

EFEITO DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NA DUREZA E RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE AÇOS LEDEBURÍTICOS COM 8% E 12% Cr¹

Francisco Giraldes Arieta²
Marianne Suely Gattinger Marques³
Douglas de Paula e Silva⁴
Eliana Bezerra de Menezes Netto⁵

Resumo

O tradicional aço ledeburítico para trabalho a frio WNr. 1.2379/ AISI D2 e aços ledeburíticos de última geração com 8% de cromo foram tratados conjuntamente em forno a vácuo utilizando três temperaturas de austenitização de 1030 °C, 1060°C e 1120°C, seguido de tratamento criogênico e três revenimentos de duas horas cada à 520 °C. Os resultados mostraram que tanto para o aço WNr. 1.2379/ AISI D2 como os aços com 8%Cr, quanto maior a temperatura de austenitização maior a dureza final e menor a resistência ao impacto. Para um mesmo valor de impacto, os aços com 8% apresentaram dureza 3-4 pontos HRC superior ao aço AISI D2. A média dos valores de impacto dos aços 8%Cr foram de 33 a 45% superiores do que a média de impacto do AISI D2, mas somente nas temperaturas de austenitização de 1030 e 1060°C. À 1120°C os valores de impacto decaíram drasticamente tanto para o D2 assim como para os aços 8%Cr e os valores foram equivalentes.

Palavras-chave: 8%Cr; Aços ledeburíticos; Resistência ao impacto.

THE EFFECT OF AUSTENITIZING TEMPERATURE ON THE HARDNESS AND IMPACT PROPERTIES OF 12% Cr AND 8%Cr LEDEBURITIC STEELS

Abstract

The effect of austenitizing temperature on the impact properties of the traditional 12%Cr AISI D2 / WNr. 1.2379 ledeburitic cold work tool steel and several new generation of 8%Cr ledeburitic tool steels has been investigated. All steels have been vacuum heat treated simultaneously after austenitization at 1030 °C, 1060°C and 1120°C, followed by a cryogenic treatment and triple 02 hour-tempers at 520 °C. The results have shown that for both families of steels, the higher the austenitizing temperature the higher the hardness and the lower the impact properties. For the same impact value, the 8%Cr steels presented a 3-4 HRC hardness points higher than the traditional 12% Cr steels. The average impact values of the 8%Cr steels were 33 to 45 % superior than the 12%Cr steels but only after austenitization at temperatures of 1030 °C, 1060°C. At 1120 °C, the impact values dropped dramatically for both 12%Cr and 8%Cr steels and no difference could be found.

Key words: 8% Cr; Tool steel; Toughness

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, PhD, Gerente de Des. Produto e Assistência Técnica, Schmolz-Bickenbach do Brasil Ltda, Rua Roberto Koch, 277 CEP 04221-060, São Paulo, Brazil. Email: f.arieta@schmolz-bickenbach.com.br;*

³ *Membro da ABM, Engenheira Metalurgista e de Qualidade, Gerência de Des. Produto e Assistência Técnica, Schmolz-Bickenbach do Brasil Ltda, Rua Roberto Koch, 277 CEP 04221-060, São Paulo, Brazil. Email: m.gattinger@schmolz-bickenbach.com.br ;*

⁴ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, MSc, Marketing & Vendas, Schmolz-Bickenbach do Brasil Ltda, Rua Roberto Koch, 277 CEP 04221-060, São Paulo, Brazil. Email: d.silva@schmolz-bickenbach.com.br*

⁵ *Membro do conselho da ABM, Engenheira Metalurgista, MSc, Gerente Geral da Divisão de Testes Brasil, Bodycote Brasimet Processamento Térmico S/A, Av. Nações Unidas, 21476, CEP 04795-912 São Paulo SP, Brazil. Email: eliana.netto@bodycote.com*

1 INTRODUÇÃO

O tradicional aço ferramenta similar à norma AISI D2 ou WNr 1.2379 com $\approx 1,55\%C$ $12\%Cr$ $0,9\%Mo$ $0,9\%V$ é ainda um dos aços ledeburíticos mais utilizados na indústria para ferramentais para trabalho a frio, onde um balanço de propriedades como alta resistência ao desgaste e moderada tenacidade é requisitado.

