

INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS E TRATAMENTOS CRIOGÊNICOS NA TENACIDADE DO AÇO RÁPIDO AISI M2 ¹

Carlos Humberto Sartori²
André Paulo Tschiptschin³

Resumo

Nas últimas décadas, muito interesse tem sido demonstrado em relação aos efeitos de tratamentos a baixas temperaturas no desempenho dos aços, principalmente dos aços ferramenta. Neste trabalho foi avaliada a tenacidade do aço rápido AISI M2 tratado termicamente por rotas convencionais e rotas criogênicas. A tenacidade foi verificada através de ensaios de impacto em corpos de prova sem entalhe e ensaios de flexão 3 pontos em corpos de prova cilíndricos. Os tratamentos térmicos foram realizados em forno a vácuo sendo que as rotas convencionais foram constituídas por austenitização, têmpera e revenimento e as rotas criogênicas foram constituídas por austenitização e têmpera similares às rotas convencionais, além de processamento criogênico em nitrogênio líquido por períodos de 2 horas, 24 horas e 48 horas. Os resultados do ensaio de impacto e flexão 3 pontos mostram que as rotas criogênicas produziram microestruturas finais com tenacidade igual ou superior às rotas convencionais, com destaque especial às rotas criogênicas com somente um revenimento que apresentaram resultados superiores às rotas convencionais consagradas de múltiplos revenimentos.

Palavras-chave: Tratamentos criogênicos; Tenacidade; Aços rápidos.

THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT AND CRYOGENIC TREATMENT ON THE TOUGHNESS OF HIGH SPEED STEEL M2

Abstract

During the last few decades, lots of interests have been demonstrated to the effects of the low temperature treatments on the performance of steels, specially the tool steels. In this work the toughness of the AISI M2 high speed steel heat treated by conventional and cryogenic routes has been evaluated. The toughness was evaluated through un-notched impact samples and 3 points bending cylindrical samples. The heat treatments were carried out in a vacuum furnace, being the conventional routes constituted by austenitizing, quenching and tempering. The cryogenic routes were constituted by the same austenitizing and quenching parameters used for the conventional routes but also by cryogenic processing in liquid nitrogen for 2 hours, 24 hours and 48 hours. The impact and 3 points bending tests results show that the cryogenic routes have produced final microstructures with toughness values equal or superior to the conventional routes with a special highlight to the cryogenic routes with only one tempering after the freezing process, that have shown superior results compared to the classic multi-tempering cycles.

Key words: Cryogenic treatments; Toughness; High speed steel.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Mestre em Engenharia Metalúrgica. Coordenador de Tratamentos Térmicos de Aços Ferramenta e Nitretações da Bodycote Brasimet Processamento Térmico.*

³ *Doutor em Engenharia Metalúrgica. Professor Titular e Chefe do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP*

1 INTRODUÇÃO

Na década de 1970, alguns processos foram realizados em ferramentas acabadas através da imersão direta em nitrogênio líquido a -196°C , com excelentes resultados quanto ao aumento da vida útil das ferramentas.⁽¹⁾

Os estudos iniciados na década de 70, que estenderam a tecnologia dos tratamentos criogênicos a temperaturas até -196°C mostraram que após processos criogênicos, as propriedades mecânicas de aços rápidos e aços para matrizes são na sua totalidade melhoradas.⁽²⁾

Os processos criogênicos funcionam na verdade como uma têmpera estendida, portanto muito diferente dos conceitos de um processo extra após os revenimentos.

Existem duas hipóteses rivais que buscam explicar os efeitos dos tratamentos criogênicos nas propriedades mecânicas (resistência ao desgaste e tenacidade) dos aços. Uma defende que a única mudança que ocorre no aço durante o processo criogênico é a transformação da austenita retida em martensita e a outra defende que além da transformação da austenita retida, o condicionamento da martensita em temperaturas criogênicas gera condições para a precipitação de carbonetos ultrafinos no revenimento.

