tela de Ajuste do Fator K.....	51
Figura 17 – Tela de Preparação do Ensaio.....	53
Figura 18 - Curva Taxa de Resfriamento NEON 14.....	56
Figura 19 - Curva Taxa de Resfriamento MICROTEMP 153.....	56
Figura 20 - Curva Taxa de Resfriamento ILOQUENCH 32.....	57
Figura 21 - Curva Taxa de Resfriamento HOUGHTO QUENCH KB	57
Figura 22 - Curva Taxa de Resfriamento QUENCHTEX C.....	58
Figura 23 - Curva Taxa de Resfriamento VOLUTA F.....	58

Figura 24 - Curva Taxa de Resfriamento IPITEMP 70.....	59
Figura 25 - Curva Taxa de Resfriamento HOUGHTO QUENCH 130.....	59
Figura 26 - Curva Taxa de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/22L.60	
Figura 27 - Curva Taxa de Resfriamento TIRROIL LTT 003 B-S.....	60
Figura 28 - Curva Taxa de Resfriamento NEON 32.....	61
Figura 29 - Curva Taxa de Resfriamento MICROTEMP 157.....	61
Figura 30 - Curva Taxa de Resfriamento QUENCHTEX WW.....	62
Figura 31 - Curva Taxa de Resfriamento VOLUTA C.....	62
Figura 32 - Curva de Resfriamento ÓLEO PADRÃO a 60°C.....	63
Figura 33 - Curva Taxa de Resfriamento ÓLEO PADRÃO a 60°C.....	63
Figura 34 - Classificação por Taxa Máxima de Resfriamento.....	69
Figura 35 - Classificação por Índice Castrol.....	69
Figura 36 - Classificação por valor V	70
Figura 37 - Classificação por HP.....	70
Figura 38 - Temperatura de Transição do Primeiro para o Segundo Estágio de Resfriamento.....	71
Figura 39 - Temperatura de Transição do Segundo para o Terceiro Estágio de Resfriamento.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Severidade de Têmpera. Valores de H.....	35
Tabela 02 - Características Técnicas dos Óleos de Têmpera Nacionais.....	48
Tabela 03 - Valores Retirados e Calculados das Curvas de Resfriamento dos Óleos de Têmpera Nacionais.....	64
Tabela 04 - Classificação por Taxa Máxima de Resfriamento.....	65
Tabela 05 - Classificação por Índice Castrol.....	66
Tabela 06 - Classificação por Valor V.....	67
Tabela 07 - Classificação por HP.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATTT - Associação Francesa para Tratamentos Térmicos

IFHT - International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering

ISO - International Organization for Standardization.

IVF - Swedish Institute of Production Engineering Research

PPS - Sistema de Predição de Propriedades.

NF T - Norma Francesa para Tratamentos Térmicos.

NF A - Norma Francesa para Aços.

cSt - Medida de viscosidade, Centistokes.

H Fator de Severidade de têmpera.

h - Coeficiente de calor interfacial.

k - Condutividade térmica do material.

ϕ - Temperatura.

θ - Densidade do Fluxo de Calor.

λ - Condutividade térmica do material da sonda.

$\delta T/\delta N$ - Gradiente de temperatura na superfície da sonda.

T_n - Termopar na superfície da sonda.

T_i - Termopar a 1,5cm abaixo da superfície da sonda.

T_c - Termopar no centro da seção transversal.

C_i - Índice Castrol.

K' - Constante do equipamento para o índice Castrol.

V_{máx} - Taxa máxima de resfriamento para o índice Castrol.

T_{máx} - Temperatura em que ocorre a taxa máxima, para o índice Castrol.

T_{banho} - Temperatura do banho de fluido para o índice Castrol.

V - Valor V de Tamura, indicador de severidade de têmpera.

T_c - Temperatura de início do segundo estágio para cálculo de V.

T_d - Temperatura de início do terceiro estágio para cálculo de V.

T_s - Temperatura de início de transformações para o aço doce, cálculo de V.

T_f - Temperatura de final dessas transformações e início de transformação martensítica.

Q - Fator de Têmpera.

C_t - Função que descreve a precipitação cinética da liga em estudo.

HP - Hardening Power (Poder de Têmpera).

CR_F - Taxa máxima para o nariz de perlita/ferrita, 550°C.

CR_M - Taxa de Resfriamento para a temperatura de início de transformação martensítica.

T_{VP} - Temperatura de transição entre as fases de vapor e nucleação de bolhas.

CR - Taxa de resfriamento na faixa de Temperatura entre 500 e 600°C.

T_{CP} - Temperatura de transição entre as fases de nucleação de bolhas e convecção.

O'₂ - Temperatura de transição entre as fases de nucleação de bolhas e convecção.

V₄₀₀ - Taxa de resfriamento na temperatura de 400°C.

A/D - conversor analógico/digital.

Fator K - Fator de Calibração de sondas.

RESUMO

RUGGIERI, J. E. *Classificação dos óleos de têmpera nacionais*. São Carlos, 1998. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A têmpera, que consiste no resfriamento rápido do aço, após austenitização, é um dos tratamentos térmicos mais utilizados. O objetivo desse tratamento é a obtenção da estrutura martensítica, que oferece ótimas propriedades de dureza e resistência. A água, as soluções de polímeros e os óleos minerais são os meios refrigerantes mais comuns, sendo os óleos responsáveis pelo resfriamento em 80% dos casos. Verificou-se, no Brasil, o desconhecimento, dos mercados produtor e consumidor, quanto ao universo dos óleos de têmpera comercialmente disponíveis e de suas respectivas características de resfriamento. Assim, atentou-se para a necessidade de apresentar aos mercados já descritos, uma classificação dos óleos de têmpera nacionais, relacionando-os como rápidos, intermediários e lentos, destacando ainda, aspectos importantes nos parâmetros de resfriamento.

Palavras-chave: Tratamentos térmicos; Têmpera; Meios de Resfriamento; Severidade de Têmpera.

ABSTRACT

RUGGIERI, J. E. *Classification of national quench oils*. São Carlos, 1998. Dissertação (Mestrado).- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Quenching of steels, which consist of very fast cooling from austenitizing temperatures, is the most used heat treatment. The aim of this treatment is the obtation of martensitic microstructure. This microstructure confer excellent hardness and strength properties. The most common quenchants are water, polymer solutions and mineral oils, and the oils themselves are responsible by the 80% of the quenchants used during quenching. In Brazil, it was verified consumer lack of knowledge of the oils available as quenchants and their characteristics. Therefore, in this work as attempt was made to present the quenchants available and their classification as fast, intermediary and slow quenchants.

Keywords: Quenching; Quenchants; Quench severity.

I - INTRODUÇÃO

A utilização de óleos como meios de resfriamento em tratamento térmico de têmpera é bastante difundida mundialmente. Estima-se, segundo TKACHUK et al (1990), que cerca de 80% dos fluidos de resfriamento sejam compostos de óleos minerais.

No Brasil o quadro não é diferente. Há um grande mercado consumidor abastecido por um número importante de fabricantes. Dentre eles existem as empresas que produzem o óleo segundo especificações do cliente, entretanto, todas elas têm os produtos comercialmente disponíveis no mercado. Diante disso, existe uma necessidade de se conhecer quais são esses produtos e, em que faixa de atuação, em termos de velocidade de resfriamento, eles se classificam.

Assim, o que se pretendeu com esse trabalho foi conhecer as empresas, seus produtos e a faixa de utilização dos produtos comercialmente disponíveis, informando aos usuários e também aos fabricantes, o que existe em disponibilidade no mercado brasileiro.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 - Aspectos Gerais

Uma das características mais importantes dos aços como materiais de construção mecânica é a possibilidade de desenvolver diversas combinações de propriedades mecânicas.

Isto é conseguido através da utilização dos tratamentos térmicos. Dentre esses, a têmpera seguida de revenido, permite obter ótimas associações de resistência e tenacidade, através da estrutura martensítica revenida.

A têmpera consiste em resfriar o aço após austenitização a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça em questão. Deste modo obtém-se a estrutura martensítica.

Segundo TENSI et al (1995), as propriedades dos aços dependem da composição da liga, geometria e espessura da peça e também da taxa de resfriamento do meio refrigerante no qual o material é resfriado.

As propriedades finais da peça são também dependentes das condições de revenido, nas quais o componente anteriormente temperado, é submetido.

LASDAY (1976), relatou que o resfriamento é utilizado, primeiramente, para controlar o tratamento térmico no que diz respeito ao desenvolvimento da microestrutura desejada no metal e suas propriedades resultantes. Esta microestrutura atingida no produto final é, por sua vez, uma função da temperabilidade do aço.

TOTTEN et al (1993) e KRAUSS (1980), definem o conceito de temperabilidade como a facilidade que o metal tem de endurecer através da têmpera, relacionando isso com posição, geometria e meio de resfriamento.

Estes parâmetros são, por outro lado, também influenciados não somente pelas propriedades do meio refrigerante, mas também, segundo BURGESS (1967), pela velocidade com a qual ele se move sobre as partes superficiais da peça.

Desta forma, para os meios refrigerantes, a severidade de têmpera é definida como a capacidade do meio refrigerante de extrair calor da peça quente.

Assim meios de maior severidade proporcionariam maior extração de calor da peça e uma maior probabilidade de se temperar em uma maior profundidade.

HOPKINS & RILEY (1969), demonstraram que a profundidade de têmpera obtida na prática do tratamento térmico dependerá de dois grupos variáveis:

- tamanho, formato da peça, uniformidade e severidade de têmpera do meio refrigerante.
- histórico do tratamento térmico. (taxas de aquecimento, temperatura e tempo de encharque).

A uniformidade do meio refrigerante no processo de transferência de calor, na superfície do metal, durante o resfriamento também é importante pois, aumentando-se essa uniformidade os gradientes de temperatura na superfície serão reduzidos, minimizando as tensões térmicas. Condições que dificultem a uniformidade no processo poderão, segundo TOTTEN et al (1993), induzir a formação de trincas e/ou distorções na peça.

BERGEN (1994), definiu que distorções são mudanças permanentes e geralmente imprevistas que ocorrem no formato ou

tamanho das peças durante o tratamento térmico, podendo ocorrer no aquecimento ou, como ocorre na maioria dos casos, durante o resfriamento.

No sentido de obter-se sucesso no tratamento térmico, BUCHMAYR & KIRKALDY (1990), definiram os objetivos que devem ser atingidos:

- Redução da tensão residual;
- redução das distorções;
- prevenção contra a propagação de trincas;
- desenvolvimento da dureza desejada;
- controle microestrutural para melhorar as propriedades como resistência mecânica, resistência ao desgaste, tenacidade, etc,
- distribuição homogênea da dureza.

Assim, no tratamento térmico, há um conjunto de variáveis determinantes do sucesso ou insucesso do tratamento.

II.2. - Características do Resfriamento em Meio Líquido

LASDAY (1976); TOTTEN et al (1988); SEGERBERG & BODIN (1991); BERGEN (1994) e outros autores, relataram a importância do entendimento do mecanismo de resfriamento para alcançar o maior poder de resfriamento do meio líquido durante o tratamento térmico. Existem três estágios distintos de resfriamento em meios líquidos. A figura 01 representa essa afirmação.

FIGURA 01 - Estágios de Resfriamento em Meio Líquido.
SEGERBERG & BODIN (1991).

No primeiro estágio acontece o contato do metal aquecido com o líquido, gerando um filme de vapor contínuo que envolve rapidamente a peça. Durante esse estágio o resfriamento é lento, pois o filme de vapor isola o contato entre o metal e o líquido.

Quando a temperatura da peça diminui e o filme de vapor se quebra, inicia-se o segundo estágio de resfriamento, caracterizado pela maior taxa de transferência de calor. Isto ocorre por uma violenta formação de bolhas fazendo o calor ser removido rapidamente do metal.

O terceiro e último estágio tem início quando a temperatura da peça cai abaixo da faixa de nucleação de bolhas do líquido. A diferença entre a temperatura do banho e o ponto de formação de bolhas é importante na taxa de transferência de calor ou resfriamento neste estágio. A curva taxa de resfriamento X temperatura é obtida a partir da primeira derivada da curva de resfriamento contínuo. Nela também é possível identificar esses mecanismos de resfriamento. Figura 02 representando os 3 estágios na curva de resfriamento.

**FIGURA 02 - Os Três Estágios na Curva de Resfriamento.
TOTTEN et al (1988).**

As propriedades finais da peça, resultarão do comportamento desses três estágios durante o resfriamento.

Assim, HAN et al (1995), relataram a importância de aumentar a severidade de têmpera durante o estágio inicial de resfriamento para se maximizar a dureza na peça.

Por outro lado, segundo TOTTEN et al (1993) e KOBASKO (1995), para prevenir o surgimento de trincas nas peças de aço, é necessário manter baixas taxas de resfriamento dentro da faixa de transformação martensítica (3º estágio resfriamento), ou seja, deve-se saber que as taxas de resfriamento precisam ser minimizadas, para o aço, próximas à temperatura de transformação martensítica, M_s , afim de se evitar tensões de transformação. Entretanto, meios que produzem altas taxas de resfriamento no primeiro e segundo estágios de resfriamento, normalmente, tem o mesmo comportamento na região de transformação martensítica. (terceiro estágio de resfriamento).

As taxas de resfriamento, de acordo com BATES (1987) e TENSI et al (1995), são determinadas pelo meio refrigerante e condições de uso, tais como, temperatura do banho, agitação, concentração, superfície de molhamento e também, comportamento durante o resfriamento.

TOTTEN & LALLY (1992), relataram a importância da uniformidade da transferência de calor para reduzir os gradientes térmicos superficiais, pois as taxas de resfriamento são controladas, durante o resfriamento, pela formação de um filme de vapor ao redor da peça imersa no fluido estudado. Se houver descontinuidade ou variação excessiva na formação deste filme pode ser produzida uma variação sensível das taxas de transferência de calor, podendo resultar em aumento ou surgimento de distorções e/ou trincas.

Trabalhos de TOTTEN et al (1994), mostraram que uma das funções mais importantes de um meio de resfriamento é a facilidade de molhamento desse meio na superfície do metal. Aumentando-se o ângulo de contato entre o líquido refrigerante e a superfície do metal têm-se um maior molhamento. Isto é ilustrado na figura 03.

O molhamento está intimamente relacionado com a viscosidade, pois, a diminuição da viscosidade, nos óleos convencionais, diminui a tensão superficial do líquido, o que ocasiona melhor molhabilidade.

Dependendo da formulação do óleo, a diminuição da viscosidade resulta numa melhor molhabilidade, com isso, num aumento da taxa de resfriamento.