Mais recentemente, porém, uma nova geração com composição química básica de $\sim 1,0\%C$ $\sim 8\%Cr$ + elementos de transição (principalmente V, Mo, Nb) foram desenvolvidos^[1-3] e que, com sua melhor homogeneidade microestrutural, menor tamanho e distribuição de partículas de segunda fase assim como melhorias nos processos de refino como ESR (refino em eletro-escória) e VAR (refino em arco sob vácuo), acabaram produzindo os chamados aços ledeburíticos "matrix" com superior tenacidade, similar resistência ao desgaste e menor distorção^[4] após tratamento térmico que o tradicional AISI D2/ WNr 1.2379.

Apesar disso, poucos trabalhos tem sido feitos comparando as propriedades mecânicas e a tenacidade entre o aço AISI D2 e os novos aços com $8\%Cr$, após realização dos mesmos ciclos de tratamento térmico. Recentemente,^[5-6] grande ênfase tem sido dada aos tratamentos criogênicos em aços ferramenta e aços rápidos, visto que estes minimizam de forma drástica o conteúdo de austenita retida, assim como potencializam a precipitação de carbonetos muito finos e homogeneamente distribuídos durante o revenimento, promovendo assim, valores mais elevados de tenacidade, dureza e resistência ao desgaste.

Este trabalho tem como objetivo comparar a influência da temperatura de austenitização, utilizada no tratamento térmico a vácuo e posterior tratamento criogênico, na dureza e na resistência ao impacto entre o aço AISI D2 e aços ledeburíticos "matrix" com $8\%Cr$.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Corpos de prova com diâmetro 100 mm e 100 mm de comprimento foram cortados de barras laminadas do aço AISI D2, assim como de vários aços para trabalho a frio ledeburíticos com, aproximadamente, $8\%Cr$. A composição química do aço D2 investigado assim como a faixa típica de composição química dos aços $8\%Cr$ utilizados neste trabalho, podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1: Composição Química (% peso) dos aços investigados

Aço	%C	%Cr	%Mo	%V	%Nb	%Mn	%Si	%P	%S
D2	1,51	10,89	0,60	0,79	0,03	0,37	0,34	0,015	0,007
8%Cr	1,00 \pm 0,20	8,00 \pm 0,50	2,00 \pm 0,50	1,0 \pm 0,5	< 0,60	< 0,50	< 1,00	< 0,030	< 0,015

2.2 Tratamento Térmico

Um forno a vácuo com capacidade de até 10 bar de pressão da Bodycote-Brasimet Processamento Térmico S.A., São Paulo, foi utilizado como meio de tratamento térmico para os aços investigados. Os CPs foram carregados simultaneamente dentro do forno e, tanto a temperatura quanto o tempo foram monitorados

continuamente, via computador, durante todo o ciclo utilizado. Este último consistiu de três pré-aquecimentos a 600°C, 850°C e 980°C, cujo tempo de encharque foi de 15 minutos, 39 minutos e 17 minutos, respectivamente, seguido de austenitização por 36 minutos a três temperaturas distintas: 1.030°C, 1.060°C e 1.120°C. A escolha dessas três temperaturas foi baseada nos seguintes critérios: 1.030°C é a temperatura mais utilizada e recomendada tanto para o aço AISI D2 como para os aços 8%Cr, conforme a literatura e os catálogos dos fabricantes de aços; 1.060°C é a uma temperatura um pouco mais elevada e, também, recomendada pelos fabricantes dos aços e bastante utilizada tanto para o aço AISI D2 assim como para os aços 8%Cr, quando se objetiva maior dureza e resistência ao desgaste, aliada ainda com boa tenacidade; 1.120°C é uma temperatura bastante elevada e, portanto, raramente utilizada, porém foi escolhida com intuito de avaliar sua influência na tenacidade dos aços investigados.

Após a austenitização, os CPs foram resfriados com 10 atm de pressão de N₂, seguido de tratamento térmico criogênico, especial da Bodycote Brasimet denominado Cryo. Em seguida todos os CPs foram revenidos três vezes por duas horas cada à 520°C.