O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos dos tratamentos criogênicos na tenacidade do aço rápido AISI M2, aço muito utilizado na indústria para aplicações de corte, furação e conformação. Para isso diferentes ciclos de tratamento térmico envolvendo ou não etapas criogênicas foram desenvolvidos para especificação de dureza de 58 HRC a 62 HRC (normalmente utilizada nas aplicações acima descritas) alterando-se basicamente: temperatura de austenitização, tempo de exposição às temperaturas criogênicas e quantidade de revenimentos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesse trabalho corresponde ao aço rápido AISI M2 na forma de barras redondas trefiladas no estado recozido com diâmetro de 5,20 mm para geração dos corpos de prova de flexão e de barras retangulares laminadas de 15x10 mm para geração dos corpos de prova de impacto.

As composições químicas (% em massa) das barras foram analisadas através de aparelho espectrofotômetro de emissão óptica e os valores encontrados estão descritos na Tabela 1, assim como os valores de dureza verificados em escala Brinell:

Tabela 1 – Composição química e dureza das barras estudadas

Material	%C	%Cr	%V	%W	%Mo	%Co	%S	Dureza (HB)
Barra Ø 5,20 mm	0,89	4,09	1,80	6,74	4,79	0,79	0,002	256
Barra 15x10 mm	0,90	4,09	2,04	6,68	4,87	0,68	0,001	223

A tenacidade foi avaliada através de ensaio de impacto em corpos de prova não entalhados e ensaio de flexão em 3 pontos.

A caracterização metalográfica das amostras foi feita através de recursos de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, EDS, fractografia e difração de raios-X.

Para o ensaio de tenacidade ao impacto foram fabricados corpos de prova não entalhados de dimensões 7x10x55 mm correspondentes à direção longitudinal.

A opção do uso de corpos de prova não entalhados foi necessária devido à baixa tenacidade do material (AISI M2) quando do uso de corpos de prova do tipo Charpy com entalhe em “V”, resultado de um estado triaxial de tensão imposto ao material.⁽³⁾

Para o ensaio de flexão 3 pontos foram fabricados corpos de prova cilíndricos de diâmetro 5 mm e comprimento 60 mm usinados diretamente da barra trefilada, correspondendo portanto à direção longitudinal.

Os ciclos de tratamentos térmicos escolhidos buscaram avaliar: (a) a simples influência do processo criogênico, através da comparação de um ciclo convencional de tratamento térmico do aço AISI M2 sem criogenia, com diversos ciclos envolvendo a etapa criogênica; (b) a influência da temperatura de austenitização, através do uso da temperatura de austenitização padrão do aço AISI M2, além de uma temperatura 20°C abaixo e outra 20°C acima e (c) o tempo do processo criogênico, através da realização de etapas criogênicas com tempos variando entre: 2 horas, 24 horas e 48 horas.

Para isolar a influência da temperatura de revenimento, todos os revenimentos foram realizados à mesma temperatura.

Tabela 2 - Diversas rotas de tratamentos térmicos propostas no trabalho

Rota	Austenitização	Tratamento criogênico (DCT)	Revenimentos
Rota 1	1.180 °C	-	3 x 560 °C
Rota 2	1.180 °C	2hs	560 °C
Rota 3	1.180 °C	24 hs	3 x 560 °C
Rota 4	1.180 °C	48 hs	3 x 560 °C
Rota 5	1.200 °C	-	3 x 560 °C
Rota 6	1.200 °C	2hs	560 °C
Rota 7	1.200 °C	24 hs	3 x 560 °C
Rota 8	1.200 °C	48 hs	3 x 560 °C
Rota 9	1.220 °C	-	3 x 560 °C
Rota 10	1.220 °C	2hs	560 °C
Rota 11	1.220 °C	24 hs	3 x 560 °C
Rota 12	1.220 °C	48 hs	3 x 560 °C

O tratamento térmico de têmpera foi realizado em forno a vácuo com aquecimento por resistências de grafite, nível de vácuo de $1,0 \times 10^{-2}$ mbar e resfriamento por nitrogênio sob pressão de 6 bar. Para o revenimento utilizou-se um forno poço com atmosfera inerte de nitrogênio e recirculação forçada pelo fundo do forno.

Os ensaios de impacto foram realizados em pêndulo de impacto analógico aferido e calibrado modelo VWM Leipzig com martelo de 30 kg e capacidade máxima de absorção de 300 J.

Os ensaios de flexão foram realizados em máquina universal de ensaios modelo Kratos K 10000 MP aferida e calibrada, utilizando célula de carga de 10.000 kgf e velocidade de avanço de 0,5 mm/min.

