

MEIOS DE RESFRIAMENTO



LAURALICE DE CAMPOS FRANCESCHINI CANALE

OS MEIOS DE RESFRIAMENTO NA TÊMPERA

Histórico

Função do resfriamento

Meios

Mecanismos de resfriamento

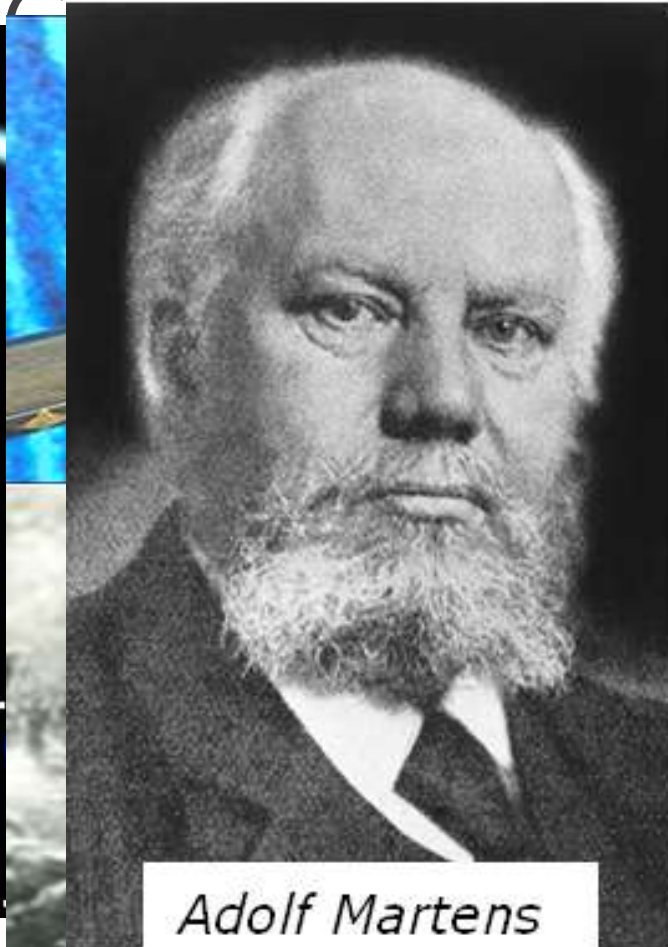
Problemas relacionados a não uniformidade

Transferência de calor

Processos e meios não convencionais



HISTÓRICO



Adolf Martens

1850-1914



HISTÓRICO

4

- Mitos



- Verdades:

- Aço de Damasco (desde 330AC)
- Espadas e facas feitas em Toledo (século IX)
- Outros meios de resfriamento

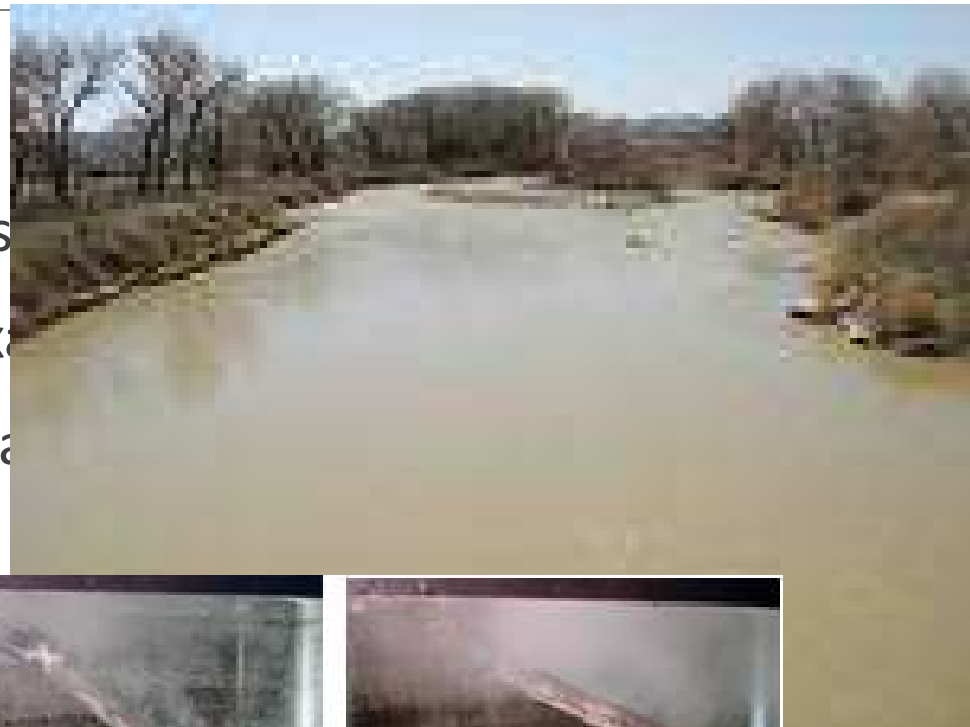
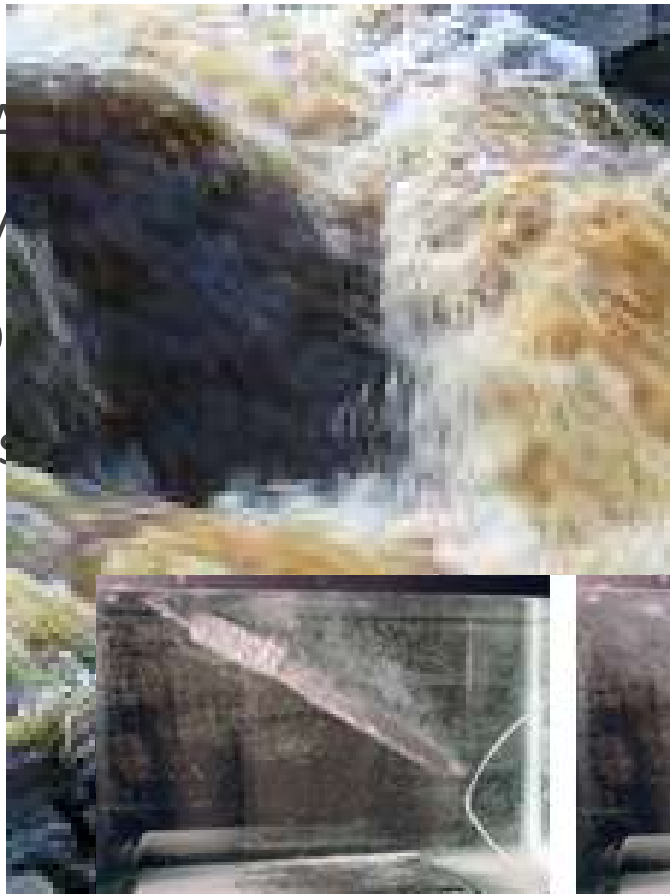




CHINA HISTÓRICO

J
M
D
(es

os
ax
da



A têmpera e os meios de resfriamento

Processo de têmpera envolve dois processos diferentes, com mútua interação entre eles:

DINÂMICA DA TAXA DE EXTRAÇÃO DE CALOR

Constante mudança do fluxo de calor dentro da peça e da transferência de calor na superfície

CINÉTICA DA TRANSFORMAÇÃO DE ESTRUTURAS

Mostrada para cada composição de aço pelo seu respectivo diagrama CCT

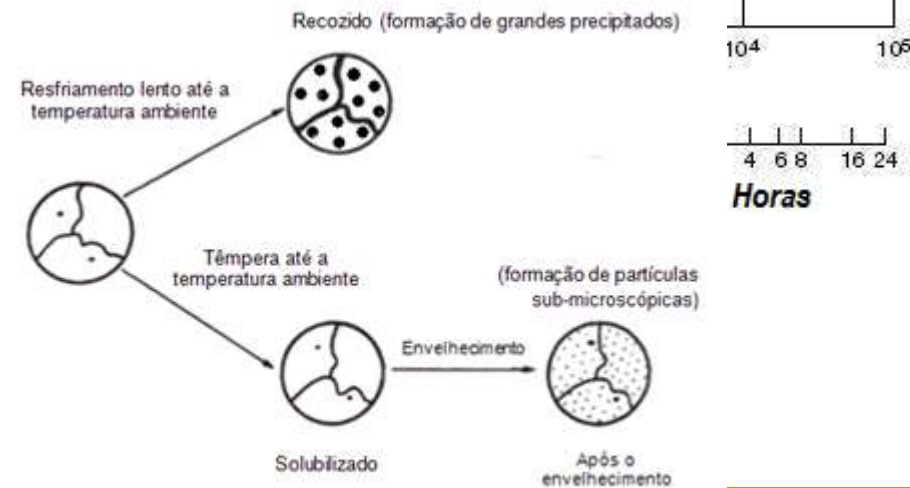
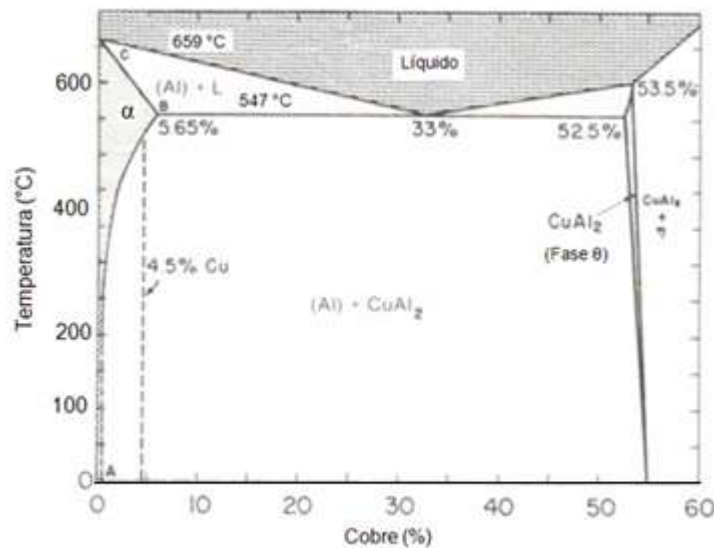
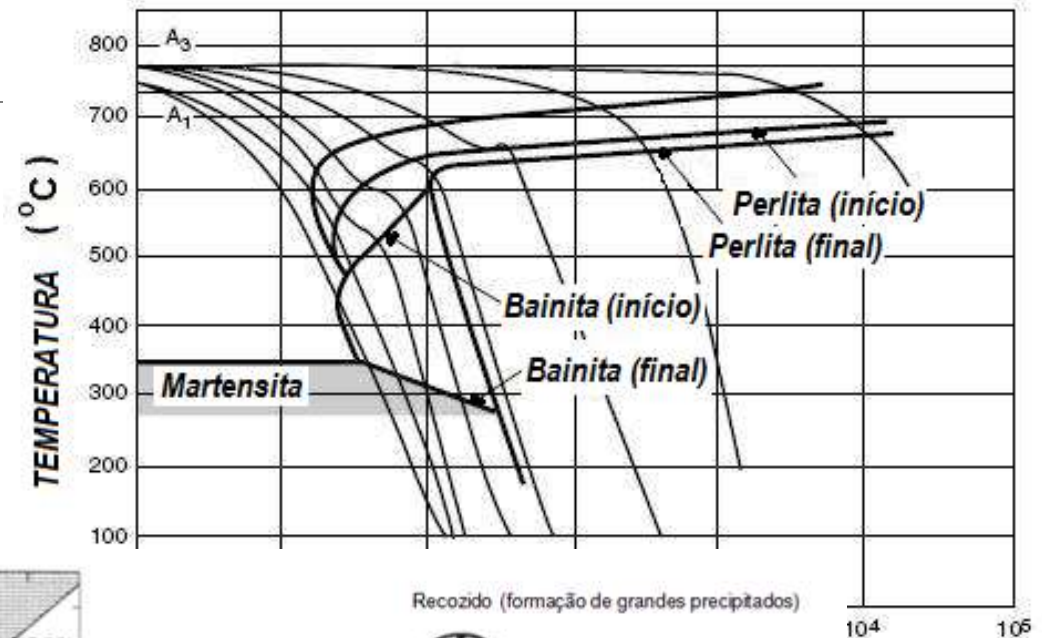
.