2.3 Testes de Impacto

Para minimizar a ocorrência de valores baixos de energia absorvida durante os testes de impacto e conseqüente imprecisão nos resultados dos aços investigados, foi descartada a utilização de testes de impacto *Charpy* com corpos de prova (CP) com entalhe em “V”. Nos Estados Unidos é usual a utilização de corpos de prova com entalhe em “C”, enquanto que na Alemanha e em muitos países europeus a opção mais comum é utilização de CPs sem entalhe. Esta opção foi escolhida nesta investigação. Além disso, devido ao alto teor de carbono e elementos de transição (Cr, Mo, V, Nb etc.) e a inevitável presença de bandeamento de carbonetos eutéticos que provocam queda nos valores de energia absorvida, todos os CPs foram retirados do sentido longitudinal das barras laminadas redondas. CPs retangulares, medindo 7 x 10 x 55 mm foram preparados de acordo com a norma alemã Stahl-Eisen-Prufblatter (SEP1314) German Standard. Com objetivo de evitar irregularidades superficiais que poderiam gerar pontos concentradores de tensão, todos os CPs sofreram operação de fresamento e retifica com precisão de 7,0±0,1 x 10±0,1 x 55 ±1 mm, perpendicularismo entre lados adjacentes de 90°±10 minutos e rugosidade superficial $R_a \leq 0,5 \mu\text{m}$. Todos os Cps foram numericamente identificados na superfície de face # 7 x 10 mm e pelo menos três Cps foram utilizados. Todos os testes de impacto foram realizados em uma máquina cuja capacidade era de 300 Joules e o ensaio foi conduzido à temperatura de 20±1°C.

2.4 Metalografia e Ensaio de Dureza

Metalografia ótica das microestruturas nos estados recozido e após revenimentos dos aços investigados, assim como medições de dureza e tamanho de grão pós tratamento térmico foram as técnicas utilizadas nesta investigação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os CPs de impacto apresentaram em ambas as faces retificadas (7 x 55 e 10 x 55 mm) um valor médio de rugosidade de $R_a = 0,35 \pm 0,12 \mu\text{m}$, ou seja, de

acordo com os valores objetivados. Após o tratamento térmico a vácuo esse valor médio não se alterou significativamente.

Os valores médios de durezas alcançados com os aços AISI D2 e 8%Cr após austenitização à 1.030°C, 1.060°C e 1.120°C, tratamento criogênico e três revenimentos de duas horas cada à 520°C podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Dureza dos aços AISI D2 e 8%Cr após austenitização a 1.030°C, 1.060°C e 1.120°C, seguido de tratamento criogênico, têmpera e revenimento à 520°C.

Aço	Dureza (HRC)		
	1.030°C	1.060°C	1.120°C
AISI D2	57,9 ± 0,8	58,6 ± 0,7	61,2 ± 0,2
8%Cr	62,1 ± 1,1	63,1 ± 1,1	63,8 ± 0,9

Como podem ser observados, os valores médios dos aços 8%Cr foram sensivelmente superiores ao AISI D2. Ou seja, aproximadamente 4 pontos HRC superior às temperaturas de 1.030°C e 1.060°C e cerca de 2,5 pontos HRC superior à 1120°C. A relação entre os valores médios de dureza do aço AISI D2 e os aços com 8%Cr, em função da temperatura de austenitização pode ser vista na Figura 1. A precisão média dos resultados é de ± 1HRC e um bom coeficiente de correlação linear foi alcançado.

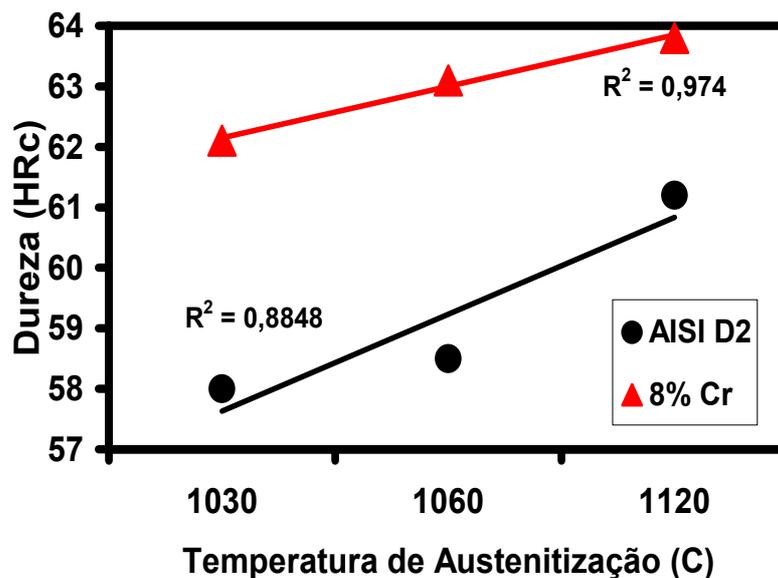


Figura 1: Efeito da temperatura de austenitização no valor médio da dureza dos aços AISI D2 e aços 8%Cr.