Os pinos são alinhados sob o corpo de prova de flexão através de massa plástica de fixação.

A Figura 1 ilustra a o pêndulo de impacto e o dispositivo para o ensaio de flexão utilizados.

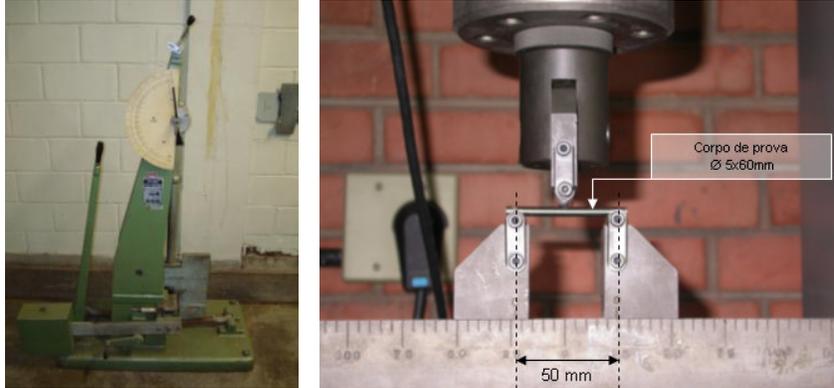


Figura 1 – Pêndulo de impacto e dispositivo para ensaio de flexão 3 pontos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de dureza obtidos nas amostras tratadas nas diversas rotas propostas estão dentro da faixa de dureza normalmente utilizadas em aplicações de trabalho a frio (58 HRC a 62 HRC) onde a propriedade tenacidade é a mais exigida.

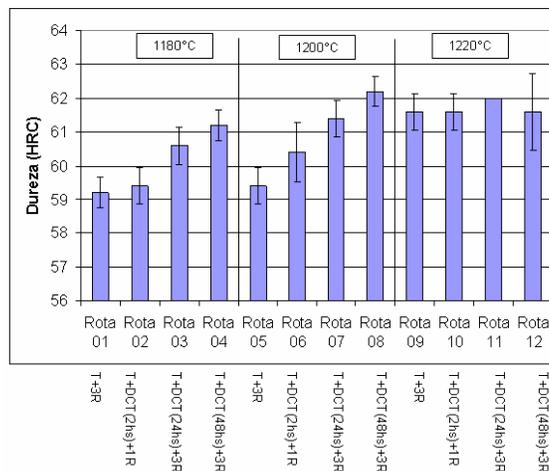


Figura 2 - Valores de dureza dos corpos de prova de impacto tratados termicamente pelas 12 rotas propostas (DCT = Tratamento criogênico).

O ensaio de impacto com corpos de prova Charpy sem entalhe mostrou-se adequado à avaliação de energia absorvida do aço AISI M2 submetido a solicitações em altas velocidades.

Não se verificou entre as rotas que utilizaram a mesma temperatura de austenitização valores muito discrepantes de tenacidade ao impacto.

No entanto ao analisarmos os resultados das rotas 02, 06 e 10 percebemos que os valores de energia absorvida no ensaio de impacto das amostras tratadas por criogenia com somente um revenimento são iguais ou mesmo superiores aos valores de energia absorvida nas amostras tratadas sem criogenia e triplo revenimento.

Entre as rotas sem tratamento criogênico (rotas 01, 05 e 09) verifica-se diminuição da tenacidade com o aumento da temperatura de austenitização. Isso pode ser explicado pela maior dureza obtida devido à maior dissolução de carbono na matriz e também pelo aumento do tamanho de grão, fatores que contribuem

negativamente para a tenacidade do material apesar do aumento no teor de austenita retida.

Não se verificam diferenças marcantes da tenacidade ao impacto entre as rotas dentro de uma determinada temperatura de austenitização.

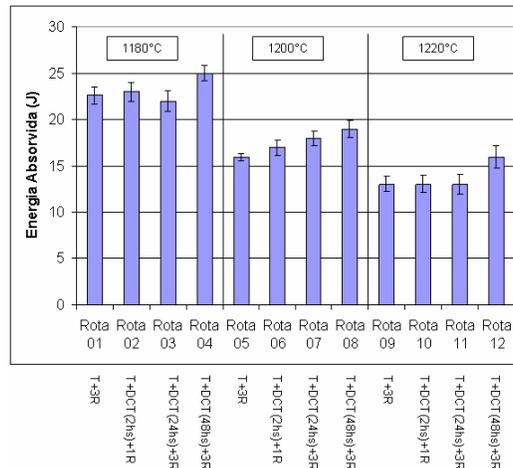


Figura 3 - Valores de energia absorvida (J) dos corpos de prova de impacto tratados termicamente pelas 12 rotas propostas.

