

# EFEITO DO TRATAMENTO CRIOGÊNICO NA CURVA DE REVENIMENTO DO AÇO FERRAMENTA AISI D2<sup>1</sup>

Paula Fernanda da Silva<sup>2</sup>  
Rafael Agnelli Mesquita<sup>3</sup>  
Hélio Goldenstein<sup>4</sup>  
Celso Antonio Barbosa<sup>5</sup>

## Resumo

O tratamento criogênico vem se apresentado como uma etapa importante no tratamento térmico de aços ferramenta, sendo a ele atribuída uma considerável melhora na resistência ao desgaste. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados iniciais obtidos no estudo deste assunto. Serão apresentadas as curvas de revenimento obtidas para amostras com e sem a etapa de criogênica. Amostras de um aço ferramenta AISI D2 seguiram duas rotas paralelas de tratamento térmico para determinação da curva de revenimento. Na primeira delas as amostras foram submetidas a têmpera + revenimento e na segunda a têmpera + alívio de tensões + tratamento criogênico + revenimento. As temperaturas de austenitização foram 1.010°C, 1.040°C e 1.100°C, do alívio de tensões foi 130°C, do tratamento criogênico -196°C e do revenimento variou entre 400°C e 600°C. Os resultados encontrados não foram os mesmos apresentados pela literatura. De uma maneira geral, não houve mudança nas curvas de revenimentos das amostras com e sem tratamento criogênico, exceto para as amostras tratadas a 1.100°C devido a alta fração volumétrica de austenita retida.

**Palavras-chave:** AISI D2; Tratamento criogênico; Curva de revenimento.

## EFFECT OF CRYOGENIC TREATMENT IN THE TEMPERING CURVE OF THE HIGH SPEED STEEL AISI D2

### Abstract

The cryogenic treatment has been showed as an important stage in the heat treatment of tool steels, it has been attributed to it a considerable improvement in the wear resistance. The aim of this work is to present the initial results got in the study of this subject. It will be shown the tempering curves for specimens with and without the cryogenic stage. Specimens of an AISI D2 tool steel followed two parallel routes for the determination of the tempering curves. In the first one, the specimens were submitted to quench + tempering, and in the second one, to quench + stress relief + cryogenic treatment + tempering. The austenitizing temperatures were 1010, 1040 e 1100°C, the stress relief temperature was 130°C, the cryogenic temperature was -196°C and the tempering temperature varied between 400 and 600°C. The found results were not the same as the showed by the literature. In a general way, there were not changes in the tempering curves for the specimens with and without cryogenic treatment, exception for the samples heat treated at 1100°C due to the high volumetric fraction of retained austenite.

**Key words:** AISI D2; Cryogenic treatment; Tempering curve

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 6° Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 20 a 22 de agosto de 2008, São Paulo, SP*

<sup>2</sup> *Mestre em Engenharia Metalúrgica, membro da ABM. Doutoranda em Eng. Metalúrgica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e-mail: pfsilva2@gmail.com*

<sup>3</sup> *Engenheiro de Materiais, membro da ABM, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: rafael.mesquita@villares.com.br*

<sup>4</sup> *PhD, membro da ABM, Professor Titular do Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e-mail: hgoldens@usp.br*

<sup>5</sup> *Engenheiro Metalurgista, membro da ABM, Gerente de Tecnologia da Villares Metals S. A., Sumaré - SP, Brasil, e-mail: celso.barbosa@villares.com.br.*

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento criogênico consiste em uma etapa adicional ao ciclo de tratamento térmico no qual o material é submetido a temperaturas de  $-196^{\circ}\text{C}$  (temperatura do nitrogênio líquido) com resfriamento e aquecimento lentos e controlados e tempo de permanência a temperatura criogênica variando de 15 minutos a 48 horas.

O tratamento criogênico vem se apresentando como um método para melhorar as propriedades mecânicas e, principalmente, tribológicas dos aços ferramenta. A literatura, porém, não apresenta de forma sistemática e conclusiva os fenômenos que ocorrem durante o tratamento criogênico e o revenimento que o segue.