Função do resfriamento

Têmpera do aço



Têmpera do aço



Tipos de meios de resfriamento

Seleção do meio:

Distorções

X

Taxa de transferência de calor

A técnica que gera mínimas distorções não gera altas taxas de transferência de calor e vice-versa



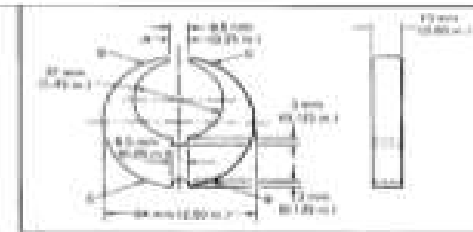
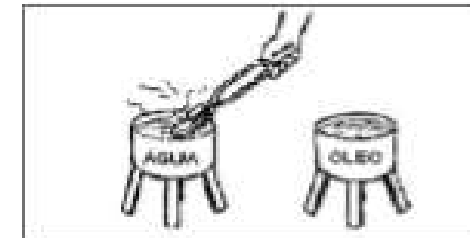
Resfriamento

- A taxa de resfriamento na têmpera varia bastante, indo desde a água (aços carbono), até ao ar, no caso de aços ferramenta.
- O resfriamento na têmpera deve ser ajustado, tendo-se em mente o compromisso entre a dureza especificada e as deformações aceitáveis.



Resfriamento

- A taxa de resfriamento na têmpera varia bastante, indo desde a água (aços carbono), até ao ar, no caso de aços ferramenta.
- O resfriamento na têmpera deve ser ajustado, tendo-se em mente o compromisso entre a dureza especificada e as deformações aceitáveis.



MEIO DE TEMPERA	DUREZA (HRC)	VARIAÇÃO DIMENSIONAL (MM)		
		A	φB	φC
ÁGUA	63/62	0.3404	0.2591	0.2146
ÓLEO RÁPIDO	66/63	0.0533	0.0813	0.0639
ÓLEO CONVENCIONAL	65/63	0.0559	0.0965	0.0765

Aço SAE 1085

Tipos de meios de resfriamento

Ar

<i>Tamanho do forno</i>	<i>Coeficiente de transferência de calor (W/m².K)</i>		
	<i>15 - bar nitrogênio</i>	<i>25 - bar hélio</i>	<i>25-bar hidrogênio</i>
<i>40.6X40.6X61 cm</i>	<i>650</i>	<i>1500</i>	<i>2000</i>

G. Belinato, L. C.F. Canale ,G. E. Totten. **Gas quenching**. In: Quenching Theory & Technology, 2nd Edition. Editors: Tensi, Canale and Totten.

Tipos de meios de resfriamento

Meios vaporizáveis

Água

Óleo

Soluções de polímero

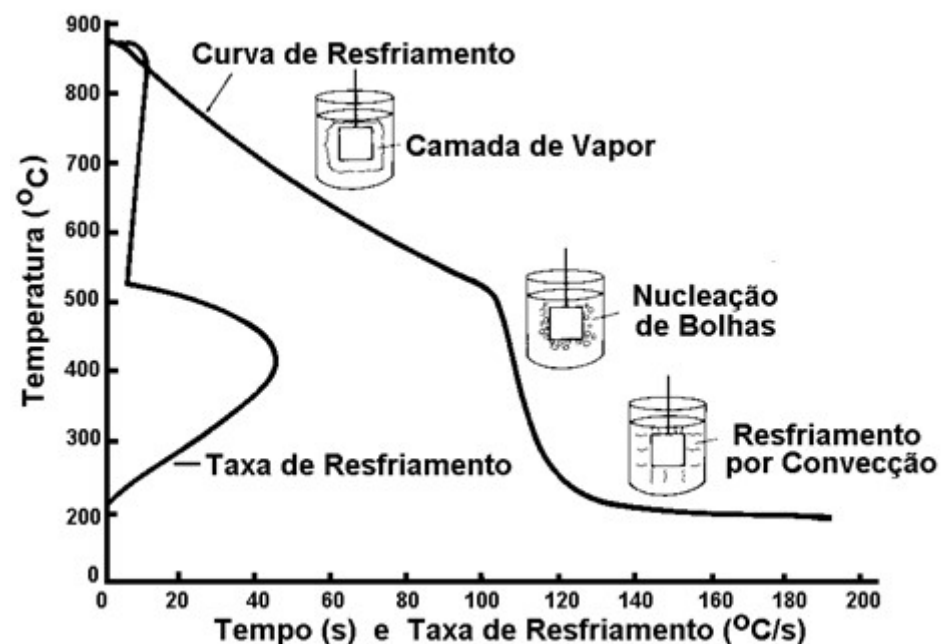
Soluções de sais

Canale, L. C. F.; Crnkovic, O. R.; Canale, A.C.; Groessles, J. B. (1996). **Características de resfriamento de soluções de polímeros para têmpera**. M&M – Metalurgia e Materiais, 52 (455), 4p.

Canale, L. C. F.; Ruggieri, J. E.; Crnkovic, O. R.; Totten, G. E. (2002). **Quenching oils: classification of quench severity**. Heat Treatment of Metals, China, 27(2), 4p.

Canale, L. C. F.; Totten, G. E. (2005). **Quenching technology: a selected overview of the current state-of-art**. Materials Research, 8 (4), 5p.

Mecanismos de Resfriamento

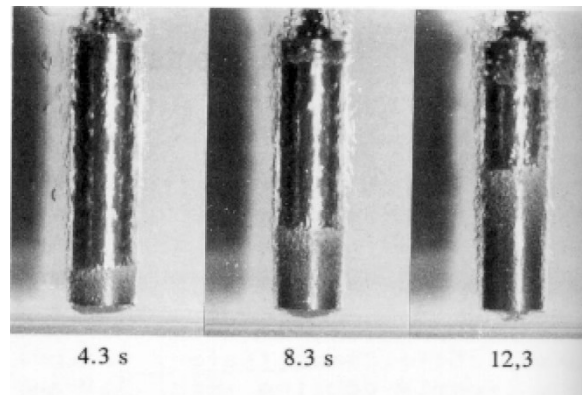
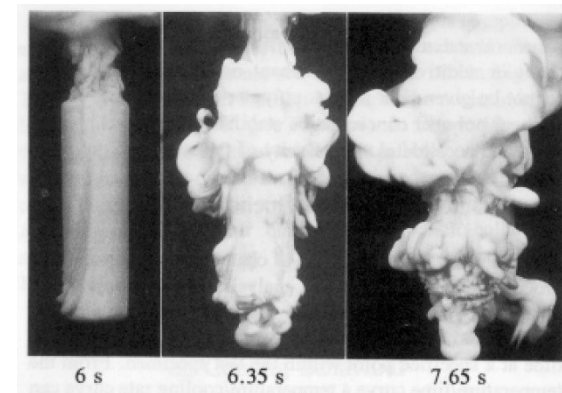
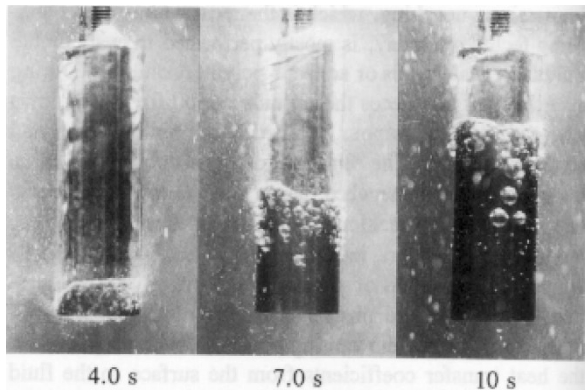


$100 - 200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$10.000 - 20.000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$700 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

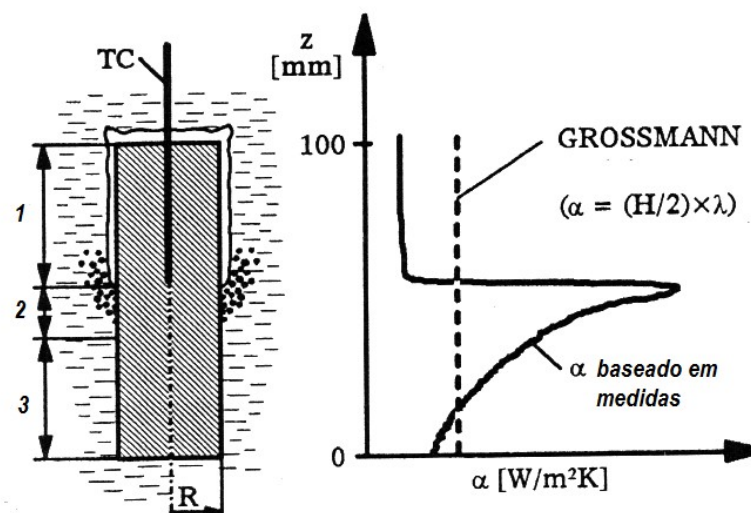
Mecanismos de Resfriamento



Mecanismos de Resfriamento

Frente de molhamento

Não homogeneidade



Fonte de distorção e trincas

Canale, L.C.F.; Luo, X.; Yao, X.; Totten, G. E. (2010) Quenchant Characterization by Cooling Curve Analysis. Journal of ASTM International, 6 (2), 29p.