TENSI* et al apud TOTTEN et al (1994), mostraram que o tempo de molhamento estaria relacionado com a temperatura de LEIDENFROST para a superfície da peça resfriada. A temperatura de LEIDENFROST é a temperatura de transição da fase de vapor para a fase de nucleação de bolhas. Essa temperatura diminui com o aumento do tempo de molhamento.

*TENSI, H. M., STICH, A. and LOSHKAROEV, V. E. Influence of Wetting Kinematics on Temperature and Heat Flux. *ASM Heat Treatment Conference: Equipment and Processes*, TOTTEN, G. E. and WALLIS, R.A., Ed., ASM International, Materials Park, OH, 1994.

FIGURA 03 - Relação da Superfície de Molhamento e o Ângulo de Contato. TOTTEN et al (1994).

BERGEN (1994) afirmou que, a situação ideal seria cada estágio do processo de têmpera ocorrer uniformemente na peça fornecendo assim, uma transformação homogênea com o mínimo de tensões residuais.

Com a finalidade de se obter um meio refrigerante ideal, deve-se, segundo TOTTEN et al (1993), procurar aquele que possua o primeiro estágio de resfriamento curto e o segundo estágio longo. Como já comentado, para minimizar o trincamento e distorções, é desejável diminuir as taxas de resfriamento no terceiro estágio.

Muitos meios de resfriamento não exibem comportamento ideal para todas as ligas metálicas, sob todas as condições de têmpera. Por isso existe a disponibilidade de mais de um tipo de meio refrigerante para a têmpera. Essa diversidade somada às diferentes condições operacionais no resfriamento permite obter a severidade de têmpera desejada.

A severidade de têmpera é determinada pela capacidade do meio refrigerante e como já comentado, pela velocidade com a qual ele se move sobre as partes superficiais das peças.

II.3 - Meios de Resfriamento

Os meios de resfriamento são utilizados para remover rapidamente o calor das peças de aço, afim de, produzir uma microestrutura desejada.

De acordo com BASHFORD & MILLS (1984); TOTTEN et al (1993) e PLACEK (1995), a água, óleos, soluções de sais e soluções de polímeros são os meios refrigerantes mais comumente usados para a têmpera de aços. Óleos usados para aplicações de têmpera incluem diversos destilados de petróleo e gorduras animais.

A água tem vários fatores positivos como baixo custo e disponibilidade, não é tóxica e é não inflamável. É um meio refrigerante excepcionalmente rápido, ou seja, tem a capacidade de resfriar a peça mais rapidamente. Porém, com o aumento da temperatura, a fase de vapor também aumenta, diminuindo a taxa máxima de resfriamento, entretanto, mantém o terceiro estágio rápido. Desta maneira, em peças de geometria complexa pode ocorrer o surgimento de trincas que propagar-se-ão quando a peça estiver submetida à esforços.

Segundo LASDAY (1976), quando a água é utilizada, um alto gradiente de temperatura é desenvolvido entre a superfície e o centro da peça, resultando em maior quantidade de distorções, aumentando-se o risco do surgimento e propagação de trincas. Desta forma, água tem limitações quanto a uma utilização mais ampla.

As soluções de polímeros, foram sugeridas, em princípio, para situações em que o resfriamento com outros fluidos não era suficientemente rápido para atingir as propriedades mecânicas desejadas no metal a ser termicamente tratado. O desempenho em resfriamento dessas soluções é fortemente dependente da concentração em que o polímero aparece e, do tipo de polímero utilizado. Desta maneira é possível o seu uso em uma ampla faixa de composições de aços.

Segundo BASHFORD & MILLS (1984), essas soluções têm sido marcadas como possuindo todos os benefícios dos óleos de têmpera mas sem o risco de fogo. Proporciona, ainda, uma redução da liberação de fumaça e melhora geral do ambiente de trabalho.

Os polímeros são misturados à água em concentrações variando de 3% a 30 %, fornecendo taxas de resfriamento que variam desde a da água até a dos óleos convencionais.

Assim como a água, algumas dessas soluções possuem altas taxas de resfriamento no estágio C e, é necessário cuidado na seleção do aço e peças a serem tratadas, a fim de se evitar problemas de distorção e trincamento.

Óleos usados para aplicações de têmpera incluem diversos destilados de petróleo e gorduras animais.

LASDAY (1976), também afirmou que em muitas aplicações as propriedades desejadas são obtidas com resfriamento em óleos, com a vantagem de menores tensões residuais e/ou distorções na peça temperada. Para peças de geometrias complexas e seções irregulares a têmpera em óleo pode ser uma alternativa de se evitar tensões que seriam atingidas com a utilização de um meio refrigerante mais drástico.

O resfriamento em óleo garante considerável diminuição no gradiente de temperatura entre a superfície e o centro da peça, resultando num mínimo de distorções e muito pouca probabilidade de trincas.

TOTTEN et al (1993), relataram que os óleos, mesmo apresentando menor intensidade de resfriamento em relação à água e algumas soluções de polímeros, com perigo de fogo e incompatibilidade ambiental, garantem, melhor que esses meios, certa uniformidade no resfriamento tornando-os insubstituíveis no tratamento térmico de muitos produtos.

Relataram também que aos óleos podem ser misturados vários tipos de aditivos; resultando em mudanças substanciais nas suas

propriedades, tais como viscosidade, taxa de resfriamento, molhabilidade, estabilidade à oxidação, etc.

Uma rigorosa avaliação dos óleos e meios sintéticos usados em tratamentos térmicos, permite a busca de propriedades mecânicas ideais, aliando a isso, o baixo custo e a plena satisfação.

II.3.1 - Óleos de Têmpera

II.3.1.1 - Composição dos Óleos de Têmpera

II.3.1.1.1 - Óleos de Têmpera Derivados de Petróleo

Óleos de têmpera típicos são derivados da destilação do petróleo, de acordo com BASHFORD & MILLS (1984) e PLACEK (1995), e são similares aos óleos básicos usados em motores e lubrificantes industriais. São misturas complexas de hidrocarbonetos parafínicos e naftênicos selecionados para proporcionarem uma taxa de resfriamento desejada.

Segundo DICKEN (1986), as características dos óleos minerais dependem de sua estrutura de hidrocarbonetos, sofrendo variação com a mudança do óleo base.

Trabalhos de TOTTEN et al (1994), sugerem que a composição química de um óleo mineral de têmpera varia de acordo com sua fonte. Óleos de uma mesma companhia, de um mesmo país, mas de regiões diferentes, poderão ser diferentes. Um óleo de têmpera é composto de centenas de elementos químicos diferentes e, embora os óleos sejam derivados de petróleo, permanecem misturas complexas com uma diversidade de composições possíveis.

Para DICKEN (1986), óleos minerais são uma mistura de hidrocarbonetos aromáticos, parafínicos e naftênicos; e desta maneira, podem ser descritos como sendo predominantemente parafínicos ou

naftênicos. Os óleos aromáticos envelhecem rapidamente, tendo uma pequena resistência à oxidação com pobres características de viscosidade/temperatura. Apesar das boas propriedades de molhamento, raramente são utilizados como óleos de têmpera. Os óleos naftênicos apresentam somente moderada estabilidade ao envelhecimento e uma melhor relação de viscosidade/temperatura em relação aos óleos aromáticos. Em contraste, os óleos parafinicos exibem propriedades de resfriamento menos favoráveis, porém, são mais resistentes à oxidação e mostram boa relação viscosidade/temperatura. Assim esses óleos altamente refinados formam a base necessária para muitas formulações de óleos de têmpera modernos.

TOTTEN et al (1994), afirmaram que as estruturas particulares e as quantidades relativas de cada elemento no óleo, contribuem para o desempenho da transferência de calor do começo ao fim do resfriamento. Por isso, a variação da razão parafinico/aromático e a degradação oxidativa exercem forte influência.

II.3.1.1.2 - Óleos de têmpera Derivados de Gorduras

Existem óleos de têmpera derivados de gorduras animais, conforme relatado por BASHFORD & MILLS (1984) e TOTTEN et al (1993) sendo consideravelmente mais comuns que os derivados de petróleo. As gorduras, ésteres alcalinos de triglicerídeos extraídos de vários peixes e animais, apresentam capacidade de resfriamento superior, em alguns casos, a dos óleos minerais. Os óleos derivados de gorduras promovem um maior resfriamento em altas temperaturas. Isto é importante para minimizar ou evitar a formação de microestruturas menos duras durante a têmpera.

Os óleos derivados de gorduras têm pouca utilização efetiva por apresentarem baixo ponto de fulgor, resultando em perigo de fogo pois, as

temperaturas de utilização dos óleos de têmpera geralmente ultrapassam a temperatura de ignição destes óleos.

Apresentam adicionalmente, baixa resistência à oxidação, levando à formação de borra e depósitos que podem interferir seriamente no poder de têmpera aumentando, ainda, as perdas por arraste.

II.3.1.2 - Tipos de Óleos de Têmpera

Óleos de têmpera são selecionados, como relatado por LASDAY (1976) e BASHFORD & MILLS (1984), tendo como base sua transferência de calor imediata, durante o resfriamento. Óleos de têmpera são, geralmente, classificados por velocidade de resfriamento e temperatura de uso. Os três principais tipos de óleos de têmpera são:

- óleos convencionais (não acelerados) ou óleos frios;
- óleos acelerados;
- óleos de martêmpera ou óleos quentes.

Embora existam outras classificações, os descritos acima, são os mais comumente encontrados.

II.3.1.2.1 - Óleos de Têmpera Convencionais

Segundo TOTTEN et al (1993), os óleos de têmpera convencionais são óleos minerais que contém aditivos para reduzir a oxidação térmica sem nenhuma função de aumentar a taxa de resfriamento.

Nesses óleos alguns aditivos, muitas vezes, são colocados com o intuito de prevenir a oxidação e intensificar a molhabilidade; sem entretanto, aumentar a taxa de resfriamento.

Muitos desses óleos têm viscosidade de aproximadamente 20 cSt (mm^2/s) a 40°C, embora alguns apresentem valores acima dos 40 cSt (mm^2/s) na mesma temperatura.

DICKEN (1986), diz que os tipos mais comuns são os parafínicos altamente refinados, tendo uma viscosidade de 20 cSt (mm^2/s) a 40°C.

II.3.1.2.2 - Óleos de Têmpera Acelerados

Para TOTTEN et al (1993), esses óleos são geralmente formulados a partir de um óleo mineral e contém um ou mais aditivos para aumentar as taxas de resfriamento. A viscosidade desses óleos pode variar de 7,5 a 15 cSt a 40°C.

BASHFORD & MILLS (1984) e TOTTEN et al (1994), dizem que é necessário aumentar a taxa de resfriamento do óleo de têmpera para reduzir a duração do filme de vapor (1º estágio) e aumentar a taxa de transferência de calor na fase de nucleação de bolhas (2º estágio). Em alguns casos, o óleo de têmpera pode ser aditivado para facilitar estes processos, com o aumento do molhamento da superfície de resfriamento, pelo óleo de têmpera. O aumento no grau de molhamento é determinado pela estrutura química do aditivo e sua concentração.

Para LASDAY (1976) e DICKEN (1986), usando-se óleos de têmpera acelerados, consegue-se a alta velocidade inicial de têmpera da água sem uma taxa de resfriamento reduzida em baixas temperaturas, característica dos óleos de têmpera convencionais. Particularmente, nesta região de transformação, conforme já comentado, podem ocorrer distorções e trincas se as taxas de resfriamento forem muito altas.

Estes óleos contém aditivos tais como molhantes, inibidores de oxidação, detergentes e dispersantes, conseguindo-se nesses casos, taxas de resfriamento significativamente mais altas que nos óleos convencionais.

II.3.1.2.3 - Óleos de Martêmpera ou Óleos Quentes

Segundo TOTTEN et al (1993), os óleos de martêmpera são óleos usados em temperaturas entre 95°C e 230°C. O tratamento de martêmpera é usado para diminuir os gradientes térmicos entre a superfície e o núcleo das peças. Esses gradientes criam tensões internas que por sua vez são fontes geradoras de distorções e trincas.

Geralmente são formulados com solventes de óleos minerais refinados contendo uma fração bastante alta de parafínicos otimizando a oxidação e estabilidade térmica.

A estabilidade térmica, deste tipo de óleo, de acordo com LASDAY (1976), ocorre através da ação de inibidores de oxidação adicionados ao óleo de têmpera, impedindo a formação de ácidos e borra normalmente formados com o uso em altas temperaturas.

BASHFORD & MILLS (1984), descreveram como propriedades importantes dos óleos de martêmpera o alto ponto de fulgor, baixa volatilidade, boa resistência à oxidação e estabilidade térmica.

II.3.1.3 - Características dos Óleos de Têmpera

II.3.1.3.1 - Viscosidade

DICKEN (1986), mencionou a viscosidade como fator importante nas características de um óleo de têmpera.

Desta maneira óleos de têmpera de várias viscosidades são disponíveis.

BASHFORD & MILLS (1984) e DICKEN (1986), relacionaram baixa viscosidade com taxa de resfriamento alta. Isto ocorre porque a baixa viscosidade leva a uma melhor circulação do óleo e conseqüente turbulência, estimulando a quebra do filme de vapor. É necessário

observar que a diminuição da viscosidade melhora as características de resfriamento no caso de óleos convencionais.

Já a alta viscosidade, leva a um aumento da perda por arraste, aumentando, conseqüentemente, o consumo de óleo.

BASHFORD & MILLS (1984), relataram que para muitas aplicações a viscosidade mais benéfica é de 35 cSt (40°C); aliando assim as características positivas da baixa viscosidade sem, no entanto, comprometer a segurança, já que nos óleos, quanto menor a viscosidade, menor será seu ponto de fulgor.

Essa análise é feita a 40°C segundo a norma ASTM D 445, enquanto que a 60°C, temperatura usual de trabalho, o valor da viscosidade pode mudar. Nem sempre um óleo mais viscoso a 40°C o será a 60°C.

II.3.1.3.2 - Ponto de Fulgor

Segundo DICKEN (1986), o ponto de fulgor de um óleo é a temperatura mais baixa na qual os vapores do óleo se inflamam, ou seja, a temperatura na qual ocorre ignição. Um alto ponto de fulgor é vital por duas razões:

- Indica que o óleo não contém frações de voláteis que iriam prolongar a fase do filme de vapor (1º estágio) e com isso diminuir a taxa de resfriamento.
- risco de fogo é reduzido.

II.3.1.3.3 - Volatilidade

TOTTEN et al (1993), descreveram a volatilidade como a tendência dos líquidos para evaporação. Os constituintes voláteis podem entrar no óleo como contaminantes estranhos.