Os valores de impacto alcançados pelos aços AISI D2 e grupo de aços 8%Cr, após austenitização à 1.030°C, 1.060°C e 1.120°C, tratamento criogênico e três revenimentos de duas horas cada à 520°C pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3: Impacto dos aços AISI D2 e 8%Cr após austenitização à 1.030°C, 1.060°C e 1.120°C, seguido de tratamento criogênico, têmpera e revenimento à 520°C.

Aço	Impacto (joules)		
	1.030 °C	1.060 °C	1.120°C
AISI D2	15 ± 2	11 ± 1	6 ± 1
8%Cr	21 ± 3	18 ± 5	5 ± 2

Como pode ser observado, os valores médios alcançados com os aços 8%Cr foram cerca de 33% à 45% superiores ao AISI D2 porém, somente às temperaturas de 1.030°C e 1.060°C, respectivamente. À 1.120°C, os valores médios decresceram de forma drástica para todos os aços e se equivaleram. O maior desvio padrão encontrado com os aços 8%Cr é explicado em parte pela maior população de aços testados e obviamente pelas diferenças de composição química entre eles, conforme visto na Tabela 1, assim como diferenças microestruturais. A relação entre os valores médios de impacto do aço AISI D2 e dos aços 8%Cr em função da temperatura de austenitização, pode ser vista na Figura 2. A precisão dos resultados é de ± 2 joules. Um bom coeficiente de correlação linear entre os valores de impacto e a temperatura de austenitização foi alcançado.

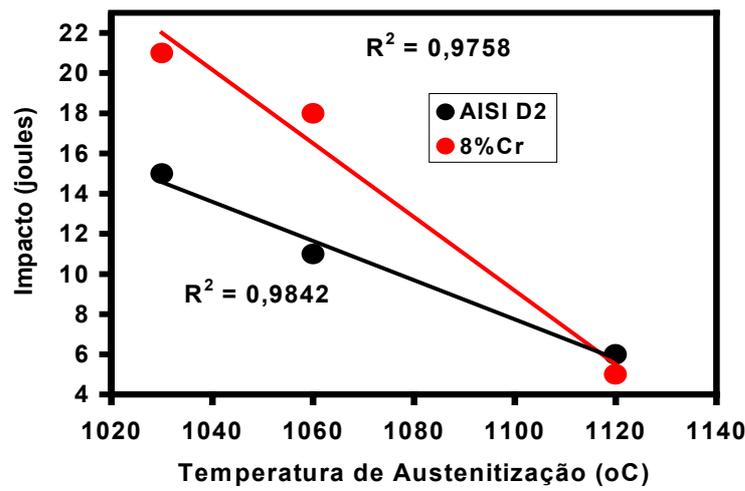


Figura 2: Efeito da temperatura de austenitização no valor médio de impacto dos aços AISI D2 e aços 8%Cr.

Quando os valores de impacto foram plotados contra dureza para o aço AISI D2 e para os aços 8%Cr obteve-se a correlação esperada, ou seja, quanto maior a dureza menor a energia absorvida e o resultado pode ser visto na Figura 3. Em termos de coeficiente de correlação, os valores foram bastante elevados para o AISI D2 e menos satisfatórios para os aços 8%Cr. Essa diferença, porém, conforme explanado acima, é atribuída ao maior número de testes com os aços 8%Cr e principalmente pelas diferenças significativas entre eles, quanto à composição química e microestrutura. Análises mais detalhadas dessas diferenças estão sendo efetuadas e serão escopo de outro trabalho.