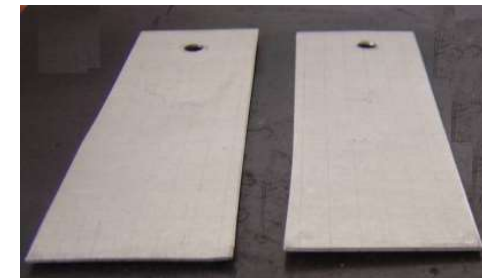
Problemas relacionados a não uniformidade

•Distorção de chapas de alumínio

Meio de têmpera: água quente a 70°C, agitação média.

Meio de têmpera : água a 30°C, agitação média.

Meio de têmpera : solução aquosa de polímero 12% a 40°C, agitação média.



Kavalco, P.; Canale, L. C. F. (2008). **Estudos de distorção, dureza e corrosão intergranular de ligas de alumínio aeronáuticas.** Relatório de iniciação científica da FAPESP. 52p.Trabalho apresentado no IV TTT (temas em tratamentos térmicos)

Problemas relacionados a não uniformidade

Distorções e trincas

Tensões residuais

Expansão – Contração

Resistência – Temperatura

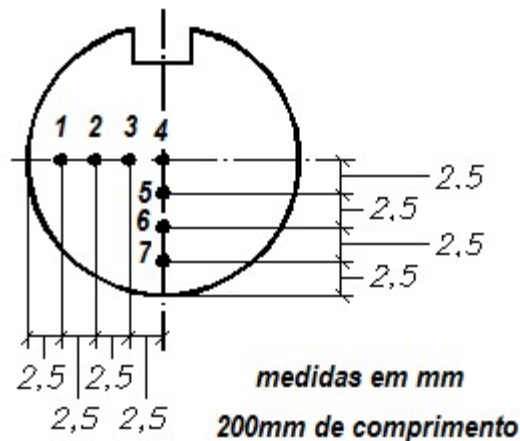
Volume da fase transformada

Severidade – Secção

Canale, L.C.F.; Totten, G.E. (2005). **Overview of distortion and residual stress due to quenching process part I: factors affecting quench distortion.** International Journal of Materials and Product Technology, 24 (1-4) 48p.

Problemas relacionados a não uniformidade

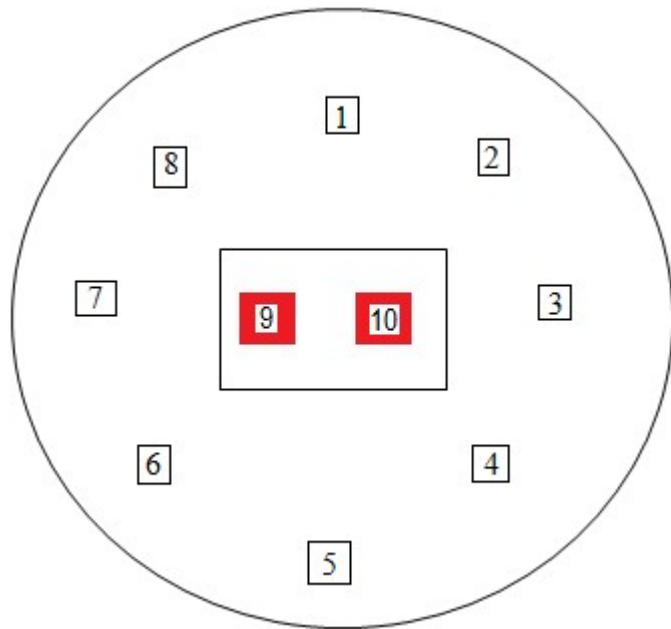
Distribuição invertida da dureza



Pontos de medição de dureza	Condições de têmpera		
	T30	T60	T90
Dureza 1	63,0	63,0	62,0
Dureza 4	65,0	64,5	64,0
Dureza 7	63,0	62,0	62,0
Dureza Invertida	Sim	Sim	Sim

Chiquete, C. M.; Canale, L.C.F., Totten, G. E.; Ventura, J. M. (2010). DUREZA INVERTIDA EM AÇOS PARA MOLAS .
Trabalho a ser apresentado no 18th IFHTSE. Rio de Janeiro, 25 a 30 julho.

Problemas relacionados a não uniformidade



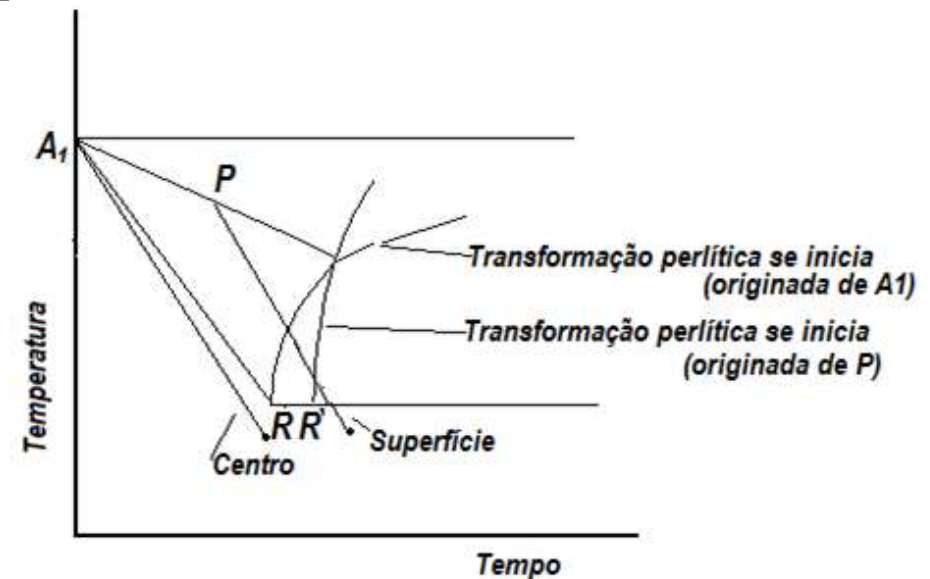
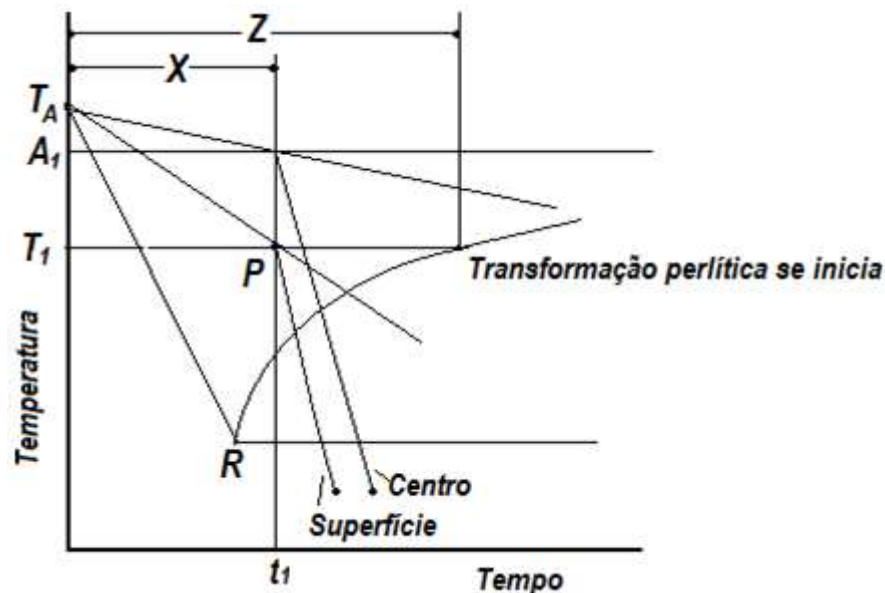
Secção de mola helicoidal
(120mm)
Têmpera em meio **sem**
agitação

Ponto	(HRC)
1	57
2	56
3	57
4	58
5	56
6	57
7	56
8	56

CAUSA:

Lento resfriamento do estágio inicial de resfriamento devido ao filme de vapor.
Padrão de resfriamento diferente entre superfície e centro .

Problemas relacionados a não uniformidade



Comportamento diferente na transformação quando há descontínua mudança na taxa de resfriamento. Assim a dureza invertida pode ser atribuída ao lento resfriamento proveniente do estágio inicial de filme de vapor.

A transformação está relacionada ao período de incubação antes da mudança na taxa de resfriamento.

Problemas relacionados a não uniformidade

Dureza Invertida

Shimizu, N. Tamura, I. (1978). **Inverse Quench-hardening of Steel**. Transactions ISIJ, 18, 5p.

Shimizu, N. Tamura, I. (1978). **Effect of the discontinuous change in cooling rate during continuous cooling on perlite transformation behavior of steel**. Transactions ISIJ, 17, 7p.

Liscic, B.; Grubisic, V.; Totten, G. E. (1996). **Controllable Delayed Quenching. "Equipment and Processes**. Proceedings of the Second Interl. Conference on Quenching and the Control of Distortion. ASM International. 8p.

Liscic, B. (2005). **Controllable heat extraction technology- what it is and what it does**. International Journal Materials and Product Technology, 24(1-4). 14p.

Transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor (h_{tc}) ou o fluxo de calor, Q , superficial durante a têmpera é uma condição de contorno essencial para a análise numérica do processo de têmpera, (cálculo das tensões residuais e distorções).