Os ensaios de flexão 3 pontos foram realizados utilizando velocidade de aplicação de carga muito inferiores aos ensaios de impacto, o que permite a atuação de maior número de mecanismos de nucleação e propagação de trincas.

Não se verificou entre as rotas que utilizaram a mesma temperatura de austenitização valores muito discrepantes de resistência a flexão.

No entanto ao analisarmos os resultados das rotas 02, 06 e 10 percebemos assim como no ensaio de impacto, que os valores de resistência à flexão das amostras tratadas por criogenia com somente um revenimento são iguais ou superiores aos valores de resistência à flexão das amostras tratadas sem criogenia e triplo revenimento.

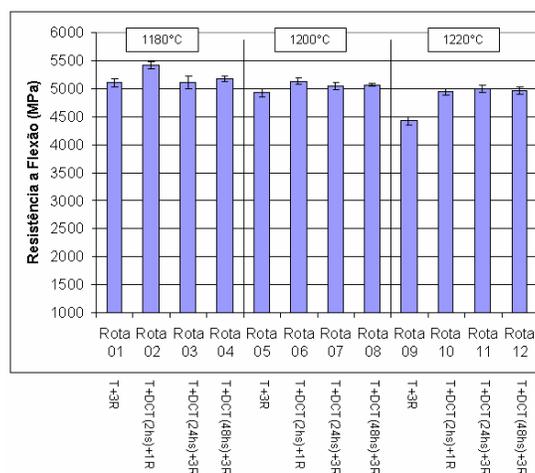


Figura 4 - Valores de resistência à flexão 3 pontos (MPa) dos corpos de prova de flexão tratados termicamente pelas 12 rotas propostas.

Dentre as diversas hipóteses para o aumento da tenacidade nos tratamentos criogênicos dos aços ferramentas, podemos destacar:

- aumento da estabilidade da martensita devido à difusão de átomos de carbono de seu reticulado e também pelo fato dos carbonetos ultrafinos precipitados alterarem o campo de tensões e a direção das trincas, retardando o desenvolvimento das mesmas;⁽⁴⁻⁶⁾
- a formação preferencial de carbonetos ultrafinos ao invés de filmes de cementita que normalmente facilitam a propagação de trincas nas interfaces com a martensita;⁽⁷⁻¹¹⁾
- a redução de tensões internas quando a precipitação de finos carbonetos ocorre reduz a tendência de micro-trincas; e
- a precipitação de maior quantidade de carbonetos de alta dureza nas amostras tratadas com criogenia reduz o teor de carbono e elementos de liga na matriz, elevando assim a tenacidade do material.^(12,13)

A análise fractográfica mostra que as fraturas verificadas tanto nas amostras de impacto como nas amostras de flexão apresentam mecanismo típico de quase-clivagem e formação discreta de microcavidades.

A comparação entre fraturas das amostras tratadas por rotas convencionais com as amostras tratadas por rotas criogênicas mostram maior presença de microcavidades nas amostras criogênicas, evidenciando assim a maior tenacidade verificada nessas rotas via ensaios mecânicos.

A Figura 5 mostra detalhes com mesma ampliação das fraturas nas amostras de flexão das rotas 05 e 06.