DICKEN (1986), demonstrou que a presença de compostos voláteis no óleo de têmpera prolonga o estágio do filme de vapor e reduz o ponto de fulgor. Assim um óleo base mal selecionado pode conter voláteis que irão atrapalhar o desempenho de têmpera, além de aumentar a possibilidade do risco de acidentes.

II.3.1.3.4 - Estabilidade à Oxidação

De acordo com TOTTEN (1984), a oxidação de um óleo ocorre através da reação química entre as moléculas de oxigênio da atmosfera. Essa reatividade é aumentada com o aumento da temperatura.

A resistência à oxidação é uma característica primária de um bom óleo de têmpera, segundo BASHFORD & MILLS (1984), evitando a formação de borra, manchamento das peças e perdas por arraste; bem como modificações nas características de resfriamento do óleo.

Para DICKEN (1986), a presença de componentes metálicos no óleo de têmpera tem uma influência catalítica positiva. Os produtos da oxidação são complexos na natureza e incluem acidíferos e materiais insolúveis que podem afetar a taxa de resfriamento e causar corrosão, manchamento e formação de borra (lama).

Os efeitos da oxidação nos óleos de têmpera são apresentados no item II.4.3.

II.4 - Parâmetros que Influenciam o Resfriamento

II.4.1- Agitação

TOTTEN et al (1993), afirmou que a severidade de têmpera de um óleo pode ser afetada pela temperatura do banho e agitação. Esta severidade dada por um óleo pode ser modificada pelo grau de agitação

do fluido ao redor da peça. Mesmo sendo possível utilizar um óleo sem agitação, esta sempre deve ser empregada para se obter maior uniformidade de têmpera.

SEGERBERG (1988), relatou que as taxas de resfriamento na fase de vapor são naturalmente dependentes do tamanho das peças temperadas. Se forem peças de pequena espessura pode-se ainda obter alta dureza em toda a espessura, mesmo que o resfriamento seja realizado em um óleo de têmpera com uma longa fase de filme de vapor.

A agitação, segundo BERGMANN (1971); LASDAY (1976); BERGEN (1994) e HASSON (1995), proporciona um efeito sensível na velocidade de resfriamento. A agitação do banho de óleo aumenta a taxa de resfriamento. A quebra do filme de vapor é estimulada pelo fluxo de óleo contra a superfície da peça, acelerando desta maneira, o início do segundo estágio de resfriamento, aumentando a taxa de resfriamento nos dois primeiros estágios.

BERGEN (1994), afirmou também, que o aumento da agitação proporciona aumento da taxa de resfriamento na fase de convecção. Este efeito pode aumentar o risco de trincamento e, logo, uma excessiva agitação não deveria ser utilizada. A figura 04 mostra os efeitos da agitação em um óleo de têmpera.

KRISTOFFERSEN & SEGERBERG (1995), mencionaram que os diferentes graus de distorção, são resultado das variações na taxa do fluxo do óleo refrigerante, compreendidas na faixa de 0,2 a 0,6 m/s. Um exemplo ocorre quando as peças estão amontoadas; então, o fluxo do óleo será afetado, resultando na variação das distorções que ocorrerão nas peças, devido às suas correspondentes posições no tanque.

Finalizando, HILDER (1986), disse que a agitação é utilizada para que um teste torne-se mais real, aproximando-o das situações diárias que ocorrem nas indústrias e também, porque aumenta, consideravelmente, a reprodutibilidade dos testes.

FIGURA 04- Efeitos da Agitação em um Óleo de Têmpera.
BERGEN (1994).

II.4.2 - Temperatura do Banho

Alguns trabalhos, geralmente, mostram que a temperatura do banho é importante na distorção pós-têmpera, sendo esta última menor quanto maior a temperatura do banho.

HAMPSHIRE (1985), também mostrou que existe uma diminuição na distorção com o aumento da temperatura do óleo refrigerante. A principal causa do surgimento de distorções foi relatada como a criação de tensões internas pela não uniformidade da formação de martensita, originada por gradientes térmicos durante o resfriamento.

LASDAY (1976), disse que há efeito da temperatura do banho sobre o resfriamento no terceiro estágio, quando a peça aproxima-se da temperatura do banho, devido à influências nas propriedades do metal. A temperatura do banho é importante pois afeta características do meio de resfriamento tais como viscosidade, etc.

Segundo TOTTEN et al (1993), a influência da temperatura do banho na distorção e propagação de trincas, ainda não foi bem estudada.

Trabalhos recentes de BERGEN (1994), têm mostrado que nas modernas formulações de óleos de têmpera, a temperatura de operação não tem efeito significativo na velocidade de resfriamento. A figura 05 apresenta curvas que demonstram essa afirmação.

FIGURA 05- Influência da Temperatura do Banho de Óleo na Velocidade de Resfriamento. BERGEN (1994)

Entretanto, é conhecido que a temperatura tem grande influência na distorção e tem sido desenvolvidos óleos para aplicações em temperaturas mais elevadas, nas operações de martêmpera, como anteriormente comentado.

II.4.3 - Degradação do Óleo de Têmpera

Levando em consideração a degradação do óleo de têmpera as características do fluido podem mudar durante o uso por uma infinidade de razões. Muitas aumentam a taxa de resfriamento, particularmente durante a fase de convecção e, conseqüentemente, aumentam o risco de distorções e trincamento.

BERGEN (1994), citou a oxidação como uma das características da degradação do óleo. Esta oxidação reduz a estabilidade do filme de vapor aumentando a taxa de resfriamento; aumentando-se desta forma, o efeito do molhamento. A figura 06 mostra esse efeito.

FIGURA 06- Efeito da Oxidação na Taxa de Resfriamento.
BERGEN (1994).

TOTTEN et al (1993), afirmaram que todos os componentes orgânicos estão sujeitos à degradação sob condições de têmpera. A degradação química de um óleo é também relatada pelos próprios fabricantes. Esta degradação pode ser a perda progressiva de antioxidantes, ou a oxidação do componente principal do óleo ou ainda, a volatilização.

A degradação do óleo pode ser observada pelo operador pelo aumento da viscosidade e possíveis aumentos de borra e fluidez. Esta degradação também pode ser observada pela incapacidade de atingir a dureza desejada pós têmpera ou por aumento nas distorções e surgimento de trincas.

A degradação térmica ocorre quando as moléculas do óleo se dividem ou trincam devido ao intenso calor localizado, gerado durante a têmpera.

Após o uso prolongado, LASDAY (1976), afirmou que os óleos convencionais tendem a ter um aumento da molhabilidade e consequentemente das taxas de resfriamento. Adições de óleo novo dão estabilidade para a taxa de resfriamento e para o banho, fornecendo, novamente, uniformidade de têmpera.

Para os óleos acelerados a estabilidade pode diminuir devido à deterioração dos aditivos ou pela formação de resinas solúveis e ácidos. Novamente, a adição de óleo novo restaura as propriedades originais do fluido refrigerante.

Os resultados de muitas reações, para DICKEN (1986), manifestam com o depósito de carbono e ignitores. Os efeitos deste potencial de deterioração podem ser amenizados pela tecnologia de aditivos e um bom sistema de manutenção.

II.4.4 - Contaminação do Óleo de Têmpera

TOTTEN et al (1994), afirmaram que o óleo de têmpera tem seu desempenho dependente do tipo e quantidade de contaminantes. A química superficial interfacial é fortemente afetada com a presença de água no óleo de têmpera.

BERGEN (1994), relatou que a contaminação do óleo de têmpera com 0,05 % de água traz efeitos drásticos nas propriedades de resfriamento, pelo aumento das taxas de resfriamento, máxima, e na fase de convecção. A figura 07 mostra os efeitos da contaminação com água.

**FIGURA 07 - Efeito da Contaminação do Óleo por Água.
BERGEN (1994).**

Estudos de CANALE et al (1997), com óleos formulados pela Castrol, demonstraram que a contaminação do óleo de têmpera com água trás efeitos drásticos somente para os óleos convencionais. Relataram que para um óleo convencional, cuja taxa máxima de resfriamento era de 60°C/s, a contaminação com 2,5% de água levou essa taxa máxima para 75°C/s, aumentando significativamente, também, o terceiro estágio. No caso de óleos rápidos, não foi observada mudança das características de resfriamento, todavia ocorreu forte precipitação de partículas sólidas no fundo de recipiente.

Uma solução para este problema, segundo TOTTEN et al (1993), é o aquecimento do banho a temperaturas acima do ponto de formação de bolhas ou a sedimentação e drenagem da água.

Portanto é importante, particularmente em aplicações em que o controle de distorções é rígido, implementar uma monitoração regular do fluido refrigerante. No mínimo, devem ser feitos testes físicos para acidez e contaminação com água em óleos de têmpera e, na prática, uma

avaliação periódica das características do fluido refrigerante é altamente desejável.

PROTSIDIM et al (1988), estudaram a regeneração dos óleos industriais e concluíram que esta deve ser feita levando-se em consideração alguns fatores tais como determinação de quantidade de água e borra; destilação de pequenas frações em filtros de pressão. Analisando a qualidade do óleo a cada cinco dias, observaram que as propriedades físico-químicas praticamente não mudaram durante o período de dois meses de acompanhamento. As propriedades metalúrgicas dos aços tratados com esses óleos regenerados não foram alteradas.

A utilização de óleos minerais usados e regenerados na produção de meios de têmpera é uma das maneiras mais racionais de se reduzir o consumo e escassez de óleos minerais. Esta aplicação é importante sob o ponto de vista econômico e ecológico.

II.5 - Seleção do Óleo de Têmpera

CANALE et al (1995), afirmaram que a escolha adequada de um meio refrigerante no processo de têmpera é de fundamental importância, sendo feita basicamente sobre as características de resfriamento do meio líquido. Desta forma é de suma importância o conhecimento do comportamento dos meios refrigerantes durante os processos de extração de calor.

Havendo uma família estabelecida de meios de resfriamento, LASDAY (1976), afirmou haver a possibilidade de seleção do óleo de têmpera ou meio sintético apropriado que terá a capacidade de atingir propriedades desejadas nos materiais a serem tratados.

BASHFORD & MILLS (1984), relataram ser desejável, na prática, fluidos que apresentem, conforme já comentado, o primeiro estágio de

resfriamento curto. Preferencialmente, é selecionado o meio refrigerante que apresente o estágio de convecção coincidindo com a faixa de temperatura de transformação martensítica.

Alguns critérios para a escolha apropriada do óleo de têmpera são apresentados por TOTTEN et al (1993):

- Um óleo com taxa de resfriamento relativamente baixa deve ser usado para produtos de grandes seções circulares.
- Dependendo do método de resfriamento e agitação do óleo, a temperatura deste deverá ser ajustada para atingir uma viscosidade de 5 a 15 cSt.
- Ponto de fulgor mínimo deverá ser de aproximadamente 90°C, acima, da temperatura de trabalho do óleo.
- Se os produtos são aquecidos em um forno a ar, o óleo de têmpera será selecionado para dar brilho máximo.

SEGERBERG (1988), afirmou que para a escolha do óleo ideal de têmpera é importante lembrar-se que não somente o desempenho de endurecimento deve ser considerado, mas também aspectos de serviço como vida útil, molhabilidade, preço, etc.

II.6 - Medidas das Características de Resfriamento

O METALS HANDBOOK (1981), classifica os ensaios para os meios de têmpera em duas categorias: testes de poder de têmpera e testes de poder de resfriamento.

II.6.1 - Testes de Poder de têmpera

De acordo com o METALS HANDBOOK (1981) e BODIN & SEGERBERG (1993), existem alguns métodos para avaliar o poder de

têmpera de meios refrigerantes tais como testes de imersão e o ensaio Jominy.

Os testes de imersão utilizam-se de algumas práticas e normas apresentadas abaixo:

- Testes com amostras cilíndricas. Esta é uma prática comum nas oficinas de tratamentos térmicos. As dimensões e o material das amostras são escolhidos de acordo com o produto a ser temperado e o meio refrigerante utilizado.
- Testes com amostras cilíndricas escalonadas. Neste processo ao invés de utilizar amostras de diferentes diâmetros são usadas amostras escalonadas com dois ou mais diâmetros. As companhias francesas Peugeot e Renault utilizam, em seus estudos, amostras escalonadas de dois diâmetros.
- Testes com amostras cuneiformes. Este método foi desenvolvido pela Associação Francesa para Tratamentos Térmicos (ATTT). Foi submetido à normalização na França (NFT 60179) e depois internacionalmente em 1988.

A amostra é feita com aço 38C2 (Norma Francesa NF A 35-552). Depois de temperada a amostra é cortada em duas partes, longitudinalmente, e a dureza é medida em pontos definidos.

O ensaio Jominy (ISO 642 e ASTM A 255) usa água como meio refrigerante, e é normalmente, empregado para determinar a temperabilidade dos aços.

BOYER & CARY* (1988) apud BODIN & SEGERBERG (1993), relataram a existência de um ensaio Jominy modificado, utilizando-se do mesmo equipamento para a avaliação de meios refrigerantes.

Neste ensaio utiliza-se de uma amostra com dureza conhecida e são escolhidas as variações de meios refrigerantes. A vantagem desse

*BOYER, H. E. and CARY, P.R. (Editors). Quenching and Control of Distortion. *ASM International*. 1988

ensaio é permitir que os testes sejam conduzidos em um equipamento convencional.

Entretanto, as condições do ensaio diferem das condições normais da têmpera em tanques de líquido refrigerante. Por exemplo, uma fase de vapor instável será formada na superfície do metal em altas temperaturas, melhorando a fase de convecção.

Assim, esse método seria interessante para avaliar meios refrigerantes usados em têmpera por indução ou têmpera por spray, em que a fase de vapor, normalmente, não aparece.

II.6.2 - Testes do Poder de Resfriamento

Durante todos esses anos vários métodos tem sido desenvolvidos para simplificar as medidas do poder de resfriamento e o METALS HANDBOOK (1981), HEINS & MUELLER (1982), TOTTEN et al (1988) e BODIN & SEGERBERG (1993) relataram o General Motors Quenchometer (magnetic test), teste de arame quente, teste de intervalo de 5 s. e os testes de curvas de resfriamento.