Métodos para calcular o h_{tc} :

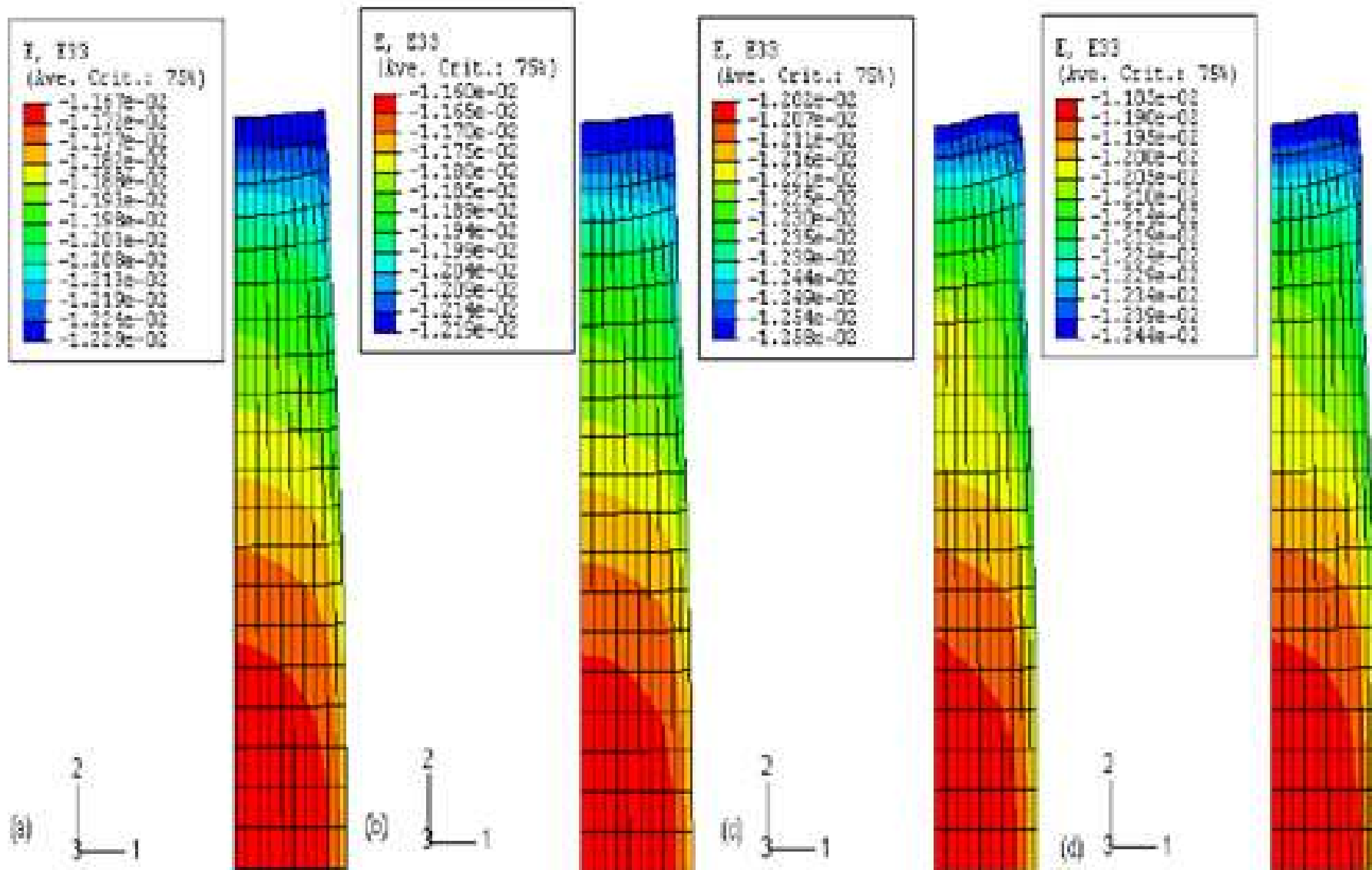
- Análise concentrada (lamped)
- Método inverso
- Método do gradiente de temperatura
- Método de Kobasko

Transferência de calor

Método inverso

Vantagem: htc é calculado a partir de uma curva de resfriamento medida no interior da peça.

- Problemas potenciais do método inverso:
 - a instabilidade dos resultados, os quais dependem da discretização
 - e a sensibilidades dos erros da medição de temperatura



DISTORÇÕES

Tempo [s]

Penha, R.N.; Canale, L.F.; Totten, G.; Sarmiento, G.; Ventura, J. (2006). **Simulation of Heat Transfer and Residual Stresses from Cooling Curves Obtained in Quenching Studies.** Journal of ASTM, v.3, n.5, 14p.

Método de Kobasko

Este método está baseado no cálculo da taxa de resfriamento (C.R.) de dois pontos da curva de resfriamento registrada correspondendo aos pontos t_1 e t_2 :

$$C.R. = \frac{\ln(T_1 - T_M) - \ln(T_2 - T_M)}{t_2 - t_1}$$

T_M ... temperatura do meio

T_1 e T_2 ... Temperatura do corpo de prova nos instantes t_1 e t_2 [K]

K ... Fator de forma de Kondratjiev []. Para um cilindro:

$$K = \frac{R^2}{5.783}$$

R ... Raio do cilindro [m]

Bi ... Número de Biot []. Parâmetro adimensional que representa a razão entre o coeficiente de transferência de calor convectivo e a condutividade térmica do material.

$$Bi = \frac{h_k}{k} R$$

h_k ... Coeficiente de transferência de calor

k ... Condutividade térmica [W/mK]

Do valor da C.R o número de Kondratjev K_n é calculado:

$$K_n = C.R. \frac{K}{\alpha}$$

α ... Difusividade térmica da peça [m²/s]

Há uma correlação entre o número Kondratjev, K_n , e o número de Biot (Bi_v):

$$K_n = \frac{Bi_v}{(Bi_v^2 + 1.437Bi_v + 1)^{1/2}}$$

O coeficiente de transferência de calor (h_k) é calculado pelo número de Biot:

$$h_k = \frac{Bi_v \cdot k \cdot V}{KA}$$

A ... Área superficial do corpo de prova [m²]

V ... Volume do corpo de prova [m³]

Este método pode ser aplicado a amostras de diferentes tamanhos e formas, contando que seja utilizado o fator de forma de Kondratjev (K) adequado.

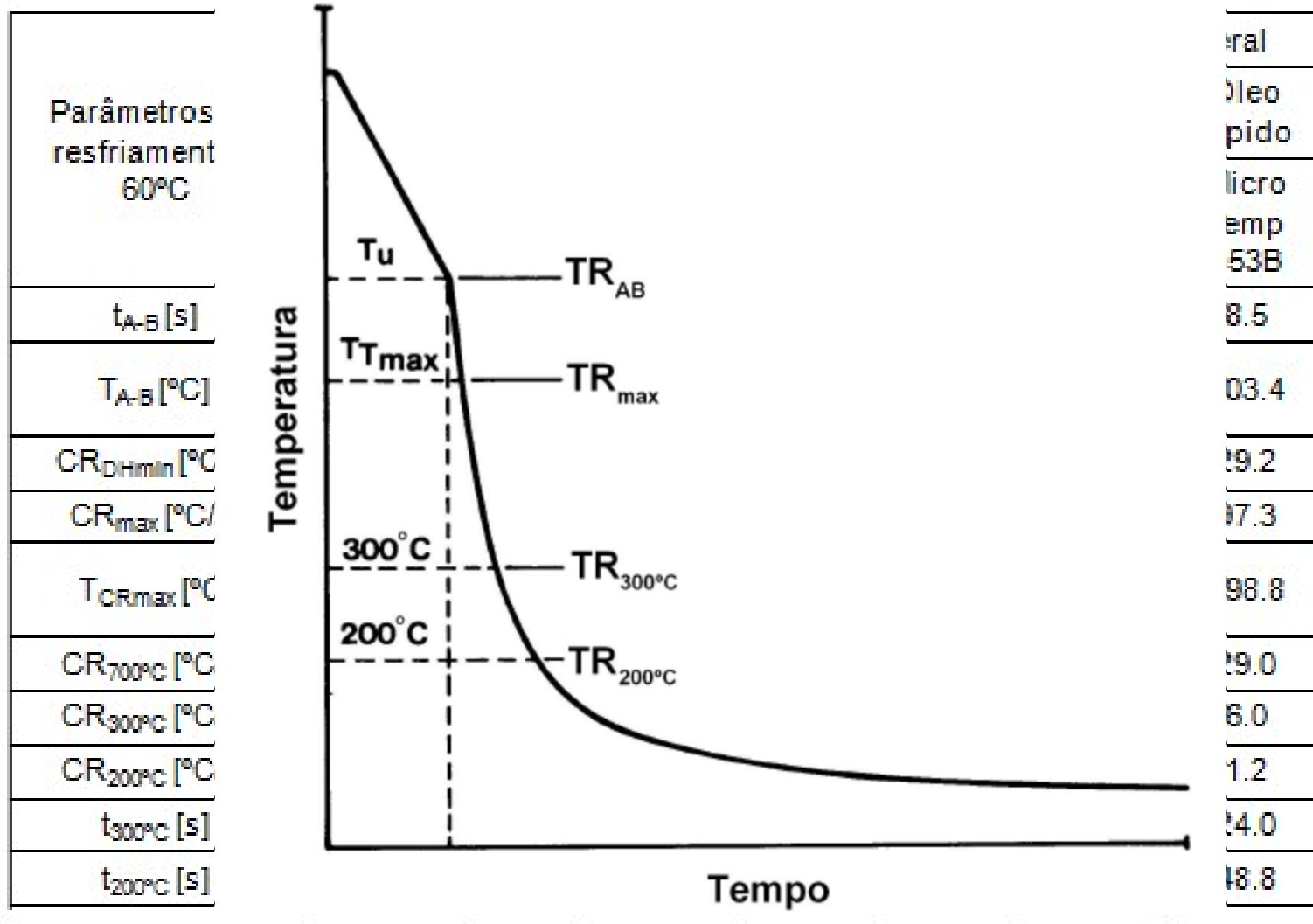
Processos e meios não convencionais

Óleos vegetais

- Resistência à oxidação
- Influência da oxidação no mecanismo de resfriamento
- Formulação com aditivos anti-oxidantes e anti-corrosivos

Canale, L. C. F.; Fernandes, M. R.; Agostinho, S. C. M.; Totten, G. E.; Farah, A. F. (2005). **Oxidation of vegetable oils and its impact on quenching performance**. International Journal of Materials and Product Technology, 24 (1-4) 24p.

Komatsu D.; Souza E. C.; Souza, E. C.; Canale, L. C. F.; Totten, G. E. **Effect of Antioxidants and Corrosion Inhibitor Additives on the Quenching Performance of Soybean Oil**. Strojnicki Vestnik – Journal of Mechanical Engineering , 56 (2), 9p.



Souza, E. C.; Fernandes, M. R.; Agostinho, S. C. M.; Canale, L. C. F.; Totten, G. E. (2009). **Comparison of structure and quenching performance of vegetable oils**. Journal of ASTM International, 6 (9) 24p.