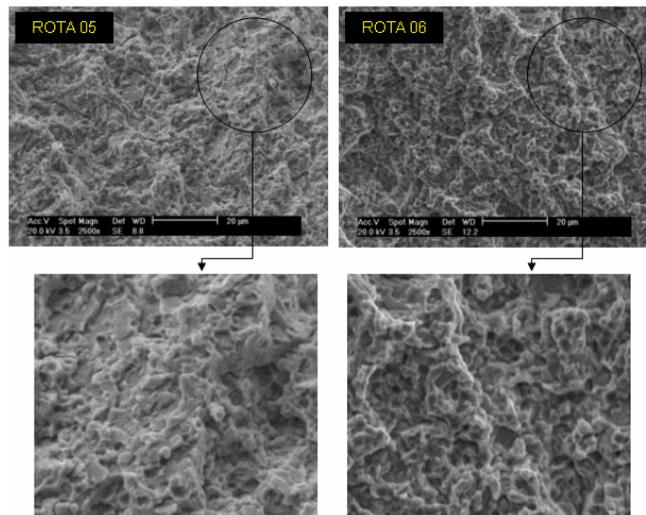


Figura 5 - Detalhe das fraturas (mesma ampliação) nas amostras de flexão da rota 05 (sem criogenia e triplo revenido) e rota 06 (criogenia e um revenido) evidenciando maior presença de microcavidades na rota criogênica – MEV – elétrons secundários – 2.500x.

As micrografias obtidas após a realização por completo das rotas de tratamento propostas estão apresentadas a seguir e foram separadas em função da temperatura de austenitização para facilitar a comparação entre as rotas tratadas convencionalmente e as rotas tratadas por criogenia.

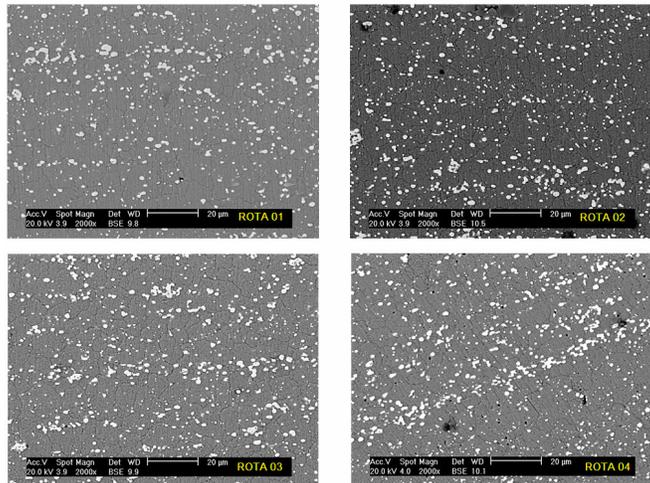


Figura 6 – Microestruturas das amostras de impacto austenitizadas a 1.180°C – direção longitudinal – MEV – elétrons retroespalhados – 2.000x – Villela

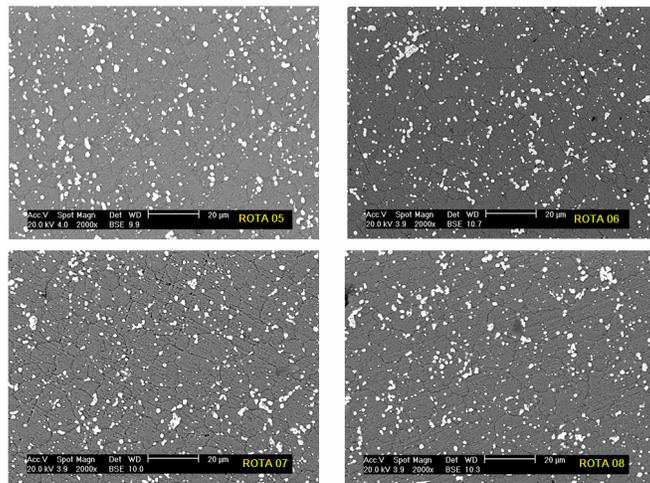


Figura 7 – Microestruturas das amostras de impacto austenitizadas a 1.200°C – direção longitudinal – MEV – elétrons retroespalhados – 2.000x – Villela

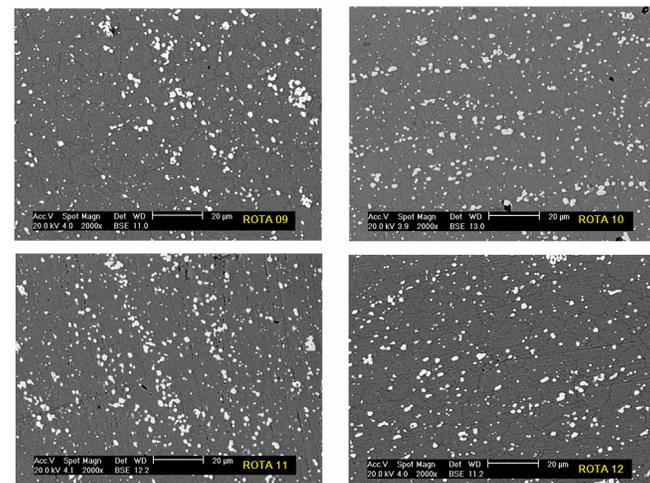


Figura 8 – Microestruturas das amostras de impacto austenitizadas a 1.220°C – direção longitudinal – MEV – elétrons retroespalhados – 2.000x – Villela