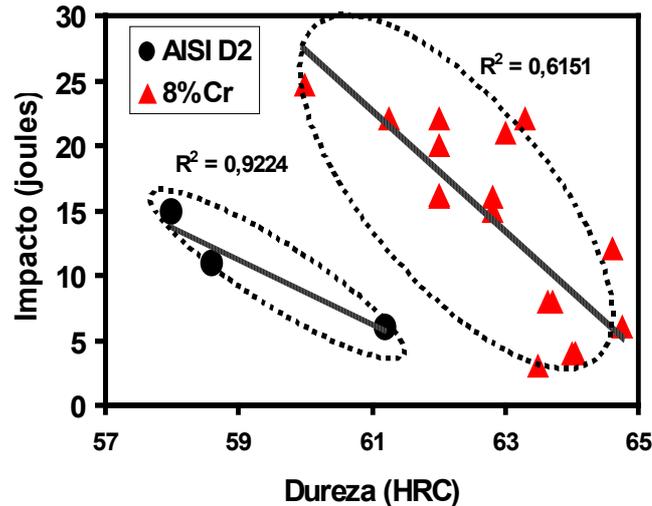


Figura 3: Efeito da temperatura de austenitização no valor médio de impacto dos aços AISI D2 e aços 8%Cr.

Os resultados obtidos desta investigação demonstraram que após a austenitização às temperaturas de 1.030°C, 1.060°C e 1.120°C, os aços com 1,00 ± 0,20 % C, 8%Cr e %V = 1,0 ± 0,5; % Mo = 2,00 ± 0,50 e %Nb < 0,50, seguidos de tratamento criogênico e três revenimentos de duas horas cada à 520°C, apresentaram uma resposta muito melhor ao revenimento e uma tenacidade muito superior quando comparadas com o tradicional aço AISI D2, corroborando com os resultados disponíveis na literatura para esses tipos de aços.^[1-3] Porém, os resultados mostraram também uma queda substancial na tenacidade dos aços 8%Cr quando austenitizados à 1.120°C, atingindo valores similares ao D2, sugerindo assim, que essa temperatura de austenitização e revenimento de 520°C, deveriam ser escolhidos somente nos casos em que as ferramentas necessitassem de elevada resistência ao desgaste sem requisito de tenacidade.

Segundo a literatura,^[1-3] tanto para o AISI D2 como para os aços de 8%Cr, o pico ou máximo de dureza secundária ocorre à temperatura aproximadamente de 520°C. Assim, estão sendo executados testes complementares, usando-se a temperatura de austenitização de 1.120°C, porém o revenimento está sendo feito a temperaturas mais elevadas, visando a avaliação do seu efeito na tenacidade e na dureza, tanto dos aços 8%Cr como com o tradicional AISI D2.

Embora a temperatura de austenitização mais elevada de 1.120°C aumente substancialmente o conteúdo de carbono e elementos de transição como Cr, Mo e V em solução na austenita e conseqüentemente, mais carbonetos pró-eutetóides são precipitados durante o revenimento aumentando-se assim a dureza e diminuindo a tenacidade, um efeito secundário deletério adicional na tenacidade dos aços 8% de Cr é o crescimento de grão que necessita ser analisado. Os elementos de transição (Nb, V, Mo) formam carbonetos complexos específicos como do tipo MC (no caso do Vanádio e Nióbio), M₆C (no caso do Molibdênio) e que se são mais estáveis e, portanto, solubilizam em temperaturas mais elevadas que os carbonetos de Cromo do tipo M₂₃C₆, abundantes no caso do aço AISI D2. Assim, dependendo do tipo de carboneto, seu tamanho e sua fração volumétrica podem em conjunto provocar um efeito de “pinning” eficiente no grão austenítico, beneficiando, portanto, a tenacidade dos aços investigados. Como os carbonetos do tipo MC são aqueles que se solubilizam a temperaturas mais elevadas, é esperado que os aços que tenham maior conteúdo de C, Nb e V tenham tamanhos de grão mais finos.

As microestruturas do aço AISI D2 e de dois aços com aproximadamente 1% C e 8%Cr (mais adições de Mo, V, Nb) após austenitização a 1.030°C, 1.060°C e 1.120 °C, seguido de têmpera e revenimento, podem ser vistas na Figura 4 (a), (b), (c).