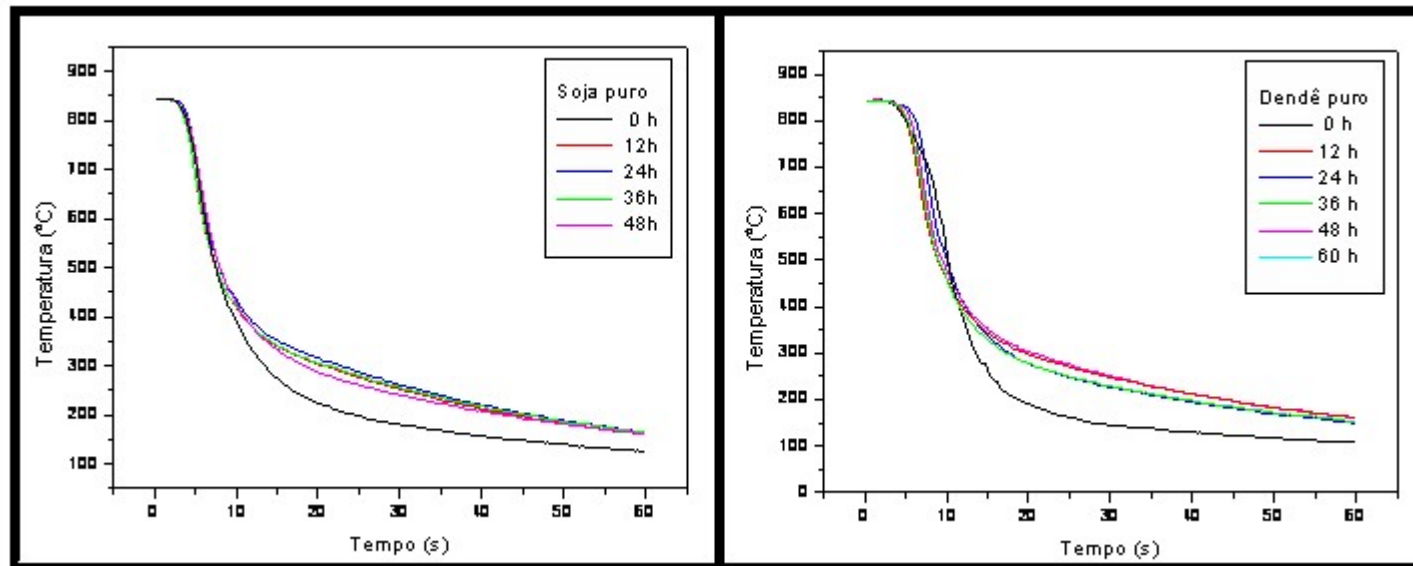
Propriedades de transferência de calor	Óleo vegetal					Óleo mineral	
						Óleo lento	Óleo rápido
	Canola	Milho	Algodão	Soja	Girassol	Micro Temp 157	Micro Temp 153B
$htc_{700^{\circ}\text{C}}$ [W/m ² K]	2455	2160	2190	2040	2455	587	705
$htc_{450^{\circ}\text{C}}$ [W/m ² K]	1810	1815	1970	1810	1980	1790	2060
$htc_{\text{médio}}$ [W/m ² K]	2132	1842	2080	1920	2212	1188	1382
H (fator de Grossmann)	0.198	0.171	0.193	0.178	0.205	0.111	0.124

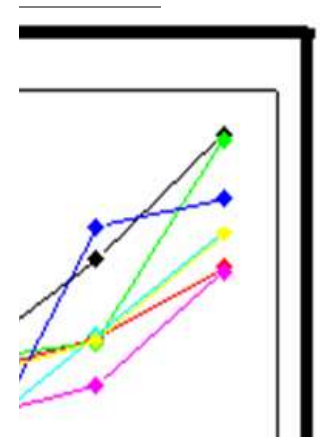
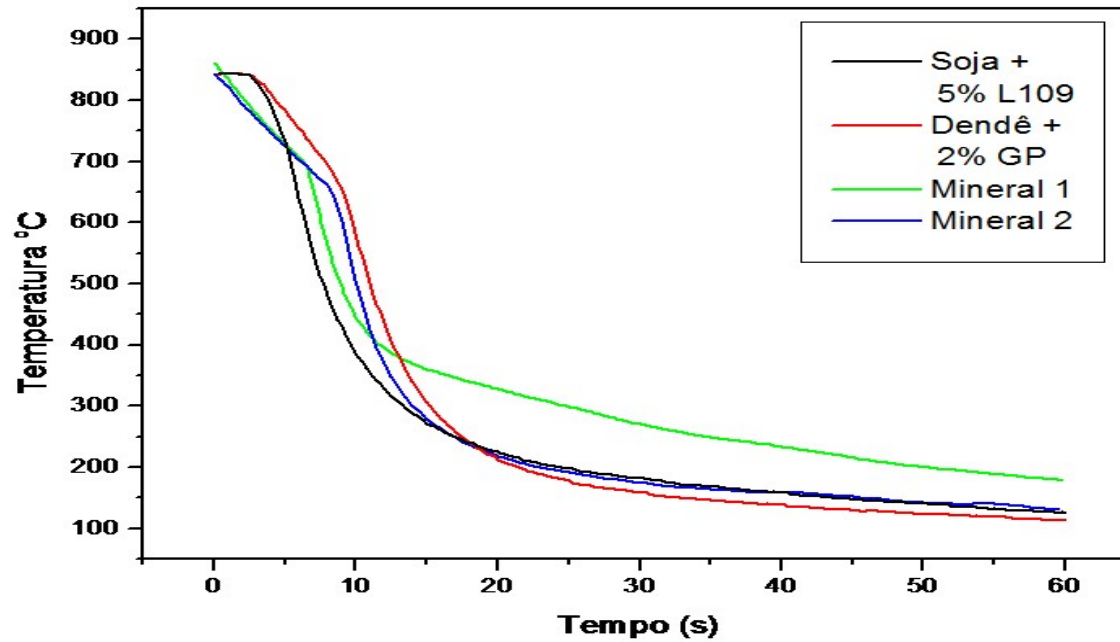
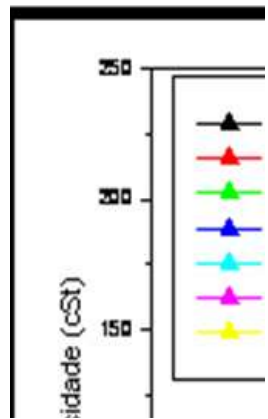
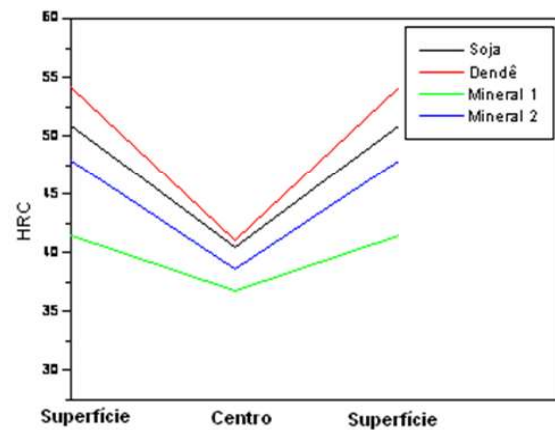
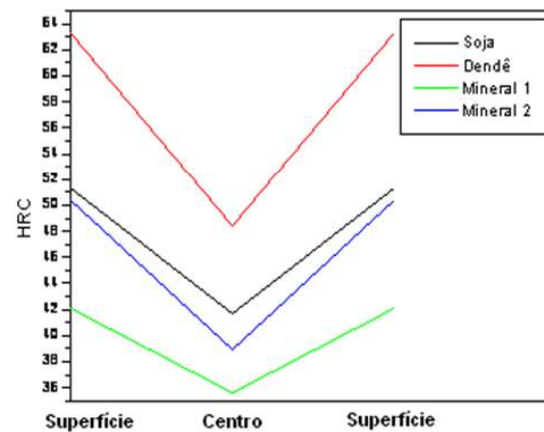
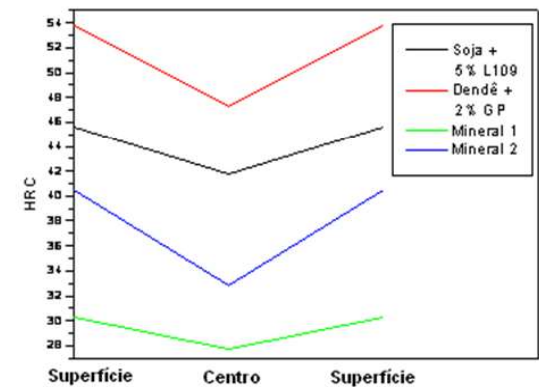
O fator de Grossmann, H , é obtido por:

$$H = \frac{h}{2k}$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor e k a condutividade térmica do material

Processos e meios não convencionais



P
Ca)) AISI 1045 com $d = \frac{1}{2}$ "b) AISI 4140 com $d = 1$ "c) AISI 4140 com $d = 2 \frac{1}{2}$ "