II.6.2.1 - General Motors Quenchometer (Teste de Bola de Níquel)

CROUCHER (1990) e BODIN & SEGERBERG (1993), descreveram o uso do General Motors Quenchometer. O teste de bola de níquel, como é também chamado, consiste no aquecimento de uma bola de níquel de 22 mm de diâmetro a 885°C, que é suspensa por um arame e mergulhada em um bécker de 200 ml; contendo óleo que deverá estar entre 21 e 27°C. Um timer é ativado quando a bola passa por um sensor fotoelétrico. Um ímã em forma de ferradura é localizado na parte inferior do bécker, o mais próximo possível da bola de níquel. A medida que ocorre o resfriamento a bola passa pelo ponto de Curie, 354°C. Quando a

bola torna-se magnética, ela é atraída pelo imã, ativando outro sensor que pára o timer. O tempo do resfriamento para alcançar a temperatura de Curie é algumas vezes referido como taxa de extração de calor. Os resultados dos testes são usados para classificar os óleos como acelerados, convencionais, etc.

Segundo GILLIAND (1960), o procedimento deste ensaio se utiliza da propriedade conhecida como “Ponto de Curie”, temperatura na qual o ferromagnético perde seu magnetismo durante o aquecimento, normalmente 354 °C.

Maiores detalhes deste ensaio estão na ASTM D 3520.

A utilização deste ensaio não possibilita grande reprodutibilidade dos resultados, entretanto, estima-se que pela medida do tempo que a bola leva para chegar a 354°C é possível classificar os meios refrigerantes. Quanto maior o tempo, mais lento será o fluido refrigerante. A figura 08 apresenta esquema do equipamento.

FIGURA 08 - Princípio de Operação do GM Quenchotest.

TOTTEN et al (1993).

II.6.2.2 - Teste de Arame Quente e Teste de Intervalo de 5s

O Teste de arame quente segundo BODIN & SEGERBERG (1993) e o METALS HANDBOOK (1981), consiste no aquecimento de uma resistência de arame por uma corrente elétrica numa amostra de meio refrigerante. A corrente é aumentada constantemente e o poder de

resfriamento é indicado pela leitura da máxima corrente constante, medida por um amperímetro. Quanto maior a corrente apresentada pelo amperímetro, maior será o poder de têmpera. Um fluido refrigerante que possui maior capacidade de extração de calor, permite a passagem de correntes mais altas através do arame e, conseqüentemente, valores mais altos da corrente serão registrados.

Já o teste de intervalo de 5 s, consiste na imersão por cinco segundos de uma barra de metal em uma amostra de fluido refrigerante num tanque. O aumento de temperatura é notado. Isso é repetido para uma série de barras. Finalmente, uma barra de mesmo tamanho e material é completamente temperada em uma nova amostra, com o mesmo volume de fluido refrigerante. O poder de resfriamento é expresso pela razão entre o aumento médio da temperatura para as barras temperadas por cinco segundos e para a barra temperada completamente. Quanto maior o valor encontrado, maior o poder de têmpera do fluido refrigerante.

II.6.2.3 - Análise de Curvas de Resfriamento

Dentre os métodos anteriormente descritos, a análise de curva de resfriamento tem sido aceita como o método mais vantajoso de se descrever o complexo mecanismo de resfriamento.

RÉTI et al (1993), afirmaram que a avaliação do desempenho do meio refrigerante através da curva de resfriamento é uma prática muito informativa. Da curva de resfriamento resultante é dada a correspondente taxa de resfriamento, através do cálculo de sua primeira derivada, como descrito anteriormente, refletindo as características de remoção de calor do meio refrigerante.

As curvas de resfriamento proporcionam resultados como a curva da taxa de resfriamento, que permitem sua utilização para classificar o desempenho de resfriamento, de diferentes meios refrigerantes.

Para se descrever completamente o desempenho de um banho refrigerante é importante caracterizar os tempos para concluir cada estágio de resfriamento, bem como, as taxas de resfriamento durante cada estágio.

CASTROL (1994), analisou as curvas de resfriamento e concluiu que a severidade de têmpera é função de duas temperaturas características.

1. Temperatura de transição entre as fases de vapor e nucleação de bolhas.
2. Temperatura de transição entre as fases de nucleação de bolhas e convecção.

A figura 09 mostra essas temperaturas.

FIGURA 09 - Severidade de Têmpera em Função de Duas Temperaturas. CASTROL (1994).

Embora a severidade de têmpera caracterize o poder de resfriamento de meios refrigerantes, relações entre resfriamento e poder de têmpera podem ser observadas.

- Dois fluidos refrigerantes com a mesma temperatura ϕ_1 ; aquele que possuir menor temperatura ϕ_2 , terá maior poder de têmpera.
- Dois fluidos refrigerantes com mesma temperatura ϕ_2 ; aquele que possuir maior temperatura ϕ_1 , terá maior poder de têmpera.

Segundo DAKINS et al (1988), a forma mais favorável da curva de resfriamento é aquela que fornece propriedades metalúrgicas superiores; e seria atingida com minimização do estágio A, a maximização das taxas de resfriamento no estágio B e a minimização das taxas no estágio C.

Desde que o objetivo do tratamento térmico é maximizar a dureza, é essencial a diminuição das transformações de perlita ou bainita. A redução do estágio A é desejável para diminuir o tempo de permanência do metal quente na região de transformação de perlita. O aumento do estágio B tem a mesma finalidade, resfriando o metal diretamente da região austenítica para a região de transformação martensítica, tão rapidamente quanto possível. Já que a propensão para trincamento e distorções aumenta proporcionalmente com o aumento das taxas de resfriamento, é desejável diminuir as taxas no estágio C, quando o metal está na região de transformação martensítica.

Embora nenhuma técnica possa satisfazer todas as necessidades de avaliação e quantificação do desempenho dos meios refrigerantes, a análise do formato das curvas de resfriamento fornece uma ferramenta potencialmente forte.

Outros métodos de caracterizar meios de resfriamento são relatados por outros autores. Dentre eles, são citados o fator H de Grossmann, o HP introduzido pelo IVF (Swedish Institute of Production Engineering Research), índice Castrol, e outros, descritos a seguir.

II.6.2.4 - Fator de Severidade de Têmpera H

Como uma avaliação do poder de resfriamento, GROSSMANN et al (1939), introduziram o conceito de fator H, que é a transferência de calor equivalente, também chamado por GROSSMANN de fator de severidade de têmpera.

GROSSMANN et al (1939), METALS HANDBOOK (1981), BATES (1987), TOTTEN et al (1989), DAKINS et al (1989), BODIN & SEGERBERG (1993) e outros autores, relataram que o fator H de Grossmann é definido por:

$$H = h/2k$$

onde:

h = coeficiente de calor interfacial;

k = condutividade térmica do material.

O coeficiente de transferência de calor pode ser calculado, conforme HILDER (1987), usando-se duas aproximações:

- Aproximação analítica, baseando-se em propriedades físicas do fluido.
- Aproximações empíricas, baseando-se na temperatura superficial e condução dentro de uma peça temperada.

Muitos têm escolhido a segunda aproximação devido a sua eficácia experimental. Soluções para a primeira aproximação são para condições muito ideais, necessitando-se do conhecimento preciso de viscosidade, densidade, condutividade térmica do fluido e respectivo calor específico.

A segunda aproximação requer conhecimento da temperatura superficial da peça durante a têmpera. Devido a uma dificuldade prática na medida da temperatura superficial, ela é calculada usando a técnica de diferenças finitas para múltiplas temperaturas medidas com termopares

fixados em diferentes profundidades abaixo da superfície, ou por um simples termopar no centro da peça.

Tendo em vista as dificuldades encontradas nesses métodos, é clara a necessidade de uma aproximação mais pragmática para monitorar as características de resfriamento de meios refrigerantes. A simples medição da temperatura no centro da peça fornece uma representação média do que está ocorrendo na superfície da mesma. Este, que é o método mais comum para acessar as características de resfriamento de meios refrigerantes, é o princípio do "Wolfson Heat Treatment Centre Engineering Group".

Estas medidas, segundo HILDER (1987), HE QUN (1988) e BODIN & SEGERBERG (1993), são obtidas com o uso da sonda Wolfson. Esta sonda é feita com uma liga de Inconel 600. Este material produz grande reprodutibilidade nos testes, mas a diferença de temperatura entre a linha de centro e a superfície da sonda é considerável, pois a condutividade térmica do material é pobre.

Segundo MONROE & BATES* apud TOTTEN et al (1989), existem dois métodos de se calcular o fator H. Uma maneira é temperando barras, e então, calcula-se a razão entre os raios, não endurecido e total. O método não é vantajoso pois há variação da composição química do material das barras e também é um teste caro, onde todas as barras são sacrificadas após os ensaios.

Uma segunda maneira é calcular o fator H através da taxa de resfriamento no centro de uma barra monitorada.

LISCIC (1988), relatou a existência de outra maneira experimental de se calcular o valor H, exemplificada na figura 10. Comparou ainda, na prática, a intensidade de resfriamento de diferentes grupos de meios refrigerantes, encontrando problemas na aplicação do conceito de valor H.

*MONROE, R. W. and BATES, C. E., *Journal of Heat Treating*, December, 1983, p. 83-99.

FIGURA 10 - Princípio Experimental de Avaliação do Valor H. LISCIC (1988).

Quando se obtém o valor H da literatura, podem ocorrer os seguintes problemas:

- Normalmente não há valores tabelados para outros meios refrigerantes a não ser óleos, água e salmoura.
- A expressão nem sempre é suficientemente clara porque o valor 1,0 de H pode ser associado à água sem agitação, mas também a um óleo fortemente agitado.
- Os graus de agitação não são exatamente definidos.
- Existem diferentes valores de H tabelados para o mesmo meio refrigerante, dependendo das condições de temperatura.
- Nenhuma propriedade físico-química específica nem a temperatura do banho de óleo tem sido relatadas.

A tabela a seguir exhibe alguns valores de H:

**TABELA 01- SEVERIDADE DE TÊMPERA. VALORES DE H.
GROSSMANN (1935)**

	<i>Ar</i>	<i>Óleo</i>	<i>Água</i>	<i>Salmoura</i>
Nenhuma agitação	0,02	0,25 a 0,30	0,9 a 1,0	2
Pequena agitação	.....	0,30 a 0,35	1,0 a 1,1	2 a 2,2
Agitação moderada	.....	0,35 a 0,40	1,2 a 1,3	.....
Boa agitação	.....	0,4 a 0,5	1,4 a 1,5	.....
Forte agitação	0,05	0,5 a 0,8	1,6 a 2	.....
Violenta agitação	.....	0,8 a 1,1	4	5

Há tempos o valor H vem sendo usado para classificar meios refrigerantes em termos de “severidade de têmpera”, entretanto um fluido com alto valor de H nem sempre produzirá alta dureza após a têmpera.

II.6.2.5 - Método de Liscic

LISCIC (1988), elaborou um novo método para registro e medida da intensidade de têmpera aplicado a todos os meios refrigerantes, condições e técnicas de resfriamento. É baseado numa regra física na qual o fluxo de calor da superfície do corpo é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura, multiplicado pela condutividade térmica do material.

Isto pode ser expresso por:

$$\phi = \lambda \delta T / \delta N$$

onde:

ϕ = Densidade do fluxo de calor

λ = Condutividade térmica do material da sonda

$\delta T/\delta N$ = Gradiente de temperatura na superfície da sonda

Este experimento utiliza-se de uma sonda conhecida como LISCIC-NANMAC, com três termopares dispostos radialmente no mesmo plano longitudinal, no meio do comprimento da sonda. A figura 11 ilustra a sonda Liscic-Nanmac.

FIGURA 11 - Sonda Liscic-Nanmac. LISCIC (1988).

O termopar (T_n) mede a temperatura na superfície da sonda, já o intermediário (T_i) mede a temperatura em um ponto 1,5 mm abaixo da superfície e o terceiro (T_c), mede a temperatura no centro da seção transversal.

Para a medida da intensidade de tmpera, na prtica, a sonda aquecida at 850C e transferida rapidamente para o banho de meio refrigerante. Esta sonda conectada a um computador atravs de interface com 3 amplificadores e 3 conversores A/D.

Pelo registro da curva tempo/temperatura muito prxima superfcie, (T_n) e num ponto 1,5 mm abaixo desta (T_i), o gradiente de temperatura da superfcie pode ser calculado atravs de tcnicas de diferenas finitas.

II.6.2.6 - Índice Castrol

DECK & DAMAY* apud CASTROL (1994), recomendando o óleo de têmpera que possibilita melhores propriedades metalúrgicas, desenvolveu o Índice Castrol, que classifica óleos de têmpera sem a necessidade de um equipamento especial.

- O Índice Castrol pode ser definido como:

$$Ci = \frac{K' \times V_{m\acute{a}x}}{T_{m\acute{a}x} - T_{banho}}$$

onde:

K' = Constante do Equipamento.

$V_{m\acute{a}x}$ = Taxa Máxima de Resfriamento.

$T_{m\acute{a}x}$ = Temperatura em que ocorre a Taxa Máxima.

T_{banho} = Temperatura do banho de fluido refrigerante.

Determinação de K' :

$$K' = \frac{12 \times (T_{m\acute{a}x} - T_{banho})}{V_{m\acute{a}x}}$$

A constante do equipamento K' tem a função de calibração do equipamento, sendo encontrado o valor de 12 para Ci quando é utilizado o meio refrigerante padrão.

*Le Castrol Index: DECK, M. - DAMAY, P. *Revue Traitement Thermique*, n°253, mars, 1992.

II.6.2.7 - Fator Q de Bates

BATES (1987), demonstrou um procedimento geral de relacionar a curva de resfriamento e o diagrama CCT. O fator Q, para o alumínio, é calculado entre duas temperaturas, 150 e 450°C, usando a relação a seguir:

$$Q = \sum_{150}^{425} \Delta t / C_t$$

onde t é o tempo em segundos, C_t é a função que descreve a precipitação cinética da liga em estudo, e Q é o fator de têmpera.

Em geral, baixos valores do fator de têmpera Q são associados com alta taxa de dureza e altas propriedades de resistência., enquanto que para altos valores de Q, têm-se baixas taxas de dureza e poucas propriedades de resistência.

Enquanto esse método é uma forte ferramenta para avaliar têmpera em alumínio, trabalhos tem sido desenvolvidos para mecanismos de têmpera mais complexos, como o do aço.

II.6.2.8 - Valor V de Tamura

TAMURA* et al apud TOTTEN et al (1988), e TAMURA* et al apud BODIN & SEGERBERG (1993), desenvolveram o valor V para caracterizar a habilidade do banho refrigerante em endurecer o aço. A vantagem deste método sobre o de Grossmann é que o valor V inclui as características de transformação do aço sendo avaliado.

O valor V é calculado a partir da curva de resfriamento, utilizando também o diagrama contínuo resfriamento transformação (CCT), com a seguinte relação:

*TAMURA, I., SHIMIZU, N. and OKADA, T. A method to judge the quench-hardening of steel from cooling curves of quenching oils. *Journal of Heat Treating*. Dec. 1984, v. 3, N. 4, p. 335 -343.