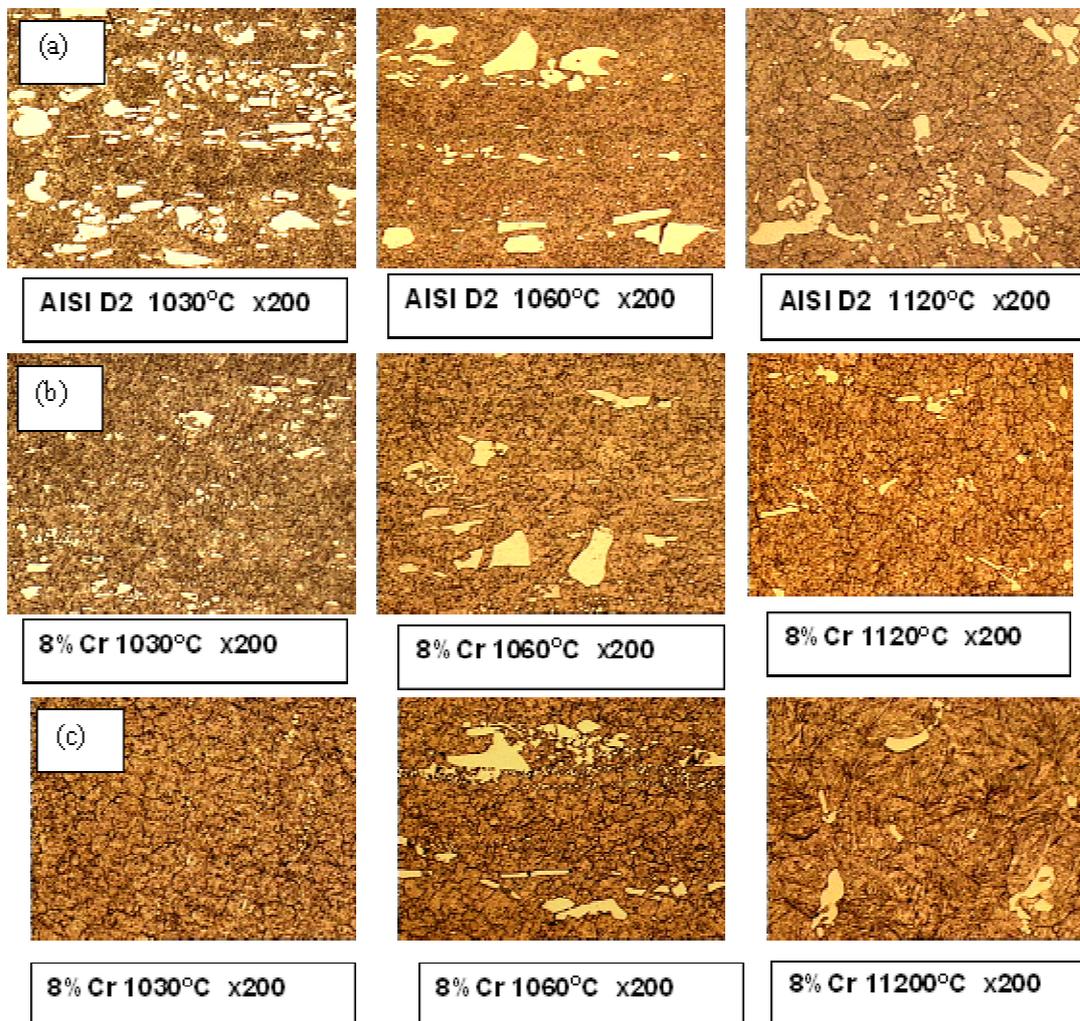


Figura 4: Típicas micrografias observadas nos aços AISI D2 (a) e aços Matrix 8%Cr (b), (c), após austenitização a 1.030°C, 1.060°C e 1.120°C.

Ataque: Vilella

Como pode ser observada, a microestrutura do aço AISI D2 (Figura 4a) é composta de carbonetos primários grosseiros (até aproximadamente 30 μm) enquanto que nos aços com 8%Cr (Figura 4b e 4c) os carbonetos são bem menores (aproximadamente 15 μm). Observa-se também que à 1.120°C em um dos aços 8%Cr (Figura 4c) houve crescimento de grão a 1.120°C, se comparado com a microestrutura do mesmo aço a 1.030/C ou 1.060°C. No outro aço 8%Cr (Figura 4b), porém, o tamanho de grão ficou praticamente inalterado à 1.120°C. Assim sendo, essas diferenças no tamanho de grão podem explicar, por exemplo, (conforme visto na Figura 3) que dentre os aços 8%Cr há alguns que, mesmo à dureza mais altas (> 62 HRC) apresentam valores de impacto da ordem de 8 joules, ou seja, cerca de 30% superior ao AISI D2 e outros aços com 8%Cr às mesmas durezas mais elevadas, atingidas com a temperatura de austenitização de 1.120°C. Coincidentemente, esses aços foram aqueles que tem teores de carbono $\geq 1,0$ % C, em conjunto com teores mais elevados de Carbono, Vanádio e Nióbio.