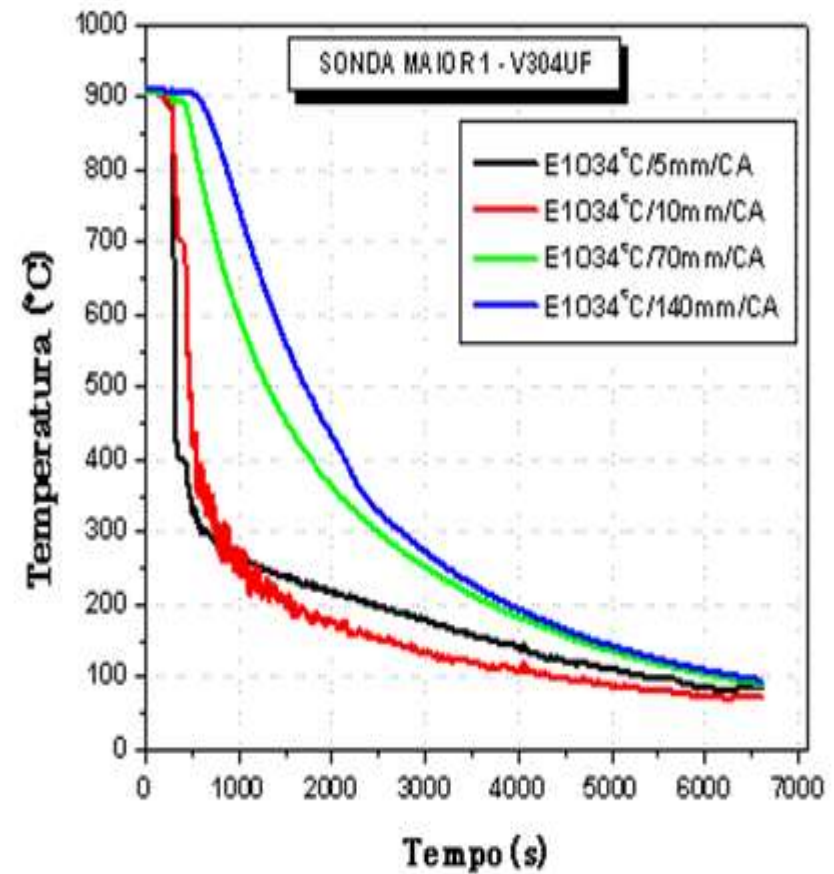
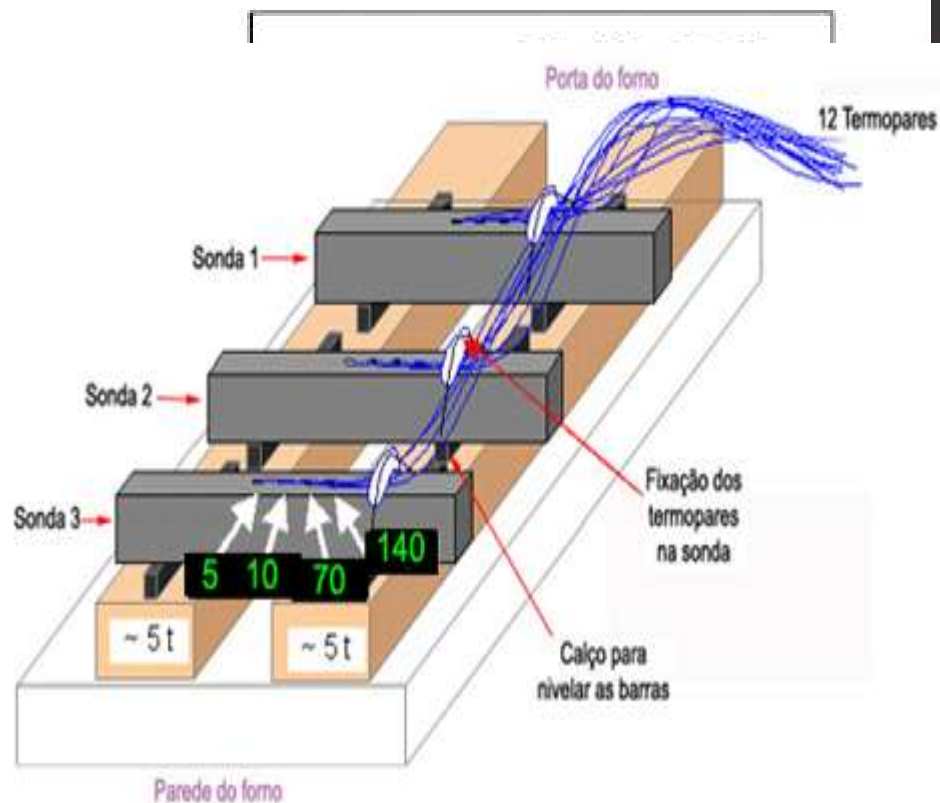
Processos e meios não convencionais