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

onde:

T_c = Temperatura de início do estágio B.

T_d = Temperatura de início do estágio C.

T_s = Temperatura em que as transformações para o aço doce iniciam.

T_f = Temperatura onde essas transformações cessam e a transformação martensítica inicia.

O uso do valor V para caracterização de meios refrigerantes foi desenvolvido inicialmente para óleos, onde as taxas de resfriamento são similares para as temperaturas T_c e T_d . Meios refrigerantes sintéticos, exibem taxas de resfriamento diferentes para essas duas temperaturas. Desta forma, o método não pode ser aplicado para caracterizar curvas de resfriamento derivadas de meios refrigerantes sintéticos.

II.6.2.9 - PREDQUENCH SOFTWARE

Este programa, desenvolvido por RÉTI & GERGERLY (1991), baseia-se na aplicação do sistema de predição de propriedades. (PPS).

O programa introduzido em um computador pessoal simula os processos metalúrgicos que ocorrem durante o tratamento térmico e permite a predição da seqüência de transformação, da microestrutura e propriedades mecânicas.

Pode ser usado com eficiência para analisar a influência de diferentes parâmetros do processo (composição do aço, geometria, espessura, austenitização, condições de têmpera, etc.) na distribuição da microestrutura e nas propriedades mecânicas finais.

Possibilita também a seleção do tipo de aço e estabelecimento de métodos para o tratamento térmico, que proporcionarão as propriedades específicas.

Desde que o computador considere a influência de todos os fatores representados pela aquisição de dados, as propriedades resultantes podem ser estimadas mais precisamente.

II.6.2.10 - Sensor Supervisor de Têmpera

Um sensor muito simples desenvolvido por BRIEM* apud EDENHOFER (1997), que embora não seja capaz de medir a transferência de calor, é muito eficaz supervisionando a severidade de têmpera de um sistema de meio refrigerante durante sua produção.

O sensor consiste em dois termopares imersos em um tanque de líquido refrigerante, sendo um deles aquecido com uma corrente elétrica constante. Devido à extração de calor por convecção, causada pelo líquido ao redor do termopar, uma determinada temperatura será estabilizada no termopar aquecido, temperatura esta dependente da severidade de têmpera do meio refrigerante. Desta forma, a diferença de temperatura medida entre os termopares é a medida da severidade de têmpera do líquido refrigerante.

Assim, não é possível determinar com suficiente precisão o coeficiente de transferência de calor para esta diferença de temperatura. É contudo, possível, usar esse sensor como ferramenta de controle de qualidade. A figura 12 ilustra esse equipamento.

*BRIEM, K. Apparatus for surveying the intensity of the heat transfer between a fluid and an immersed body. *German patent 94 21 220 U1*, 01/04/1994.

FIGURA 12 - Sensor Supervisor de Têmpera. EDENHOFER (1997).

II.6.2.11- IVF Quencho test e HP

O IVF Quencho test é um equipamento desenvolvido pelo Swedish Institute of Production Engineering Research que utiliza uma sonda normalizada pela ISO DIS/9950 baseada na especificação do Wolfson Heat Treatment Centre Engineering Group.

A sonda, como descrito anteriormente, é feita com uma barra de Inconel 600 com 12,5 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento, com um termopar de isolamento mineral, tipo K, fixado em seu centro geométrico.

A figura 13 representa a sonda Wolfson.

FIGURA 13 - Sonda Wolfson - NORMA ISO DIS/9950. BODIN & SEGERBERG (1993).

O equipamento registra as curvas e taxas de resfriamento do meio refrigerante em estudo.

O poder de têmpera HP, segundo SEGERBERG (1988) e BODIN & SEGERBERG (1993), é baseado em medições feitas com a sonda normalizada pela ISO, como descrito anteriormente.

Para polímeros, SEGERBERG (1990), relatou o uso de um algoritmo, a seguir:

$$HP = k_1 CR_F + k_2 CR_M - k_3$$

onde:

k_1 k_2 k_3 = constantes.

CR_F = Taxa de resfriamento para o nariz perlita/ferrita ($^{\circ}C/s$)

CR_M = Taxa de resfriamento para temperatura de início de transformação de martensita ($^{\circ}C/s$).

Intencionados em facilitar a seleção do óleo de têmpera uma simples fórmula foi desenvolvida pelo IVF. É baseada em três pontos característicos da curva de resfriamento, sendo expressa por:

$$HP = k_1 + k_2 T_{vp} + k_3 CR - k_4 T_{cp}$$

onde:

T_{vp} = Temperatura de transição entre as fases de vapor e nucleação de bolhas ($^{\circ}C$).

CR = Taxa de resfriamento entre a faixa de temperatura entre 500 e 600 $^{\circ}C$ ($^{\circ}C/s$)

T_{cp} = Temperatura de transição entre a fases de nucleação de bolhas e convecção ($^{\circ}C$)

k_1 k_2 k_3 k_4 = constantes.

Este método é recomendado pelo International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering (IFHT), e a fórmula encontrada para aços não ligados é:

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

Um outro método de cálculo de HP pode ser expresso por:

$$HP = 99,6 - 0,17 O'_2 + 0,19 V_{400}$$

onde:

O'_2 = Temperatura de transição entre as fases de nucleação de bolhas e convecção (°C).

V_{400} = Taxa de resfriamento na temperatura de 400°C (°C/s).

O cálculo da temperatura de transição entre as fases de nucleação de bolhas e convecção, é exemplificado na figura 14.

FIGURA 14 - Método de Obtenção da Temperatura de Início do Terceiro Estágio de Resfriamento. TOTTEN et al (1988).

Utilizando-se o método recomendado pelo IFHT, o cálculo do poder de tmpera de um meio refrigerante simples e garante confiana e reprodutibilidade.

Para este trabalho foram escolhidos o cculo de HP, recomendado pelo IFHT; o valor V de Tamura, por utilizar pontos da curva de resfriamento relacionando-os com o diagrama CCT e pela facilidade de aplicao e confiana nos resultados; o ndice Castrol por tratar-se de uma tcnica aplicada a todos equipamentos e materiais; e a apreciao das taxas mximas de resfriamento.

Verifica-se que seria possvel avaliar os leos de tmpera nacionais segundo caractersticas importantes como ponto de fulgor, estabilidade trmica e oxidativa, entre outros.

Entretanto, o objetivo deste trabalho foi unicamente verificar quais as taxas de resfriamento, e com esses dados calcular o poder de tmpera desses leos, atravs de tcnicas desenvolvidas sobre os grficos Taxa de resfriamento X Temperatura, j descritos anteriormente.

No desenvolvimento deste trabalho no houve inteno de classificar os leos como melhores ou piores, havendo para isso, a necessidade de efetuar-se outros diversos ensaios que no foram escopo desta pesquisa.

III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 - Materiais utilizados.

Inicialmente foram contatadas as seguintes empresas fabricantes de óleos de têmpera:

- **CASTROL BRASIL S.A.**
- **COMPANHIA BRASILEIRA DE PETRÓLEO IPIRANGA**
- **ESSO BRASILEIRA DE PETRÓLEO S.A.**
- **HOUGHTON BRASIL S.A.**
- **QUAKER CHEMICAL IND. E COM. LTDA.**
- **INDÚSTRIA QUÍMICA BROWN S.A.**
- **MICRO QUÍMICA IND. E COM. LTDA.**
- **MOBIL OIL BRASIL IND. E COMÉRCIO**
- **PETRÓLEO BRASILEIRO S.A - PETROBRÁS**
- **TERMAX PAULISTA DE PETRÓLEO LTDA.**
- **TEXACO BRASIL S.A. PRODUTOS DE PETRÓLEO**
- **TIRRENO IND. E COM. DE PRODUTOS QUÍMICOS LTDA.**
- **SHELL BRASIL S.A.**

Destas empresas, nove, mostraram interesse em participar do trabalho, fornecendo os seguintes produtos:

COMPANHIA BRASILEIRA DE PETRÓLEO IPIRANGA.

- IPIRANGA BG - 784
- IPITEMP 70

CASTROL BRASIL LTDA.

- ILOQUENCH 32
- ILOQUENCH 1

HOUGHTON BRASIL LTDA.

- HOUGHTO QUENCH 130
- HOUGHTO QUENCH K
- HOUGHTO QUENCH KB

QUAKER CHEMICAL IND. E COM. LTDA.

- NEON 14
- NEON 32

MICRO QUÍMICA IND. E COM. LTDA.

- MICROTEMP 151
- MICROTEMP 152
- MICROTEMP 153
- MICROTEMP 157
- MICROTEMP 160
- MICROTEMP 170

TERMAX PAULISTA DE PETRÓLEO LTDA.

- ÓLEO TÊMPERA
- ÓLEO TÊMPERA 25
- ÓLEO TÊMPERA 1037/22
- ÓLEO TÊMPERA 1037/22 L
- ÓLEO TÊMPERA 1037/32
- ÓLEO TÊMPERA 1037/46

TEXACO BRASIL S/A PRODUTOS DE PETRÓLEO.

- QUENCHTEX C
- QUENCHTEX WW

TIRRENO IND. E COM. DE PRODUTOS QUÍMICOS LTDA.

- TIRROIL QUENCHING 727 A
- TIRROIL QUENCHING LTT 003 B-S

SHELL BRASIL S.A.

- VOLUTA C
- VOLUTA F

As características técnicas desses 27 (vinte e sete) tipos de óleos são dadas na tabela a seguir.

TABELA O2 - Características Técnicas
dos Óleos de Têmpera Nacionais

AMOSTRAS	VISCOSIDADE <i>a</i> 40°C (cSt)	PONTO DE FULGOR (°C)
IPIRANGA BG – 784	21,5	.....
IPITEMP 70	17,19	164
ILOQUENCH 32	.....	.....
ILOQUENCH 1	.....	.....
HOUGHTO QUENCH 130	27 – 34	160
HOUGHTO QUENCH K	18 – 22	170
HOUGHTO QUENCH KB	11 – 15	170
NEON 14	13 – 16	188
NEON 32	26 – 31	224
MICROTEMP 151	115	208
MICROTEMP 152	10	150
MICROTEMP 153	15	170
MICROTEMP 157	29	180
MICROTEMP 160	24	170
MICROTEMP 170	38	220
ÓLEO TÊMPERA	100	180
ÓLEO TÊMPERA 25	46	180
ÓLEO TÊMPERA 1037/22	22	180
ÓLEO TÊMPERA 1037/22 L	22	180
ÓLEO TÊMPERA 1037/32	32	180
ÓLEO TÊMPERA 1037/46	46	180
QUENCHTEX C	25,39	192
QUENCHTEX WW	20,80	204
TIRROIL QUENCHING 727 A	102	210
TIRROIL QUENCHING LTT 003 B-S	20	200
VOLUTA C	30,8	215
VOLUTA F	23,6	180

Os dados contidos nesta tabela foram fornecidos pelos fabricantes.

III.2 - Descrição dos Equipamentos

O equipamento utilizado para se medir as taxas de resfriamento foi um Quenchometer, fabricado pela empresa FAC. Conforme CURTI (1995), é um sistema de aquisição de dados informatizado que capta as variações de temperatura de uma sonda resfriada (tipo Wolfson, descrita anteriormente) mergulhada no meio em estudo e, os sinais são amplificados e transferidos para um computador via placa A/D.

Os dados temperatura X tempo são registrados em tempo real. Um software especialmente desenvolvido processa esses dados e apresenta a curva taxa de resfriamento X temperatura. Esses valores são armazenados em formato ASCII possibilitando a sua utilização posteriormente em planilhas de cálculo convencionais.

O sistema todo foi desenvolvido para ambiente Windows, apresentando uma interface bastante amigável com o usuário.

O sistema possibilita, dentre outras coisas, monitorar em tempo real as temperaturas do forno para aquecer a sonda, fluido e sonda. Este sistema é capaz de monitorar oito variáveis simultaneamente, tais como condutividade, velocidade de fluxo, etc; devido à capacidade da placa de aquisição de dados, que para esse sistema, é de oito variáveis.

O software controla também o forno, mantendo-o na temperatura do “set point” escolhido, através do acionamento de uma unidade de potência. A figura 15 apresenta uma vista geral do equipamento.

Outra característica do sistema é o ajuste do tempo de ensaio, pois, diversos fluidos diferentes podem ser analisados; sendo que para os polímeros, por exemplo, o tempo de ensaio pode ser menor do que para óleos.

FIGURA 15 - Vista geral do FACQUENCH

O sistema, permite também, o ajuste do fator K, fator esse, responsável pela calibração da sonda. É de praxe a calibração da sonda antes do ensaio de qualquer fluido refrigerante.

É possível, além disso, modificar a frequência com que os dados são lidos, dependendo do número de canais acionados. Para os oito canais acionados, é possível fazer até 30 leituras, em cada canal, simultaneamente, em 1 (um) segundo. Para a medição das características de resfriamento de um fluido refrigerante, a frequência de oito leituras por segundo possibilita uma boa precisão nas curvas.

Devido à necessidade de ensaiar-se as amostras em temperaturas de 60°C, utiliza-se também de uma chapa aquecedora e o controle da

temperatura durante esse aquecimento é feito com um termômetro especificado pela ASTM 11C.

III.3 - Procedimentos.

Conforme já comentado, inicialmente é feita a calibração da sonda para o ajuste do fator K, garantindo-se as medidas posteriores. A figura 16 mostra a tela de ajuste do fator K.

FIGURA 16 - Tela de Ajuste do Fator K

Essa calibração é repetida a cada dez ensaios, com o intuito de garantir a reprodutibilidade e principalmente a confiabilidade dos resultados.

Como meio de resfriamento padrão, foi escolhido um óleo mineral puro, que estando a 60°C deverá proporcionar uma taxa máxima, no

segundo estágio, de 60°C/s. Essa é uma calibração recomendada, podendo-se utilizar também água destilada, que nas mesmas condições deverá apresentar taxa máxima de 120°C/s.

Após o ajuste do fator K, as amostras são testadas, sendo realizados 3 (três) ensaios para cada amostra. Se as curvas obtidas não forem bastante próximas, nova calibração deve ser feita e, novamente, repetidos os três ensaios.

O volume das amostras utilizado é de 2 (dois) litros cada, volume esse ideal para o ensaio, segundo TAMURA et al (1994). Estas amostras são então aquecidas em uma chapa até a temperatura de 60°C. Atingindo essa temperatura, o recipiente com o óleo é transferido, ficando sob o suporte da sonda.