As microestruturas obtidas em cada uma das rotas são bastante semelhantes, constituídas por martensita revenida e carbonetos eutéticos distribuídos em forma de estrias alongadas. Não foi possível evidenciar via microscopia eletrônica, diferenças visuais relacionadas à presença de austenita retida. A análise de difração de raio-x possibilitou essa diferenciação.

Quanto maior a temperatura de austenitização, maior a quantidade de austenita retida presente no aço e isso pôde ser constatado nas amostras somente temperadas.

Para as amostras tratadas a 1.180°C sem criogenia, porém com triplo revenimento, verificou-se um teor de austenita retida de 10,8% enquanto que as rotas sem criogenia e com triplo revenimento austenitizadas a 1.200°C e 1.220°C apresentaram respectivamente 11,6% e 12,9% de austenita retida.

Não importa a duração do ciclo de criogenia, todas as amostras submetidas a -196°C apresentaram após o término do processo proposto (algumas com um único revenimento e outras com triplo revenimento) teores muito próximos de austenita retida, variando entre 1,9 e 2,4%.

Tabela 3 - Valores de austenita retida verificadas nas amostras tratadas nas diversas rotas

Porcentagem (%) de austenita retida na microestrutura											
Somente temperado (1180°C)				Somente temperado (1200°C)				Somente temperado (1220°C)			
14,8				17,7				19,6			
Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota	Rota
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10,8	2,2	1,9	2,0	11,6	2,3	2,1	2,3	12,9	2,4	2,3	2,3
T+3R	T+DCT(2hs)+1R	T+DCT(24hs)+3R	T+DCT(48hs)+3R	T+3R	T+DCT(2hs)+1R	T+DCT(24hs)+3R	T+DCT(48hs)+3R	T+3R	T+DCT(2hs)+1R	T+DCT(24hs)+3R	T+DCT(48hs)+3R

Verificou-se através do método Snyder-Graff tamanho de grão 15 para amostras austenitizadas a 1.180°C, tamanho de grão 12 para as amostras tratadas a 1.200°C e tamanho de grão 10 para as amostras tratadas 1.220°C.

Diversos autores declaram ter observado carbonetos finos precipitados devido ao tratamento criogênico utilizando microscopia eletrônica de varredura. No entanto os carbonetos descritos nessas referências eram todos muito pequenos em tamanho (na ordem de dezenas de nanômetros), tamanho esse normalmente não detectável por técnicas de microscopia eletrônica de varredura⁽¹⁴⁻¹⁶⁾.

Os trabalhos de Meng et al.⁽¹⁷⁾ e Yun, Xiaoping e Hongshen⁽²⁾ continuam sendo as principais referências na observação dos carbonetos precipitados nos tratamentos criogênicos de aços rápido (carbonetos η) através de técnicas de microscopia eletrônica de transmissão.

Não foi possível evidenciar os carbonetos descritos por Meng et al.⁽¹⁷⁾ e Yun, Xiaoping e Hongshen⁽²⁾ através dos recursos microscopia eletrônica de varredura utilizados nesse trabalho.

Buscando completar a análise e utilizando a mesma técnica de Pellizzari et al.⁽¹⁸⁾ para demonstrar indiretamente as modificações microestruturais introduzidas pelo tratamento criogênico, foram levantadas para essa discussão as curvas de

revenimento para aço AISI M2 utilizando as temperaturas de austenitização das rotas de tratamento criogênico propostas no presente trabalho.

A Figura 9 a seguir apresenta as curvas de revenimento para o aço AISI M2 temperado a 1.180°C, 1.200°C e 1.220°C, com e sem a realização da etapa criogênica (nesse caso a -196°C por 24 horas) após a têmpera.