A microestrutura vista na Figura 4 (a) mostra que, surpreendentemente, o AISI D2 não mostrou crescimento de grão após austenitização à 1120°C, ficando na mesma ordem de grandeza do aço 8%Cr (Figura 4b) que apresentou grão mais fino. Análises preliminares do tamanho de grão via método de Snyder-Graff (SG) resultaram em valores de SG de aproximadamente 12 a 13 (ou seja, tamanho de grão ASTM aproximadamente 10) tanto para o AISI D2 como para os aços 8%Cr, com teor de Vanádio na sua faixa máxima (vide tabela 1). É muito provável que, devido ao tamanho grosseiro dos carbonetos complexos de cromo, o tempo não tenha sido suficiente para solubilizar os carbonetos e o “efeito de *pinning*” tenha ocorrido. Porém, os resultados que correlacionam composição química, dureza, tamanho de grão e fração volumétrica de carbonetos, para todos os aços investigados, está sendo escopo de outro trabalho, atualmente em progresso.

4 CONCLUSÕES

- A dureza e tenacidade ao impacto entre o tradicional aço AISI D2 e aços com 8%Cr e teores variados de C, V, Mo e Nb, foram comparadas após tratamento térmico simultâneo à vácuo utilizando temperaturas de austenitização de 1030, 1060 e 1120°C, seguida de tratamento criogênico e três revenimentos à 520C de duas horas cada.
- Os resultados mostraram que para todos os aços investigados, quanto mais alta temperatura de austenitização, mais alta a dureza final.
- O aço AISI D2 atingiu valores médios de 58 HRC, 59 HRC e 61 HRC e são sensivelmente inferiores aos valores médios de 62 HRC, 63 HRC e 64 HRC alcançados como os aços 8%Cr.
- Os resultados mostraram que para todos os aços investigados quanto mais alta temperatura de austenitização, menor o valor de impacto.
- O aço AISI D2 atingiu valores médios de impacto de 15 joules, 11 joules e 6 joules a 1.030°C, 1.060°C e 1.120°C, respectivamente enquanto que os aços 8%Cr atingiram valores médios de 21 joules, 18 joules e 5 joules, respectivamente.
- Os baixos valores de impacto encontrados quando os aços são tratados à temperatura de austenitização de 1.120°C, tratamento criogênico e revenimento à 520°C restringem o uso desses aços, (processados via o ciclo térmico utilizado nesta investigação) para usos somente onde houver aplicações cuja exigência for alta resistência ao desgaste e limitada tenacidade.

REFERÊNCIAS

- 1 H Nakamura, N Tsujiii, D Yokoi, G Abe, “Properties of New Developed 8%Cr Cold Work Tool Steel”, *Progress in Tool Steels*, Proceed. of 4th Int. Conf. on Tooling, Ruhr-University Bochum, September 11-13th, 1996, p 113;
- 2 H Schweiger, H Lenger, A Six, “New Problem Solution for Severely Stressed Precision Cold Work Tools Bohler K-340 Ecostar” ; *Progress in Tool Steels*, Proceed. 4th Int. Conf. on Tooling, Ruhr-University Bochum, Germany, September 11-13th, 1996, p 103;
- 3 D Yokoi, N Tsujiii, T Isomoto, “Effect of Carbide Size on Mechanical Properties of Cold Work Tool Steels”, *Tools in the Next Century*, Proceed. 5th Int. Conference on Tooling, University of Leoben, Austria, September 29th-October 1st, 1999, p 103;

- 4 F G Arieta, D P Silva, E B Netto, C Ernst e W Pannes, "Microstructure and Distortion after Vacuum Treatment of Conventional and Recently developed Cold Work Tool Steels, Tooling Materials and Their Applications from Research to Market, Proced. 7th Int Tooling Conference, Torino, Italia 2-5 Maio, 2006, vol I, p 21-28;
- 5 M Pellizzari e A Molinari. "Deep Cryogenic Treatment of Cold Work Tool Steel", The Use of Tool Steel : Experience and Research, Proced. da 6a Int Tooling Confer. Karlstad University, Suécia, Setembro 1-13, 2002, p 547-557;
- 6 T Yugandhar, P K Krishnan, C V Bhaskar Rao e R Kalidas, "Criogenic Treatment and its effect on Tool Steel", ibid [5] , p 559-569