Nesta situação a temperatura passa então a ser controlada com um termopar, via computador.

O forno é mantido durante todo o ensaio na temperatura de 970°C, como descrito anteriormente. Isto porque, nesta temperatura, ocorre aquecimento mais rápido da sonda sem desgaste prematuro do forno.

Atingida a temperatura de 850°C, pela sonda, o sistema automaticamente fica preparado para o ensaio, mudando de tela e avisando sobre a temperatura da sonda. A figura 17 apresenta a tela de preparação de ensaio.

Quando a sonda é mergulhada no óleo ocorre a diminuição da temperatura daquela e quando passa pela temperatura de 850°C, o sistema inicia a leitura. Acompanha-se o ensaio, observando-se o desempenho do resfriamento. No final, o sistema processa os cálculos matemáticos e apresenta os resultados graficamente.

FIGURA 17 - Tela de Preparação do Ensaio

III.4 - Avaliação do Poder de Têmpera.

Tendo em mãos os resultados gráficos, apresentados pelo equipamento, pôde-se estimar, matematicamente, o valor do poder de têmpera propiciado por cada amostra, através das expressões matemáticas, descritas anteriormente:

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

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

$$Ci = \frac{K'Vmáx}{Tmáx - Tbanho}$$

Utilizando-se o método recomendado pelo IFHT, o cálculo do poder de têmpera de um meio refrigerante é simples e garante confiança e reprodutibilidade.

Para este trabalho foram escolhidos o cálculo de HP, recomendado pelo IFHT; o valor V de Tamura, por utilizar pontos da curva de resfriamento relacionando-os com o diagrama CCT e pela facilidade de aplicação e confiança nos resultados; o índice Castrol por tratar-se de uma técnica aplicada a todos equipamentos e materiais; e as taxas máximas de resfriamento.

O poder de têmpera para esse trabalho, também foi estimado pela apreciação dos valores das taxas máximas de resfriamento.

É bom lembrar que, o cálculo de HP está baseado nas temperatura de transição dos três estágios de resfriamento, enquanto que o valor V baseia-se nessas temperaturas e também nas temperaturas de transformação do aço doce.

Por outro lado, o valor de Ci, utiliza a taxa máxima de resfriamento e a temperatura em que esta ocorre, levando em conta também a temperatura do banho.

Portanto, classificações diferentes serão encontradas neste trabalho, mostrando que os óleos não são piores ou melhores, e sim encontram-se em determinadas faixas de trabalho.

IV - RESULTADOS

Com o objetivo de classificar os óleos de têmpera nacionais, é necessário ter-se em mãos dados que possibilitarão a execução dos cálculos desejados.

IV.1. - Apresentação dos Resultados.

Os resultados serão apresentados na forma de curvas de resfriamento e curvas da taxa de resfriamento X temperatura, em anexo.

Estas curvas são de extrema importância para os cálculos de poder de têmpera, fornecendo dados de grande utilidade como: taxa máxima de resfriamento, temperatura na qual a taxa máxima ocorre, temperatura de transição do primeiro para o segundo estágio e do segundo para o terceiro estágio de resfriamento.

Esses dados permitiram o cálculo do poder de têmpera (HP), do valor V de Tamura e do índice Castrol. Esses dados, somados com a simples apreciação dos valores das taxas máximas de resfriamento, serviram como método de classificação.

A seguir serão apresentadas algumas curvas da taxa de resfriamento X temperatura de óleos classificados como rápidos, intermediários e lentos e, também, de calibrações.

Da mesma forma apresentar-se-ão as classificações por Taxa máxima de resfriamento, Índice Castrol, valor V de Tamura e HP; assim como os valores das temperaturas de transição entre os estágios de resfriamento.

ÓLEOS RÁPIDOS

FIGURA 18 – Curva Taxa de Resfriamento Neon 14

Taxa Máxima: 79°C/s

FIGURA 19 – Curva Taxa de Resfriamento MICROTEMP 153

Taxa Máxima: 96°C/s

ÓLEOS RÁPIDOS

FIGURA 20 – Curva Taxa de Resfriamento ILOQUENCH 32

Taxa Máxima: 81°C/s.

FIGURA 21 – Curva Taxa de Resfriamento HOUGHTO QUENCH KB

Taxa Máxima: 104°C/s.

ÓLEOS RÁPIDOS

FIGURA 22 – Curva Taxa de Resfriamento QUENCHTEX C
Taxa Máxima: 93°C/s.

FIGURA 23 – Curva Taxa de Resfriamento VOLUTA F
Taxa Máxima: 80°C/s.

ÓLEOS INTERMEDIÁRIOS

FIGURA 24 – Curva Taxa de Resfriamento IPITEMP 70

Taxa Máxima: 69°C/s.

FIGURA 25 – Curva Taxa de Resfriamento HOUGHTO QUENCH 130

Taxa Máxima: 68°C/s.

ÓLEOS INTERMEDIÁRIOS

FIGURA 26 – Curva Taxa de Resfriamento 1037/22L

Taxa Máxima: 71°C/s.

FIGURA 27 – Curva Taxa de Resfriamento TIRROIL LTT 003 B-S

Taxa Máxima: 75°C/s.

ÓLEOS LENTOS

FIGURA 28 – Curva Taxa de Resfriamento NEON 32

Taxa Máxima: 60°C/s.

FIGURA 29 – Curva Taxa de Resfriamento MICROTEMP 157

Taxa Máxima: 52°C/s.

ÓLEOS LENTOS

FIGURA 30 – Curva Taxa de Resfriamento QUENCHTEX WW
Taxa Máxima: 60°C/s.

FIGURA 31 – Curva Taxa de Resfriamento VOLUTA C
Taxa Máxima: 57°C/s.

CURVAS DE CALIBRAÇÃO

FIGURA 32 – Curva de resfriamento ÓLEO PADRÃO a 60°C.

FIGURA 33 – Curva Taxa de Resfriamento ÓLEO PADRÃO
Taxa Máxima: 60°C/s.

V.2 - Apresentação dos Resultados Calculados Matematicamente

A tabela a seguir mostrará os resultados das taxas máximas dos óleos de têmpera e resultados calculados com os métodos apresentados anteriormente.

TABELA 03 - Valores Retirados e Calculados das Curvas de Resfriamento dos Óleos Nacionais(*).

<i>Amostras</i>	<i>Taxa máxima de Resfriamento(°C/s)</i>	<i>HP</i>	<i>V</i>	<i>Ci</i>
BG-784	65	246	0,60	13,1
IPITEMP 70	69	283	0,70	15,1
ILOQUENCH 1	60	082	0,58	11,9
ILOQUENCH 32	81	647	0,85	17,5
HOUGHTO QUENCH 130	68	279	0,65	13,6
HOUGHTO QUENCH K	79	677	0,85	15,1
HOUGHTO QUENCH KB	104	731	0,95	18,0
NEON 14	79	789	0,88	16,7
NEON 32	60	091	0,56	11,9
MICROTEMP 151	78	575	0,91	14,3
MICROTEMP 152	60	100	0,60	13,1
MICROTEMP 153	96	564	0,82	17,5
MICROTEMP 157	52	033	0,55	10,6
MICROTEMP 160	84	445	0,80	15,5
MICROTEMP 170	83	749	0,95	16,0
ÓLEO TÊMPERA	68	108	0,68	11,6
ÓLEO TÊMPERA 25	65	253	0,70	12,3
1037/22	68	304	0,71	13,4
1037/22 L	71	406	0,74	14,7
1037/32	68	306	0,71	13,0
1037/46	68	248	0,69	13,2
QUENCHTEX C	93	570	0,91	16,2
QUENCHTEX WW	60	055	0,55	13,1
TIRROIL LTT 003 B-S	75	266	0,65	14,9
TIRROIL 727 A	90	856	1,00	16,9
VOLUTA C	57	008	0,53	12,1
VOLUTA F	80	812	0,94	17,3

* Os valores desta tabela não podem ser utilizados de maneira direta. Os maiores valores não significam melhores propriedades de resfriamento.

IV.3 - Apresentação das classificações:

A seguir serão apresentadas tabelas com as classificações por taxa de resfriamento, índice Castrol, valor V de Tamura e poder de têmpera (HP).

**TABELA 04 - Classificação por
Taxa Máxima de Resfriamento (°C/s)**

<i>Amostras</i>	<i>Óleos rápidos</i>	<i>Óleos intermediários</i>	<i>Óleos lentos</i>
Houghto Quench KB	104		
Microtemp 153	96		
Quenchtex C	93		
Tirroil Q. 727 A	90		
Microtemp 160	84		
Microtemp 170	83		
Iloquench 32	81		
Voluta F	80		
Neon 14	79		
Houghto Quench K	79		
Microtemp 151	78		
Tirroil Q. LTT 003 B-S		72	
Termax 1037/22L		71	
Ipitemp 70		69	
Termax 1037/22		68	
Termax 1037/32		68	
Termax 1037/46		68	
Houghto Quench 130		68	
Óleo Têmpera 25		65	
Ipiranga BG-784		65	
Óleo Têmpera		65	
Microtemp 152			60
Iloquench 1			60
Quenchtex WW			60
Neon 32			60
Voluta C			57
Microtemp 157			52

TABELA 05 - Classificação por Índice Castrol

<i>Amostras</i>	<i>Óleos rápidos</i>	<i>Óleos intermediários</i>	<i>Óleos lentos</i>
Houghto Quench KB	18,0		
Microtemp 153	17,5		
Iloquench 32	17,5		
Voluta F	17,3		
Tirroil Q. 727 A	16,9		
Neon 14	16,7		
Quenchtex C	16,2		
Microtemp 170	16,0		
Microtemp 160		15,5	
Houghto Quench K		15,1	
Ipitemp 70		15,1	
Tirroil Q. LTT 003 B-S		14,9	
1037/22L		14,7	
Microtemp 151		14,3	
Houghto Quench 130		13,6	
1037/22		13,4	
1037/46		13,2	
BG-784		13,1	
Microtemp 152		13,1	
Quenchtex WW		13,1	
1037/32		13,0	
Óleo Têmpera 25			12,3
Voluta C			12,1
Iloquench 1			11,9
Neon 32			11,9
Óleo Têmpera			11,6
Microtemp 157			10,6

TABELA 06 - Classificação por Valor V

<i>Amostras</i>	<i>Óleos rápidos</i>	<i>Óleos intermediários</i>	<i>Óleos lentos</i>
Tirroil Q. 727 A	1,00		
Houghto Quench KB	0,95		
Microtemp 170	0,95		
Voluta F	0,94		
Microtemp 151	0,91		
Quenchtex C	0,91		
Neon 14	0,87		
Houghto Quench K	0,85		
Iloquench 32	0,82		
Microtemp 153	0,81		
Microtemp 160	0,80		
1037/22L		0,74	
1037/32		0,71	
1037/22		0,71	
Ipitemp 70		0,71	
Óleo Têmpera 25		0,70	
1037/46		0,69	
Óleo Têmpera		0,68	
Houghto Quench 130		0,65	
Tirroil Q. LTT 003 B-S		0,65	
BG-784			0,60
Microtemp 152			0,60
Iloquench 1			0,58
Microtemp 157			0,56
Neon 32			0,56
Quenchtex WW			0,55
Voluta C			0,53

TABELA 07 - Classificação por HP

<i>Amostras</i>	<i>Óleos rápidos</i>	<i>Óleos intermediários</i>	<i>Óleos lentos</i>
Tirroil Q. 727 A	856		
Voluta F	812		
Neon 14	789		
Microtemp 170	749		
Houghto Quench KB	731		
Houghto Quench K	677		
Iloquench 32	647		
Microtemp 151	575		
Quenchtex C	570		
Microtemp 153	564		
Microtemp 160		445	
1037/22L		405	
1037/32		306	
1037/22		304	
Ipitemp 70		283	
Houghto Quench 130		279	
Tirroil Q. LTT 003 B-S		266	
Óleo Têmpera 25		253	
1037/46		247	
BG-784		246	
Óleo Têmpera			108
Microtemp 152			100
Neon 32			91
Iloquench 1			82
Quenchtex WW			55
Microtemp 157			33
Voluta C			8

IV.4 - Apresentação Gráfica dos Resultados

As figuras a seguir mostram, graficamente, os valores apresentados nas tabelas 04 a 07 e as temperaturas de transição entre os três estágios de resfriamento.

FIGURA 34 - Classificação por Taxa Máxima de Resfriamento

FIGURA 35 - Classificação por Índice Castrol

FIGURA 36 - Classificação por Valor V

FIGURA 37 - Classificação por HP

FIGURA 38 - Temperatura de transição do primeiro para o segundo estágio de resfriamento (°C).

FIGURA 39 - Temperatura de transição do segundo para o terceiro estágio de resfriamento (°C).

V - DISCUSSÃO

Dentre os métodos apresentados na revisão bibliográfica para a execução de cálculo de valores que possibilitem classificações, existem alguns que necessitam de equipamentos especiais e/ou sondas com configurações diferentes daquela utilizada. Por este motivo e por insegurança quanto a confiabilidade dos métodos, esses não foram usados.

Assim, os métodos para classificação escolhidos englobam a taxa máxima de resfriamento, o Índice Castrol, o valor V de Tamura e o HP.

Este trabalho não verificou a influência da degradação dos óleos de tempera nacionais, tornando-se válidos, os resultados, apenas para amostras novas.

Foram utilizados fatores empíricos para a determinação das transições entre as classificações, que empregaram a taxa máxima de resfriamento, os valores encontrados com os métodos matemáticos e as temperaturas de transição entre os estágios de resfriamento.

Classificaram-se os óleos como rápidos e lentos; enquanto que os intermediários assim foram denominados, a fim de exercer uma ligação entre os anteriores.

V.1 - Classificação por Taxa Máxima de Resfriamento

A avaliação do comportamento de resfriamento dos óleos através da taxa máxima de resfriamento não é muito eficiente, pois é necessário que seja observada em que temperatura essa taxa máxima ocorre, para posteriormente comparar ao gráfico de transformação CCT do aço a ser

tratado. Muitas vezes óleos com menores taxas de resfriamento possuem a taxa máxima localizada no “nariz” da curva CCT, ponto este bastante crítico no tratamento térmico de têmpera, enquanto que outros com maiores taxas apresentam a taxa máxima muito deslocada em relação ao ponto anteriormente citado. Neste caso, óleos com taxas menores conseguem melhores resultados práticos do que aqueles que apresentavam maiores taxas de resfriamento.

Deve ser lembrado que, para os diversos tipos de aços, as temperaturas de transformação são diferentes, ou seja, apresentarão diferentes posicionamentos das curvas CCT. Assim, para o exemplo citado, podem ocorrer variações quando da mudança do aço a ser temperado.