Verifica-se nesse levantamento, que assim como demonstrado por Pellizzari et al. existe um deslocamento da curva de revenimento nas amostras tratadas com criogenia para todas as temperaturas de austenitização utilizadas.⁽¹⁹⁾

No entanto verificou-se que tal deslocamento é para a direção de maiores temperaturas, isto é, o pico de dureza secundária é “atrasado” cerca de 20°C, ao contrário do que foi evidenciado por Pellizzari et al. que verificaram uma “antecipação” do pico de dureza secundária.

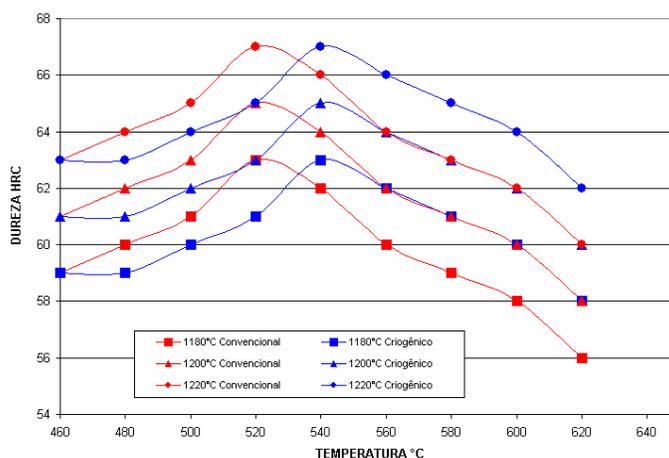


Figura 9 – Curvas de revenimento (1x2h) para o aço AISI M2 austenitizado a 1.180°C, 1.200°C e 1.220°C para o processo convencional e para o processo criogênico

Essa constatação tem que estar relacionada a transformações microestruturais introduzidas pelo tratamento criogênico, particularmente o condicionamento da martensita e precipitação de carbonetos finos.

4 CONCLUSÕES

- As rotas de tratamento criogênico aplicadas ao aço rápido AISI M2 produziram tenacidade igual ou superior ao processo convencional.
- Com a realização de somente um revenimento, os tratamentos criogênicos produziram para o aço rápido AISI M2 uma microestrutura tenaz e estável com pequena quantidade de austenita retida, enquanto processos convencionais de tratamento térmico requerem multi-revenimentos para obtenção dos mesmos resultados, porém com maior quantidade austenita retida.
- As fraturas evidenciadas nas amostras de impacto e flexão tratadas por criogenia apresentaram características menos frágeis que as amostras tratadas por rotas convencionais. Isso pode ser constatado pela maior presença de microcavidades semelhantes a “dimples” nas amostras submetidas à criogenia.
- A temperatura de austenitização desempenha papel fundamental nos tratamentos criogênicos, mostrando que a criogenia atua no condicionamento da

martensita formada na têmpera (martensita primária) e não na martensita formada a partir da transforma o da austenita retida. Quanto menor a temperatura de austenitiza o, maior   a quantidade de martensita “primária” que   condicionada durante a criogenia.

- O tempo em temperatura criogênica não se mostrou uma variável tão importante como descrito pela literatura. Houve pequeno aumento de dureza com a maior exposi o   temperatura criogênica, porém não se verificaram diferenças relevantes em rela o   energia absorvida no impacto e resistência   flexão em amostras submetidas a 2 horas de criogenia em rela o às tratadas por 24 ou 48 horas.
- Os melhores resultados do processo criogênico nos ensaios de impacto, comparados aos resultados mais discretos nos ensaios de flexão, mostram que os processos criogênicos produzem microestruturas ideais para aplica es onde existe alta velocidade de aplica o de carga, como pun es, facas e matrizes de corte.
- Os carbonetos precipitados no tratamento criogênico possuem dimensões nanométricas não detectáveis por microscopia eletrônica de varredura e sua verifica o deve ser feita por microscopia eletrônica de transmissão
- Os tratamentos criogênicos realizados nesse trabalho promoveram um deslocamento da curva de revenimento e do pico de dureza secundária do aço AISI M2 para maiores temperaturas. Esse deslocamento demonstra indiretamente as transforma es microestruturais introduzidas pelo tratamento criogênico, particularmente o condicionamento da martensita e a mudança no padrão de precipita o de carbonetos finos (distribui o e quantidade).
- Tal deslocamento permite que o aço rápido AISI M2 seja revenido em temperaturas superiores às usadas nos processos convencionais (para uma mesma dureza), garantindo assim maior estabilidade microestrutural e conseqüentemente maior tenacidade.