Substituição tanque óleo por água

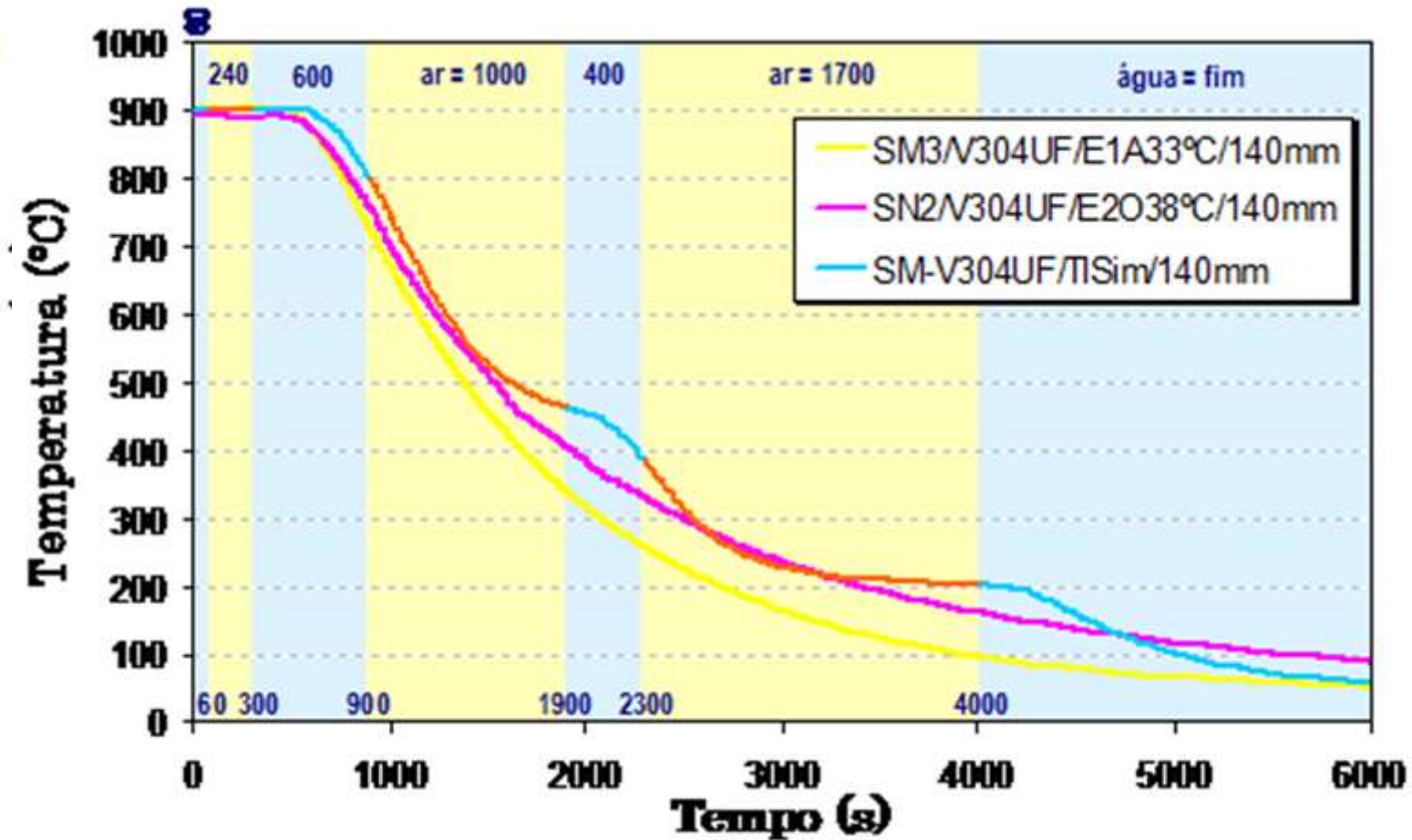
Aços VMO e VP20 ISO

Simulações: HT mod Abaqus Deform

Processos e meios não convencionais



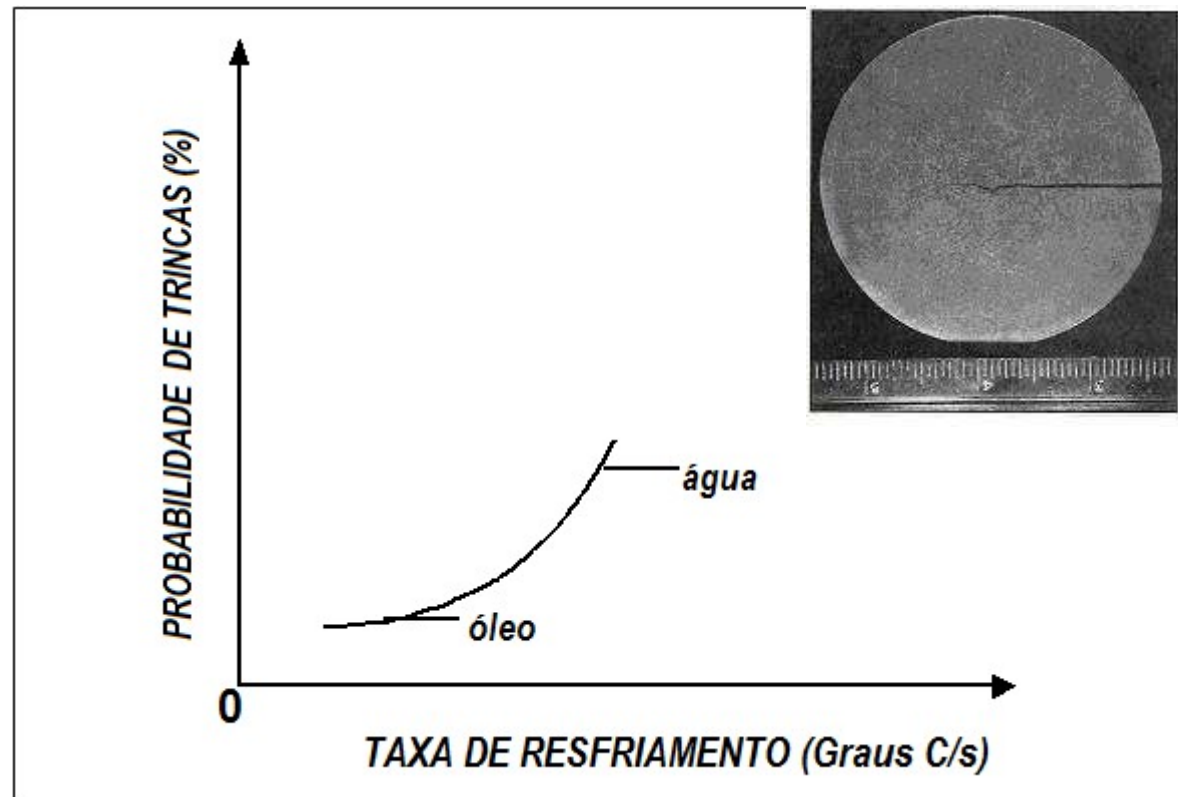
Processos e meios não convencionais



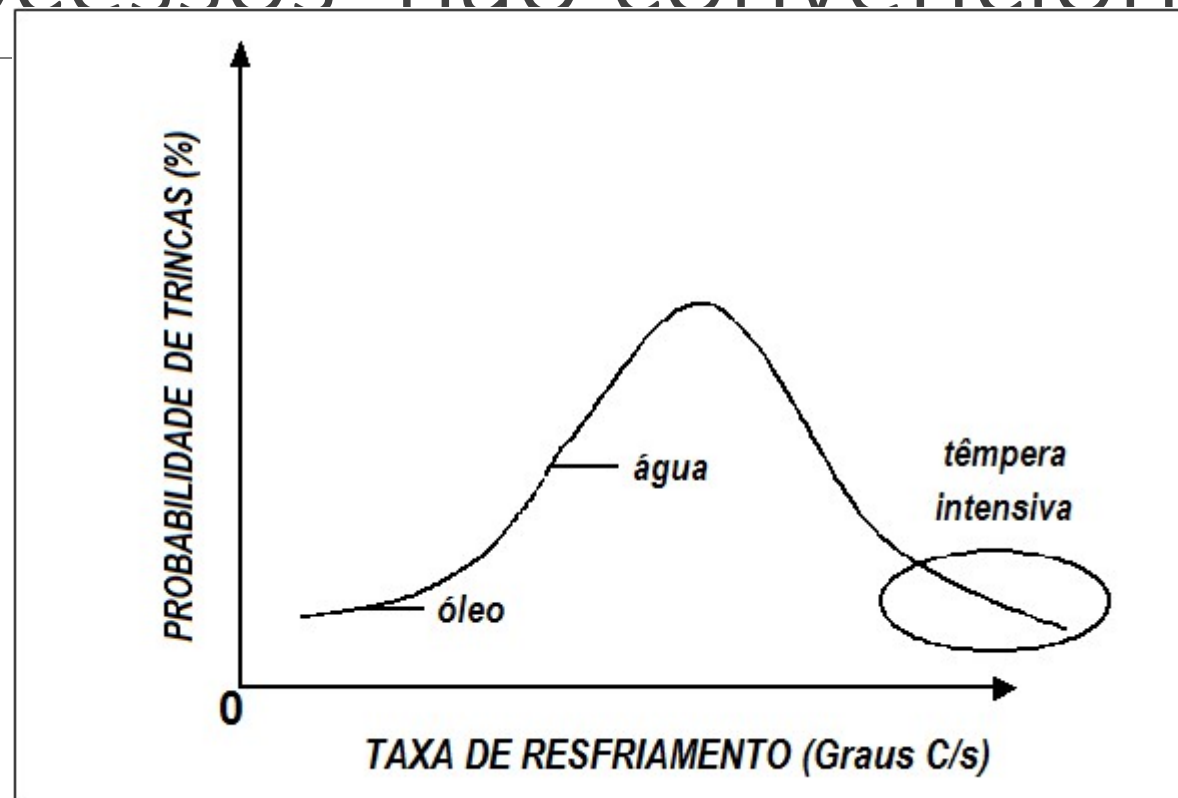
Processos e meios não convencionais



Processos não convencionais



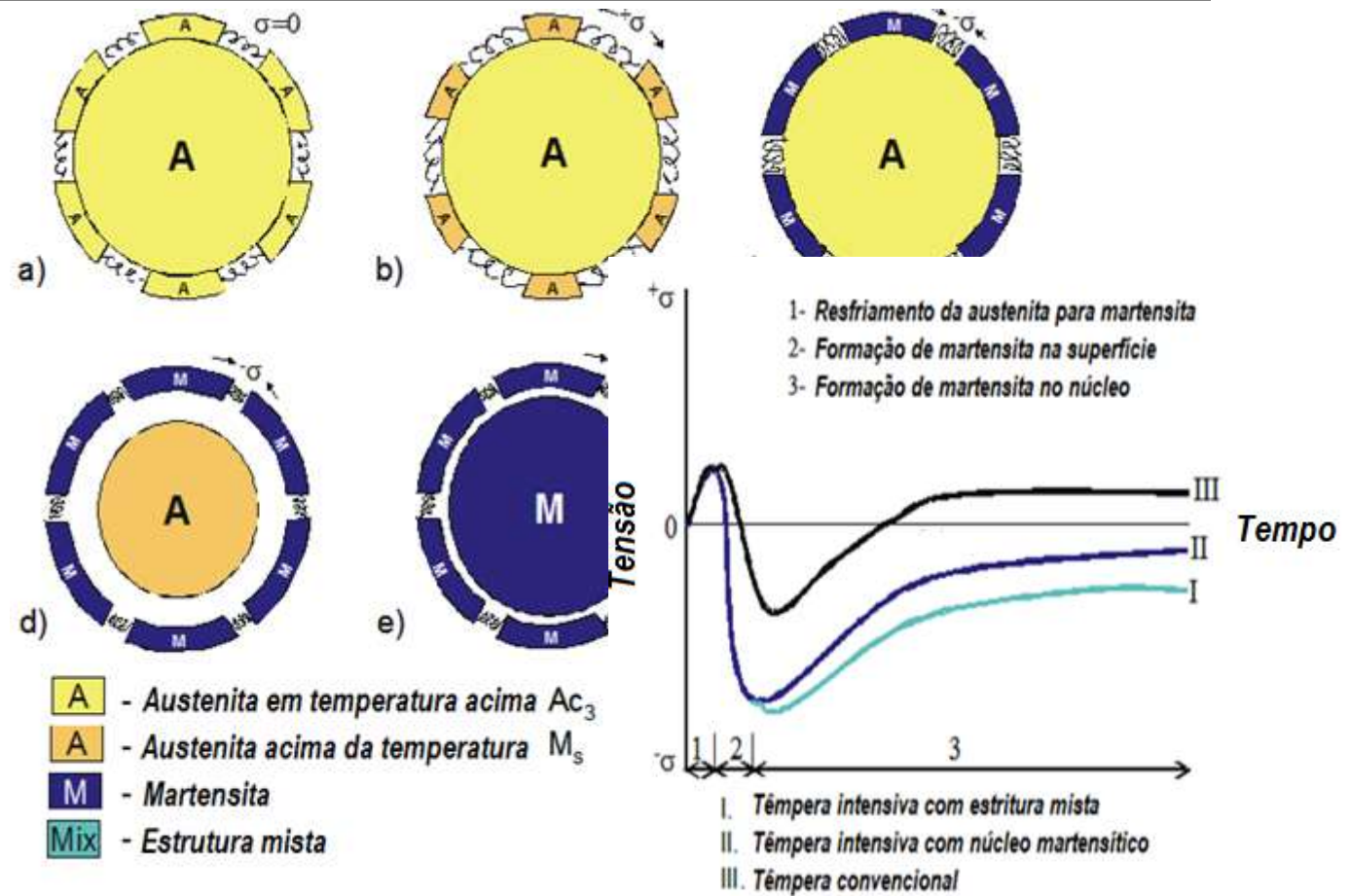
Processos não convencionais



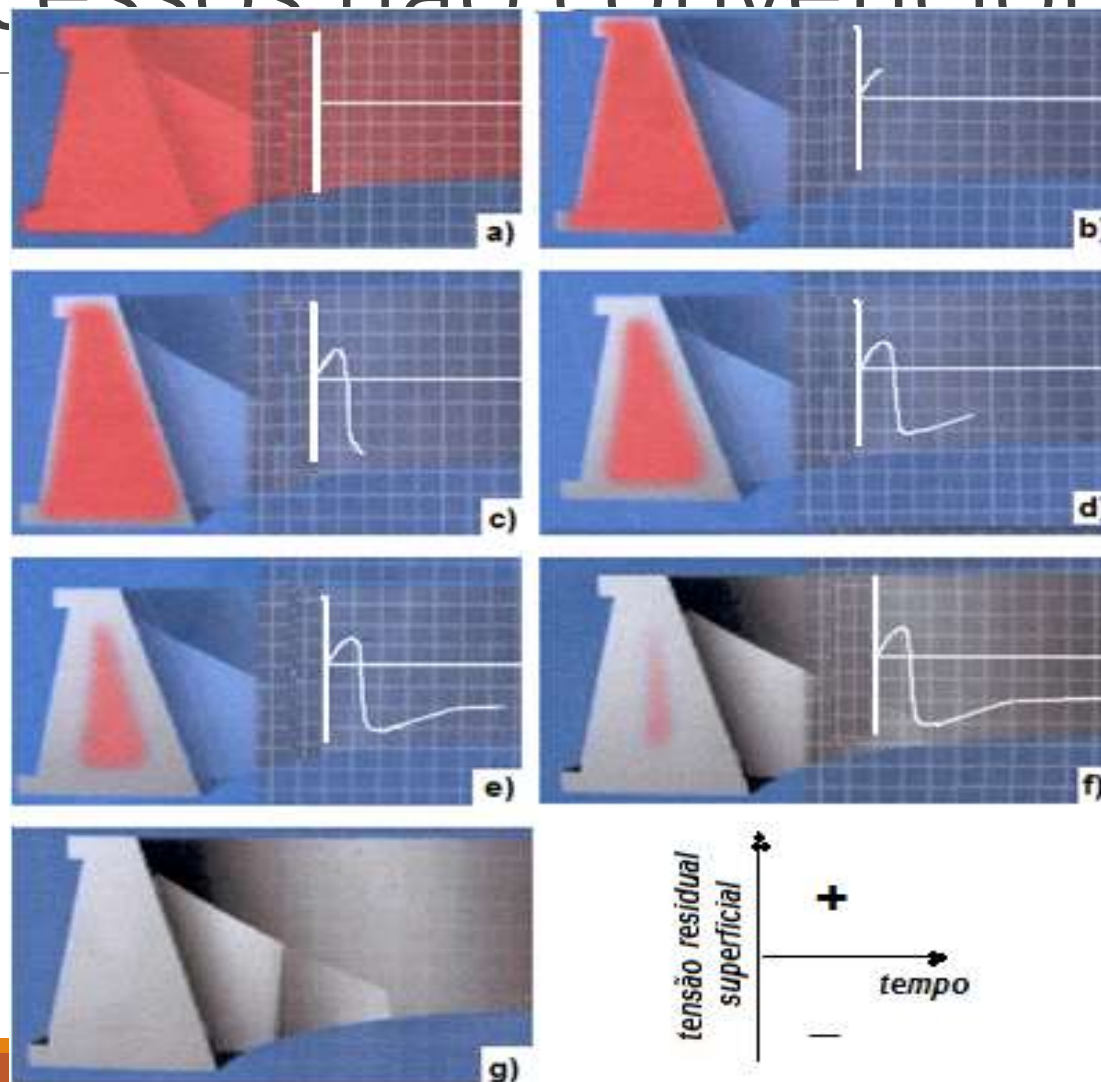
Tensões compressivas superficiais

Magnitude e localização adequadas

Processos não convencionais



Processos não convencionais



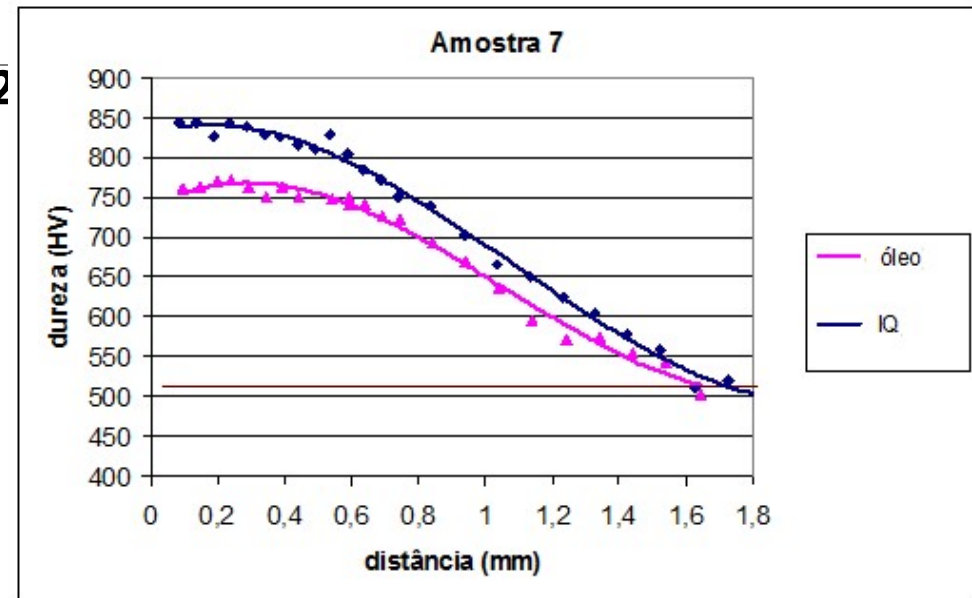
ssos não convencionais



SAE 8620

Redução de 2

- Aumento da dureza superficial
- Aumento da profundidade da dureza
- Obtenção de uma martensita mais refinada
- Baixo teor de austenita retida
- Refinamento da estrutura do grão
- Introdução de tensões residuais superficiais mais compressivas (-415,5 MPa)



Processos e meios não convencionais



Canale, L. C. F. ; Canale, A. C.; Bose, W. W. **Construção de um sistema laboratorial de têmpera intensiva.** Projeto universal CNPq.

Zanato, M. A.; Canale, L. C. F.; Totten, G. E. (2010). **Avaliação de um sistema laboratorial de têmpera intensiva.** Trabalho apresentado no V TTT.

Têmpera Intensiva

Referências

KOBASCO, N.I.; ARONOV, M.A.; POWELL, J.A.; CANALE, L.C.F.; TOTTEN, G.E. Intensive quenching process classification and applications. *Heat Treatment of Metals*, Birmingham, UK, v.31, n.3, p.51-58, 2004.

KOBASCO, N.I.; ARONOV, M.A.; POWELL, J.A.; CANALE, L.C.F.; TOTTEN, G.E. Improved production of automotive parts by intensive quench processing. *La Metallurgia Italiana*, v.1, n.2, p.13-22, 2006.

CANALE, L.C.F.; KOBASCO, Nikolai I.; TOTTEN, George Edward. Intensive quenching Part 1 – What is it? *International Heat Treatment and Surface Engineering*, v.1, n.1, p.30-33, 2007.

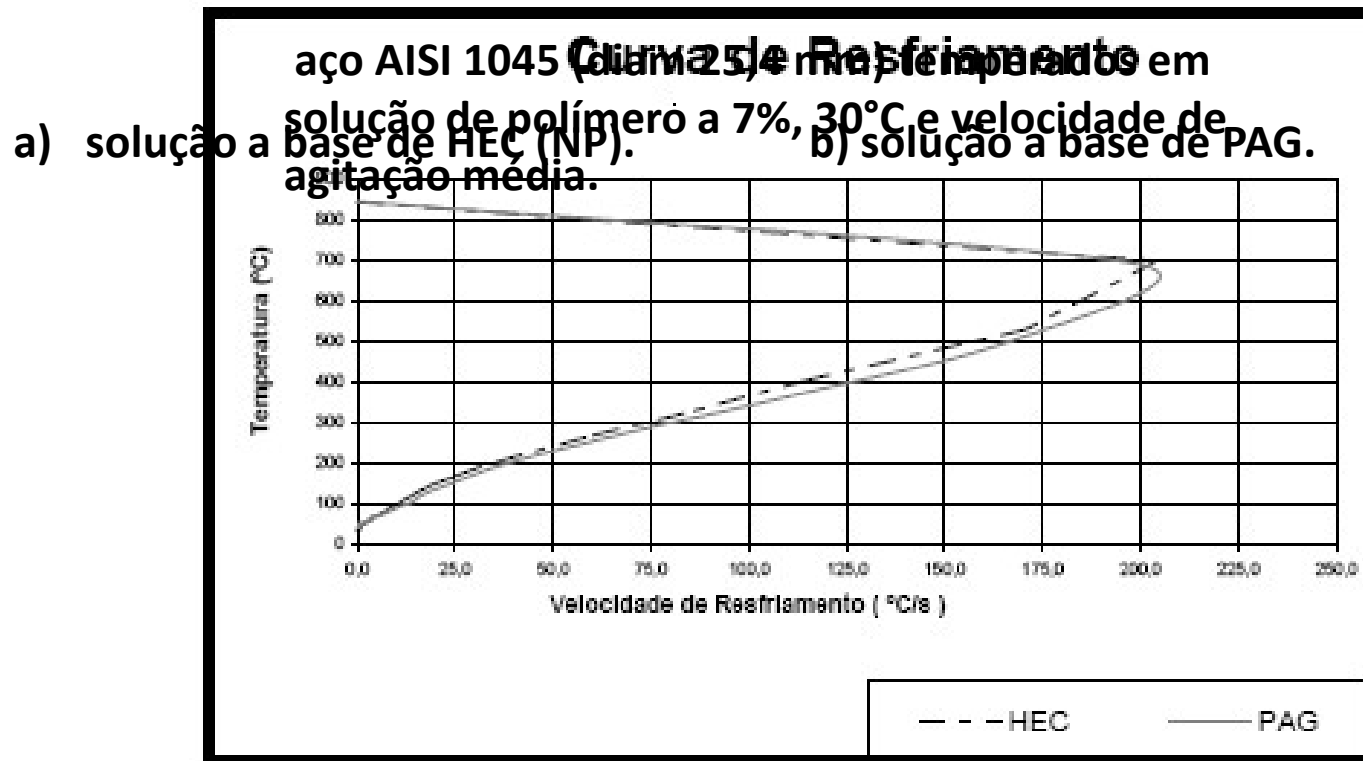