A tabela 04 apresenta os valores das taxas máximas de resfriamento alcançadas pelos óleos de têmpera.

Foram classificados como óleos rápidos aqueles que apresentaram taxa máxima de 104°C/s até 78°C/s, como intermediários os que apresentaram taxas de 72°C/s até 65°C/s e como lentos aqueles com taxas de 60°C/s a 52°C/s. Dos 27 (vinte e sete) óleos ensaiados, 11 (onze) classificaram-se como rápidos, 10 (dez) como intermediários e 6 (seis) como lentos.

Como já comentado, é necessário ser feita uma análise mais detalhada da curva de resfriamento; portanto, outros métodos foram escolhidos a fim de se mostrar que, simplesmente, as taxas de resfriamento não devem ser utilizadas como ferramenta de classificação e sim como orientação.

V.2 - Classificação por Índice Castrol

O Índice Castrol permite uma avaliação mais detalhada em relação a simples apreciação da taxa de resfriamento, pois utiliza além da taxa de

resfriamento, a temperatura onde essa ocorre e a temperatura do banho, tornando mais completo o estudo do comportamento no resfriamento. Entretanto, deve ser mencionado que existe a mesma preocupação em relação ao gráfico CCT, já descrita para a classificação anterior.

Para esse índice é também necessário o cálculo de uma constante do equipamento, que neste caso foi de 99,4.

Na tabela 05 estão expressos os valores obtidos com esse método.

Foram classificados como óleos rápidos aqueles que apresentaram valores de 18,0 até 16,2; como intermediários os que apresentaram valores de 15,5 até 13,0 e como lentos aqueles com índices de 12,3 até 10,6.

Para essa classificação há algumas inversões de posicionamentos com relação à anterior (taxa máxima de resfriamento), mas os óleos ainda permanecem classificados dentro das faixas anteriormente apresentadas, à exceção do MICROTEMP 160, 151 e HOUGHTON QUENCH K, que mudaram de faixa de trabalho.

Essa mudança na ordem dos óleos é natural, pois o cálculo utiliza, como já comentado, outros fatores além da taxa máxima de resfriamento. A mudança de faixa de trabalho apresentada por alguns é facilmente explicada pela posição que ocupavam anteriormente, ou seja, na interface entre as classificações.

V.3 - Classificação por Valor V

O valor V não utiliza a taxa máxima de resfriamento. Entretanto, neste método, dá-se mais importância para o comportamento do resfriamento no seu segundo estágio, relacionando-o com as transformações no aço doce. Para TAMURA, que introduziu o valor V, quanto maior o segundo estágio melhor será o desempenho de

resfriamento do óleo de têmpera, já que utiliza os valores de temperatura de transição do segundo para o terceiro estágio de resfriamento.

Assim, quanto mais baixa esta temperatura, maior o valor V . Isto significa que altos valores de V seriam indicados para aços com baixa temperatura M_s . Embora haja esse benefício para alguns tipos de aços, para outros a temperatura de início de transformação martensítica, M_s , é maior que as temperaturas de início de terceiro estágio obtidas com os óleos classificados como rápidos e alguns intermediários. Desta forma, o uso desses óleos que apresentam um segundo estágio muito longo, invadindo a faixa de transformação martensítica, aumenta o risco de surgimento de distorções e trincas.

Os resultados são apresentados na tabela 06.

Foram classificados como rápidos os óleos com valor V de 1,00 a 0,80, como intermediários aqueles com valor V de 0,74 a 0,65 e como lentos os que apresentaram valores de 0,60 até 0,53.

Em comparação com a classificação por taxa máxima de resfriamento observa-se que os óleos permaneceram todos classificados nas respectivas faixas de trabalho, mudando-se apenas a ordem em que eles aparecem nas respectivas faixas.

Em relação à classificação por índice Castrol, mudaram de faixa de trabalho, MICROTEMP 160 e HOUGHTON QUENCH K, ÓLEO TÊMPERA 25, ÓLEO TÊMPERA, QUENCHTEX WW, MICROTEMP 152 e BG-784, enquanto que os outros permaneceram nas faixas de trabalho anteriormente classificadas.

A ordem dos óleos nas respectivas faixas de trabalho, foi alterada, em relação às classificações anteriores, pelos mesmos motivos apresentados anteriormente.

V.4 - Classificação por HP

Esse método, introduzido pelo IVF, como já relatado; assim como o valor V, utiliza da observação do comportamento do segundo estágio de resfriamento, entretanto, não o relaciona com transformações em aços doces, mas usa uma taxa de resfriamento em 550°C/s, segundo BODIN & SEGERBERG (1993).

Assim como TAMURA, BODIN & SEGERBERG parecem não ter percebido a importância da temperatura de início do terceiro estágio de resfriamento. Este e o outro método favorecem aqueles óleos que possuem o segundo estágio longo e, para o cálculo de HP, àqueles que possuam a temperatura de início de terceiro estágio mais baixa. Entretanto isso não é a mesma coisa, pois, alguns óleos possuem o primeiro estágio curto, alongando o segundo estágio, mas com a temperatura de início do terceiro estágio alta. Este é o caso apresentado pelo HOUGHTON QUENCH KB. Inversamente, o óleo NEON 14, apresenta o primeiro estágio longo, o segundo razoavelmente curto e o terceiro estágio curto, com a temperatura de início deste, muito baixa, o que faz com que seja classificado como mais rápido em relação ao anterior.

É importante salientar que os óleos que apresentam o comportamento ideal, segundo o cálculo de HP, mostrarão a curva de resfriamento semelhante a da água, apenas com a taxa de resfriamento mais baixa, mas com o terceiro estágio curto, característica essa que, como já comentado, favorece o risco de distorções e trincamento.

Os resultados obtidos com esse método estão na tabela 07.

Classificaram-se como óleos rápidos aqueles com HP de 856 a 564, intermediários os de HP 445 até 246 e como lentos os que apresentaram HP de 108 até 8.

Comparando com as classificações anteriores, observa-se, em relação à classificação por taxa máxima de resfriamento mudança de faixa

de trabalho para o MICROTEMP 160 e ÓLEO TÊMPERA. Para a classificação por índice Castrol, houve mudança de faixa de trabalho do MICROTEMP 151, HOUGHTO QUENCH K, MICROTEMP 152, QUENCHTEX WW e ÓLEO TÊMPERA 25. Relacionado com o valor V, houve mudança de faixa de trabalho para o MICROTEMP 160, ÓLEO TÊMPERA e BG-784. Todos os outros óleos em relação às outras classificações, permaneceram classificados como antes.

Todas essas mudanças de faixa de trabalho em relação às classificações anteriores são motivadas pelos parâmetros utilizados para esse cálculo.

Outro fator que é levado em conta apenas pelas últimas duas classificações é a observação das temperaturas de transição entre os estágios de resfriamento.

Nas figuras 38 e 39 podem ser observadas essas temperaturas.

Geralmente ocorre que os óleos mais rápidos tem o segundo estágio mais longo, com a temperatura de início do segundo estágio mais alta e a temperatura de início do terceiro estágio de resfriamento mais baixa, em relação aos demais.

Nota-se que essa afirmação procede, analisando os resultados apresentados anteriormente.

Para os óleos lentos a afirmação anterior é invertida, sendo a temperatura de início de segundo estágio mais baixa e, para o início do terceiro estágio, mais alta.

No caso dos óleos intermediários, essas temperaturas também estão numa faixa intermediária.

É claro, e lógico, que exceções sempre ocorrerão.

Sendo assim, não é possível caracterizar um óleo de têmpera sem considerar as suas temperaturas de transição entre os estágios de resfriamento.

V.5 - Discussões finais

O que se pôde verificar desses métodos utilizados é que não existe um único índice que possa designar com precisão uma classificação absoluta (padrão) dos óleos.

Entretanto, deve ser observado que as curvas de resfriamento apresentadas neste trabalho, em anexo, foram obtidas em prática de laboratório; sem agitação. Estes valores não são condizentes com a realidade prática de fábrica, onde o tratamento de têmpera é realizado em tanques de grande dimensão, com agitação.

Desta forma, este trabalho deve ser utilizado como uma ferramenta que facilita a escolha do meio refrigerante ideal para determinada aplicação.

Índices que supervalorizam a taxa máxima de resfriamento tendem a situar os óleos num ranking mais ou menos semelhante, como é o caso da taxa máxima e do Índice Castrol.

Observa-se que de acordo com esses índices, o HOUGHTON QUENCH KB aparece como sendo o óleo mais rápido e o MICROTEMP 157 como o mais lento de todos.

Já o HP e o valor V de Tamura, que consideram outros pontos da curva de resfriamento, também apresentam classificações semelhantes, embora com algumas alterações em posicionamentos.

Deve ser relatado que os valores encontrados para o valor V são referentes ao uso de aço carbono 1040 e, para os valores de HP referem-se aos aços não ligados, de uma maneira geral.

De acordo com essas classificações pode-se observar que o TIRROIL QUENCHING 727 A apresenta-se como o óleo mais rápido e o VOLUTA C como sendo o mais lento.

Isto demonstra que dependendo do método utilizado o índice obtido trará uma classificação diferente. No caso dos óleos rápidos, o

HOUGHTO QUENCH KB aparece em primeiro lugar na classificação por taxa máxima e por Índice Castrol, em segundo no caso do Valor V, caindo para quinto na classificação por HP.

O mesmo acontece para os óleos intermediários em que o TIRROIL QUENCHING LTT 003 B-S aparece em primeiro lugar para a classificação por taxa máxima de resfriamento, em quarto para o Índice Castrol, em último lugar para o valor V e, em sétimo, para o HP.

No caso de óleos lentos o exemplo é dado pelo VOLUTA C, apresentando-se em último lugar para as classificações por HP e valor V, em quinto para a taxa máxima de resfriamento e em segundo na classificação por Índice Castrol.

As classificações obtidas com cada método de cálculo diferem entre si, mas as características particulares de cada óleo analisado fazem com que sempre permaneçam relacionados nas respectivas faixas de trabalho, propostas pelos fabricantes.

Entretanto, como já observado e comentado, alguns óleos, às vezes, mudam de faixa de trabalho, dependendo do método de cálculo utilizado. Isto ocorre porque esses óleos estão situados numa interface entre as faixas de trabalho.

De uma maneira geral, estão disponíveis óleos de têmpera nacionais para as mais diversas aplicações, sendo óleos rápidos, intermediários e lentos, atendendo cada faixa a um determinado número de aplicações; aplicações estas definidas pelos fabricantes, mas, nem sempre, respeitadas pelos usuários.

Esses óleos são desenvolvidos atentando para o conjunto; propriedades mecânicas desejadas, composição química e geometria da peça, impossibilitando, desta forma, aplicações bem sucedidas, nas quais, o conjunto citado não é respeitado.

A maioria dessas empresas formuladoras de óleos de têmpera, fabricam óleos especiais, no intuito de atender as necessidades do cliente.

Esses óleos especiais, propositadamente, não foram inclusos no trabalho. Se o fossem, obter-se-iam índices adicionais que engrossariam ainda mais estas faixas de trabalho. Entretanto tal situação tornaria a classificação muito extensa e praticamente impossível, já que a cada dia novas formulações são concebidas, motivo pelo qual optou-se pela inclusão dos óleos, somente, comerciais.

No intuito de escolher-se o melhor fluido refrigerante para determinada aplicação, os valores encontrados nas classificações não proporcionam uma escolha eficaz, restando ao usuário a realização de uma análise detalhada da curva de resfriamento do fluido desejado relacionando esta com a curva CCT do(s) material(is) a ser(em) temperados.

VI - CONCLUSÃO

- Conclui-se, primeiramente, que os métodos escolhidos para a execução dos cálculos, não são absolutos. Cada um apresenta valores particulares, formando, desta maneira, quatro classificações diferentes.
- A classificação por taxa máxima de resfriamento é, somente, um referencial.
- O índice Castrol, assemelha-se ao método anterior, tomando como ponto importante, a temperatura na qual ocorre a taxa máxima de resfriamento. Entretanto, é mais completo. Por outro lado, quanto menor o valor daquela temperatura, apresentada por um óleo, maior será o valor de C_i .
- Diferente dos anteriores, o valor V mostra valores muito específicos, atentando, apenas, para o segundo estágio de resfriamento. Quanto maior o segundo estágio apresentado por um óleo de têmpera, maior será o valor de V .
- A classificação por HP difere da anterior apenas quanto à utilização das temperaturas de transição entre os estágios de resfriamento. Enquanto aquela beneficia óleos com segundo estágio longo, esta caracteriza de melhor forma óleos com a temperatura de início de terceiro estágio mais baixa.

- É de grande importância a observação das temperaturas de transição entre os estágios de resfriamento. Sem considerar os efeitos dessas temperaturas é impossível uma caracterização completa dos meios de resfriamento.
- Não existem óleos de têmpera melhores e piores, e sim, óleos classificados em determinadas faixas de trabalho, nas quais, existem aplicações e recomendações, que levam em conta a composição do material, geometria da peça e propriedades desejadas, definidas pelos fabricantes aos seus usuários.

VII - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar têmpera em barras de aços carbono e ligados de dimensões e geometria variáveis, comparando os resultados obtidos através de análise microestrutural, com os resultados apresentados por este trabalho, verificando, desta forma, a autenticidade dos métodos de cálculo utilizados.
- Fazer estudo verificando a influência do envelhecimento e da contaminação nas propriedades de resfriamento dos óleos.
- Realizar estudo comparativo entre ensaios com e sem agitação observando as influências benéficas e maléficas de cada método.
- Designar para os óleos de têmpera nacionais suas principais aplicações, nas faixas de trabalho em que foram classificados.
- Realizar estudo comparativo entre óleos minerais e soluções de polímeros, definindo as vantagens e desvantagens de cada meio de resfriamento.
- Avaliar a taxa de agitação, relacionando com os ensaios realizados neste trabalho, verificando as possíveis alterações.

VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASHFORD A., and MILLS, A.J. The Development of improved additives for quenching oils using laboratory simulations. *Heat Treatment of Metals*, p. 9 - 14, 1984.1.

BATES, C. E. Selecting quenchants to maximize tensile properties and minimize distortion in aluminum parts. *Journal of Heat Treating*, vol 5, nº1, p. 27-40, 1987.

BERGEN, R. T. von. The effects of quenchant media selection and control on the distortion of engineered steel parts. *Materials Science Forum*, Vols. 163- 165, p. 139-150, 1994.

BERGMANN, H. R. Importance of agitation for optimum quenching. *Metals Engineering Quartely*, p. 205-207, May 1971.