REFERÊNCIAS

- 1 BARRON, R. F. Cryogenic Treatment of Metals to Improve Wear Resistance, Cryogenics, August, pp. 409-413, 1982.
- 2 YUN, D., XIAOPING, L., HONGSHEN, X. Deep Cryogenic Treatment of High-speed Steel and its Mechanism. Heat Treatment of Metals, pp.55-59, 1998.
- 3 MENDANHA, A. Estudo da Resistência   Fratura do Aço Ferramenta para Trabalho a Frio AISI D2. Disserta o de Mestrado, EPUSP, 2004.
- 4 HUANG, J.Y., ZHU, Y.T., LIAO, X.Z., BEYERLEIN, I.J., BOURKE, M.A., MITCHELL, T.E. Microstructure of Cryogenic Treated M2 Tool Steel, Material Science and Engineering, pp. 241-244, 2003.
- 5 COHEN, P., KAMODY, D.J. Cryogenics Goes Deeper. Cutting Tool Engineering and NU-Bit, Inc. Publication, 1998.
- 6 NEWKIRK, J., KOHSER, R. Cryogenic Treatments of the Tool steels: Questions Posed and Answers Sought. Industrial Heating, pp. 179 a 182, 2000.
- 7 COLLINS, D. N., DORMER, J. Deep Cryogenic Treatment of a D2 Cold-work Tool Steel, Heat Treatment of Metals. pp. 71-74, 1997.
- 8 COLLINS, D.N. Cryogenic Treatment of Tool Steels. Advanced Materials & Processes, pp. H23-H29, 1998.
- 9 FISCHMEISTER, H.F., OLSSON, L.R. Fracture Toughness and Rupture Strength of High Speed Steels. Cutting Tool Materials, Proceedings of an International Conference, 1980.

- 10 SILVA, F.J. Influência do tratamento criogênico no desempenho de ferramentas de aço rápido, 1999. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.
- 11 YEN, P.L., KAMODY, D.J. Formation of Fine Eta Carbides in Special Cryogenic and Tempering Process (Key to Improved Properties of Alloy Steels). Industrial Heating and NU-Bit, Inc Publication, 1997.
- 12 KAMODY, D.J. Cryogenic Process Update. Advanced Materials & Processes, pp. H67-H69, 1999.
- 13 MOORE, K., COLLINS, D. N. Cryogenic Treatment of Three Heat Treated Tools Steels, Engineering Materials, Vol. 86-87. pp. 47-54, 1993.
- 14 MAHMUDI, R., GHASEMI, H.M, FARADJI, H.R. Effects of Cryogenic Treatments on the Mechanical Properties and Wear Behaviour of High-Speed Steel M2. Heat Treatment of Metals, pp. 69-72, 2000.
- 15 KELKAR, R., NASH, P., ZHU, Y. The Mechanism of Property Enhancement in M2 Tool Steel by Cryogenic Treatment. Informativo técnico do Thermal Processing Technology Center, IIT, 2003.
- 16 LESKOVSEK, V., KALIN, M., VIZINTIN, J. Influence of Deep Cryogenic Treatment on Wear Resistance of Vacuum Heat Treated HSS. Vacuum 80, pp. 507-508, 2006.
- 17 MENG, F., TAGASHIRA, K., AZUMA, R., SOHMA, H. Role of Eta-Carbide of Fe-12Cr-Mo-V-1,4C Tool Steel by Cryogenic Treatment. ISIJ International, Vol.34, pp. 205-210, 1993.
- 18 PELLIZZARI, M., MOLINARI, A., GIRARDINI, L., MALDARELLI, L. Deep cryogenic treatment of AISI M2 high speed steel. 7th International Tooling Conference, 2006, Torino. Torino, vol. 1, pp. 127-134, 2007.
- 19 PELLIZZARI, M., MOLINARI, A., GIANELLA, S., STRAFFELINI, G., STIASNY, K.H. Effect of Deep Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of Tool Steels, Journal of Materials Processing Technology, n.º 118, pp.350-355, 2001.