CANALE, L.C.F.; KOBASCO, Nikolai I.; TOTTEN, George Edward. Intensive quenching Part 2 – Formation of optimal surface compressive stresses. *International Heat Treatment and Surface Engineering Leeds*, v.1, n.2, p.60-63, 2007.

KOBASKO, N.I.; TOTTEN, G.E.; CANALE, L.C.F. Intensive quenching: Improved hardness and residual stress. *Jinshu Rechuli Heat Treatment of Metals*, v.32, n.5, p.84-89, 2007.

Processos e meios não convencionais

Polímero NP

HEC (hidroxi etil celulose) de baixo peso molecular



Futuros desenvolvimentos

Nanofluidos

Suspensão líquida diluída de nanopartículas (nanotubos de carbono) sólidas com tamanhos típicos entre 1-100 nm em líquidos tradicionais tais como água e polímeros

O que se espera: mais alta condutividade térmica e altos coeficientes de transferência de calor, maiores do que o fluido base.

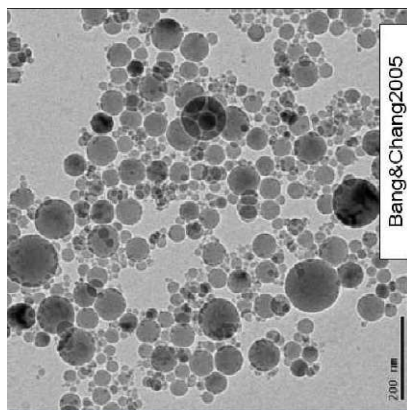


Nanofluidos

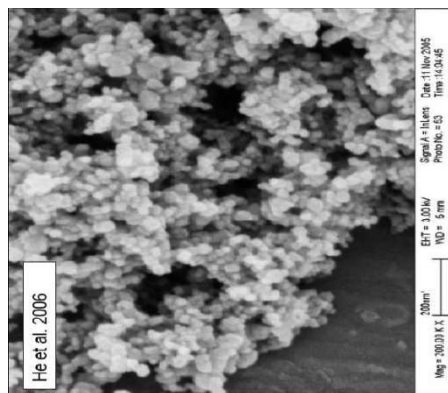
Tipos de nanopartículas atualmente estudadas:

Cerâmicas: Al_2O_3 , CuO , AlN , SiN , SiC , TiC , TiO_2

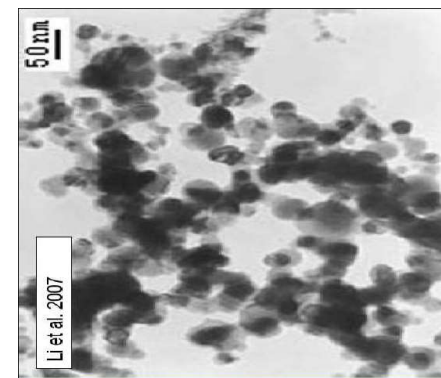
Metálicas: Ag , Au , Cu , Fe



Al_2O_3



TiO_2



Cu

Nanofluidos

Parâmetros que afetam a condutividade:

Fração em volume da partícula (concentração)

Material da partícula e tipo de fluido de base

Tamanho e forma da partícula (dificuldade de avaliar)

Aditivos, etc



REFERÊNCIAS

Fernandes, P. (2008). Nanoquenchants for Industrial Heat Treatment. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, 17 (1): 101-103.

Jagannath, V.; Prabhu, N.K.(2009). Severity of Quenching and Kinetics of Wetting of Nanofluids and Vegetable Oils. JOURNAL OF ASTM INTERNATIONAL, 6 (3) 9p.

Wu, D.; Zhu, H.; Wang, L. Liu, L. (2009). Critical Issues in nanofluids preparation, Characterization and Thermal Conductivity. (2009). CURRENT NANOSCIENCE, 5 103-122.

Lofti, H.; Shafu, M.B.(2009). Boiling heat Transfer on a High Temperature Silver Sphere in Nanofluids. INTERNATIONAL JOURNAL SCIENCE OF THERMAL SCIENCES, 48, 2215-2220

Prabh