BUCHMAYR, B., and, KIRKALDY, J. S. Modeling of the temperature field, transformation behavior, hardness and mechanical response of low alloy steels during cooling from the austenite region. *Journal of Heat Treatment*. N. 8, p. 127-136, 1990.

BODIN, J., and SEGERBERG, S. Measurement and evaluation of the power of quenching media for hardening. *Heat Treatment of Metals*, vol. 20, n. 1, p. 15-23, January 1993.

BURGESS, P. B. Choosing a quenching oil. *Metal Progress*, p. 67-69, December 1967.

CASTROL FRANCE S.A. "*Traitement thermique*" Le Pecq, Castrol - France, 01/1994.

CROUCHER, T. Comparing methods of testing quench oil performance. *Heat Treating*, vol. 22, p. 17-19, December 1990.

CANALE, L. de C. F., CRNKOVIC, O. R., CANALE, A. C., e GROESSLER, J. B. Características de resfriamento de soluções de polímero para têmpera. In: 50º CONGRESSO ANUAL DA ABM, São Pedro, SP, 01 à 04 de Agosto de 1995. *Anais*, vol. 2, p. 517-529, Agosto de 1995.

CANALE, L. de C. F., CRNKOVIC, O. R., GROESSLER, J. B., e CURI, N. S. de M. Curvas e taxas de resfriamento no controle do tratamento térmico de têmpera. III CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA, Havana, Cuba, Septiembre 1997.

CURI, N. S. de M., Sistema Informatizado para caracterização dos meios de resfriamento, In 50º Congresso Anual da ABM, São Pedro, SP. De 01 à 04 de Agosto de 1995.

DAKINS, M. E., BATES, C. E., and TOTTEN, G. E. Calculation de Grossmann hardenability factor from quenchant cooling curves. *Metallurgia* 56, vol 12, december 1989.

DAKINS, M. E., TOTTEN, G. E., and HEINS, R. W. Cooling curve shape analysis can help evaluate quenchants. *Heat Treating*, p. 38-39, December, 1988.

DICKEN, T.W. Modern quenching olis: na overview. *Heat Treatment of Metals*, vol.13, p. 6-8, 1986.

EDENHOFER, B. The role of sensors in heat tretment. *Heat Treatment of Metals*, p. 7 - 11, 1997.1.

GILLILAND, H.J. Measuring quenching rates with the eletronic quenchemeter. *Metal Progress*, p. 111-113, October 1960.

GROSSMANN, M. A. Hardenability and quenching. *Principles of Heat Tratment. American Society for Metals*, p.45 - 116, 1935.

GROSSMANN, M. A., ASIMOW, M., and URBAN, S. F. Hardenability it's a relation to quenching, and some quantitative data. *Hardenability of Alloy Steels. American Society for Metals*, p. 124 - 190, 1939.

HAN, S. W., KANG, S. H., TOTTEN, G. E., and WEBSTER, G. M. Immersion time quenching. *Advanced Materilas & Processes*, vol. 148, n. 3, p. 42AA-42DD, September 1995.

HASSON, J. Quench system design factors. *Advanced Materials & Processes*, vol. 148, n. 3, p. 42S-42O, September 1995.

QUN, H. On cooling process of Wolfson test Probe. Proceedings of the 6th International Congress on Heat Treatment of Materials. *Heat Treatment and Surface Engineering*, p. 151 - 155, september 1988.

HEINS, R. W. and MUELLER, E. W. Characterization of polymer quenchants by cooling curves. *Metal Progress*, p. 33 -39, september 1982.

HILDER, N. A., Polymer quenchants - a review. *Heat Treatment of Metals*, vol. 13, p. 15-26, 1986.

HILDER, N. A., The Behaviour of Polymer Quenchants. *Heat Treatment of Metals*, vol. 2, p. 31-46, 1987.

HOPKINS, A. D., and RILLEY, D. Hardenability re-examined. *Iron and Steel*, vol. 42, p. 287-296, October 1969.

KOBASKO, N. I., Basics of intensive quenching. *Advanced Materials & Processes*, vol. 148, n. 3, p. 42W-42Y, September 1995.

KRAUSS, G. Principles of Heat Treatment of Steel, Cap. 6 - Hardness and Hardenability, p. 127-160, ASM - American Society for Metals, 1980

KRISTOFFERSEN, H., and SEGERBERG, S. Designed experiments to study distortion, hardness and their variations in hot-oil-quench carburising. *Heat Treatment of Metals*, vol. 27, p. 39-42, 1995.

LASDAY, S. B. Metal quenching with oils and synthetic media. *Industrial Heating*, p. 8-19, October 1976.

LISCIC, B. A new method to measure and record the quenching intensity in workshop practice. Proceedings of the 6th International Congress on Heat Treatment of Materials. *Heat Treatment and Surface Engineering*, p. 157 - 166, 1988.

METALS HANDBOOK, 9th edition, vol.4 (Heat Treating), Cap. Quenching of Steel p. 36-69, American Society for Metals, 1981.

PLACEK, D. G. The use of phosphate ester quench oils for improved antiwear properties and safety considerations. *Lubrication Engineering*, vol. 51, 7. P. 611-616, July, 1995.

PROTSIDIM, P.S., RUDAKOVA, N. Ya., and SHEREMETA, B. K. Regenerated oils as base of quenching media. *Metal Science and Heat Treatment*, p. 86-88, July, 1988.

RÉTI, T., TAKÁCS, J., and RÉGER, M. Quantitative characterization of quenching performances. *Heat Treating*, v. 25, n.2, p. 24 - 28, february 1993.

RÉTI, T., and GEGERLY, M. Computerised process planning in heat treatment practice using personal computers. *Heat Treatment of Metals*, p.117 - 121, 1991.4.

SEGERBERG, S. O., Classification of quenching oils: a method of comparison. *Journal of Heat Treating*, v.20, n.12, p. 30 - 33, december 1988.

SEGERBERG, S. O., The hardening power of polymer quenchants and its prediction. *Heat Treatment of Metals*, v. 17, p. 67, 1990.3

SEGERBERG, S. O., and BODIN, J. Investigation of quenching conditions and heat transfer in the laboratory and in industry. Quenching and Carburising. Proceedings of the Third International Seminar of the International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering. p. 177-188, Melbourne, 1991.

TAMURA, I., FUKUHARA, K., and ASADA, S. Comparative study of cooling curves with JIS silver specimens and alloy 600 specimens in relation to additive effectiveness. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 3, p. 367 - 370, june 1994.

TENSI, H. M., and STICH A. Characterization of polymer quenchants. *Heat Treating*, vol. 25, n. 5, p. 25-29, May 1993.

TENSI, H. M., STICH A., and TOTTEN G.E. Fundamentals of Quenching. Metal. *Heat Treating*, p. 20-28, Mar./Apr. 1995.

TKACHUK, T. I., SHEREMETA, B. K., and ORAZOVA, M. R. The state and prospects of devising quenching petroleum oils. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 32, n. 5-6, p. 400-402, November 1990.

TOTTEN, G. E., DAKINS, M. E., and HEINS, R. W. Cooling curve analysis of synthetic quenchants. *Journal of Heat Treating*, v. 6, n. 2, p. 87 - 95, 1988.

TOTTEN, G. E., DAKINS, M. E., and JARVIS, L. M. How H factors can be used to characterize polymers. *Heat Treating*, p. 28 -29, December 1989.

TOTTEN, G. E., BATES, C. E., and CLINTON, N. A. *Handbook of quenchants and quenching technology*. Cap: Quenching Oils, p. 129-169, ASM International, 1993.

TOTTEN, G. E., and LALLY, K. S. Proper Agitation Dictates Quench Success - Part 1. *Heat Treating*, vol. 24, n. 9, p. 12-17, September 1992.

TOTTEN, G. E., WEBSTER, G. M., and GOPINATH, N. Effect of agitation. *Advanced Materials & Processes*, vol. 149, n. 2, p. 73-76, February, 1996.

TOTTEN, G. E., WEBSTER, G. M., and ULISSES, C. Chemistry of Quenching, In: 49° CONGRESSO INTERNATIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS, São Paulo, 1994. *Anais* P. 241-253, 1994.

VIII.1 - Obra consultada

CHIAVERINI, V. *Aços e Ferros Fundidos*. 6ª. edição, ABM, 1990.

EVANCHO, J. W., and STALEY, J. T. Kinectics of precipitation in aluminium alloys during continuos cooling. *Metallurgical Transactions*, vol.5, p.43-47, January, 1974.

Heat Treatment'87. Proceedings of the International Conference included in Material's 87. Royal Lancaster Hotel, London , 11 - 15 may, 1987.

KREITH, F. *Principles of Heat Transfer*, International Textbook Company, 1965.

SILVA, A. L. da C. e, MEI, P. R. *Aços e Ligas Especiais*. 2ª. edição, Eletrometal S. A. Metais Especiais, 1988.

SRIMONGKOLKUL, V. Is the a need for really clean oil in quenching operations?. *Heat Treating*, vol. 22, p. 27-28, December 1990.

TOTTEN, G. E., BATES, C. E., and CLINTON, N. A. *Handbook of quenchants and quenching technology*. Cap: Introduction to Heat Treating of Steel, p. 01-33, ASM International, 1993.

TOTTEN, G. E., BATES, C. E., and CLINTON, N. A. *Handbook of quenchants and quenching technology*. Cap: Measuring Hardenability and Quench Severity, p. 35-68, ASM International, 1993.

TOTTEN, G. E., BATES, C. E., and CLINTON, N. A. *Handbook of quenchants and quenching technology*. Cap: Cooling Curve Analysis, p. 69-128, ASM International, 1993.

TOTTEN, G. E., BATES, C. E., and CLINTON, N. A. *Handbook of quenchants and quenching technology*. Cap: Impeller Agitation, p. 413-439, ASM International, 1993.

IX - ANEXO

Os resultados, a seguir, representam todas as curvas de resfriamento e respectivas derivadas dos óleos de têmpera analisados. Será apresentada apenas uma curva de cada amostra, de três, obtidas nos ensaios. Foram escolhidas as curvas que apresentaram maiores taxas de resfriamento e possibilitaram melhores resultados nos cálculos matemáticos .

Curva de Resfriamento IPIRANGA BG-784 a 60°C

**Taxa de Resfriamento IPIRANGA BG-784 a 60°C
(Taxa máxima: 64°C/s)**

Curva de Resfriamento IPITEMP 70 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento IPITEMP 70 a 60°C.
(Taxa máxima: 69°C/s)**

Curva de Resfriamento ILOQUENCH 1 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento ILOQUENCH 1 a 60°C.
(Taxa máxima: 60°C)**

Curva de Resfriamento ILOQUENCH 32 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento ILOQUENCH 32 a 60°C.
(Taxa máxima: 81°C/s)**

Curva de Resfriamento HOUGHTO QUENCH 130 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento HOUGHTO QUENCH 130 a 60°C.
(Taxa máxima: 68°C/s)**

Curva de Resfriamento HOUGHTO QUENCH K a 60°C.

**Taxa de Resfriamento HOUGHTO QUENCH K a 60°C.
(Taxa máxima: 79°C/s)**

Curva de Resfriamento HOUGHTO QUENCH KB a 60°C.

Taxa de Resfriamento HOUGHTO QUENCH KB a 60°C.

(Taxa máxima: 104°C/s)

Curva de Resfriamento NEON 14 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento NEON 14 a 60°C.
(Taxa máxima: 79°C/s)**

Curva de Resfriamento NEON 32 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento NEON 32 a 60°C.
(Taxa máxima: 60°C/s)**

Curva de Resfriamento MICROTEMP 151 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento MICROTEMP 151 a 60°C.
(Taxa máxima: 78°C/s)**

Curva de Resfriamento MICROTEMP 152 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento MICROTEMP 152 a 60°C.
(Taxa máxima: 60°C/s)**

Curva de Resfriamento MICROTEMP 153 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento MICROTEMP 153 a 60°C.
(Taxa máxima: 96°C/s)**

Curva de Resfriamento MICROTEMP 157 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento MICROTEMP 157 a 60°C.
(Taxa máxima: 52°C/s)**

Curva de Resfriamento MICROTEMP 160 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento MICROTEMP 160 a 60°C.
(Taxa máxima: 84°C/s)**

Curva de Resfriamento MICROTEMP 170 a 60°C.

Taxa de Resfriamento MICROTEMP 170 a 60°C.

(Taxa máxima: 83°C/s)

Curva Resfriamento TERMAX ÓLEO TÊMPERA a 60°C.

**Taxa de Resfriamento TERMAX ÓLEO TÊMPERA a 60°C.
(Taxa máxima: 65°C/s)**

Curva de Resfriamento TERMAX ÓLEO TÊMPERA 25 a 60°C.

Taxa de Resfriamento TERMAX ÓLEO TÊMPERA 25 a 60°C.
(Taxa máxima: 65°C/s)

Curva de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/22 a 60°C.

**Taxa de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/22 a 60°C.
(Taxa máxima: 68°C/s)**

Curva de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/22 L a 60°C.

Taxa de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/22 L a 60°C.
(Taxa máxima: 71°C/s)

Curva de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/32 a 60°C.

Taxa de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/32 a 60°C.
(Taxa máxima: 68°C/s)

Curva de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/46 a 60°C.

FIGURA 59 - Taxa de Resfriamento ÓLEO TÊMPERA 1037/46 a 60°C.
(Taxa máxima: 68°C/s)

Curva de Resfriamento QUENCHTEX C a 60°C.

**Taxa de Resfriamento QUENCHTEX C a 60°C.
(Taxa máxima: 93°C/s)**

Curva de Resfriamento QUENCHTEX WW a 60°C.

**Taxa de Resfriamento QUENCHTEX WW a 60°C.
(Taxa máxima: 60°C/s)**

Curva de Resfriamento TIRROIL QUENCHING 727 A a 60°C.

**Taxa de Resfriamento TIRROIL QUENCHING 727 A a 60°C.
(Taxa máxima: 90°C/s)**

Curva de Resfriamento TIRROIL QUENCHING LTT 003 B-S a 60°C.

**Taxa de Resfriamento TIRROIL QUENCHING LTT 003 B-S a 60°C.
(Taxa máxima: 75°C/s)**

Curva de Resfriamento VOLUTA C a 60°C.

**Taxa de Resfriamento VOLUTA C a 60°C.
(Taxa máxima: 57°C/s)**

Curva de Resfriamento VOLUTA F a 60°C.

**Taxa de Resfriamento VOLUTA F a 60°C.
(Taxa máxima: 80°C/s)**