Os micromecanismos propostos para explicar os fenômenos que ocorrem com a microestrutura durante a permanência a temperatura criogênica e no subsequente aquecimento (podendo ou não ser o revenimento) são os seguintes: i) transformação da austenita retida em martensita;<sup>(1-3)</sup> ii) decomposição e condicionamento da martensita;<sup>(3-5)</sup> e iii) precipitação<sup>(3,5)</sup> ou aumento da fração volumétrica<sup>(4,6)</sup> de carbonetos  $\eta$  (eta).

Apesar do número razoável de trabalhos mostrando melhorias, principalmente na resistência ao desgaste, nos aços ferramentas submetidos ao tratamento criogênico, um número muito limitado dentre eles propõe mecanismos para as transformações que ocorrem a temperatura criogênica para explicar as melhorias apresentadas.

A etapa de revenimento é outro assunto pouco discutido na literatura e que apresenta muitas variações entre os trabalhos. Uma primeira discussão seria a posição da etapa de revenimento, se antes ou após o tratamento criogênico, a temperatura e o número de ciclos de revenimento. Além disso, o objetivo do revenimento é discutido, se ele visa a máxima dureza secundária ou uma determinada fração volumétrica de carbonetos  $\eta$ .

No trabalho de Yun, Xiaoping e Hongshen<sup>(4)</sup> dizem que se o revenimento for realizado entre a etapa de têmpera e a etapa de revenimento, após o tratamento criogênico somente 1,5% da austenita retida permanecerá na microestrutura e que se o tratamento criogênico for realizado após a etapa de revenimento, cerca de 5% da austenita permanecerá retida na microestrutura do aço rápido M2. Segundo os autores, isto ocorre devido a estabilização da austenita durante a etapa de revenimento quando a mesma é realizada antes do tratamento criogênico.

Moore e Collins<sup>(2)</sup> realizaram uma série de experimentos para verificar o efeito dos parâmetros do tratamento criogênico na dureza de aços ferramenta (AISI D2 e Vanadis 4). Dentre estes parâmetros estava o tempo de permanência à temperatura ambiente entre a têmpera + tratamento criogênico e o revenimento. Não houve queda na dureza para tempos de até 20 horas. Concluíram que a estabilização da austenita não é significativa sob estas condições. Não apresentaram, entretanto, medições de austenita retida nem antes e nem após o tratamento criogênico.

Mohan Lal, Renganarayanan e Kalanidh<sup>(7)</sup> também realizaram a etapa de tratamento criogênico entre as etapas de têmpera e revenimento e após têmpera + revenimento. Certificaram-se de que não havia austenita retida em nenhuma das amostras fazendo análise de difração de raios-X. Nas primeiras a resistência ao desgaste foi maior, e em ambas a resistência ao desgaste foi maior do que nas tratadas convencionalmente (têmpera + revenimento). Pellizari et al.<sup>(8)</sup> também realizaram estes dois ciclos de tratamento térmico incluindo o tratamento criogênico

e da mesma forma obtiveram melhor desempenho em desgaste com o tratamento criogênico realizado entre têmpera e revenimento e a tenacidade a fratura manteve-se constante.

Portanto, os trabalhos <sup>(4,7,8)</sup> apontam que a inclusão da etapa de criogenia no ciclo térmico melhora as propriedades mecânicas e tribológicas dos aços ferramenta qualquer que seja a sua posição. No entanto, se o tratamento criogênico for realizado entre a têmpera e o revenimento a melhora nestas propriedades é ainda maior.

Conforme citado anteriormente, a temperatura do tratamento térmico de revenimento pode ser escolhida visando uma fração volumétrica pré-definida de carbonetos  $\eta$  ou a máxima dureza.

Segundo Yen apud Kamody<sup>(9)</sup> a fração volumétrica de carbonetos  $\eta$  precipitados após têmpera + criogênico + revenimento é função da temperatura e do tempo de revenimento. Eles não citaram o modo utilizado para medição de fração volumétrica dos carbonetos  $\eta$ , mas apresentaram resultados nos quais verifica-se que quanto maior o tempo e maior a temperatura de revenimento, maior será a fração volumétrica de carbonetos  $\eta$ . Segundo eles há uma fração volumétrica ótima para a resistência ao desgaste em torno de 5%, acima disto a resistência ao desgaste torna-se constante (a máxima fração volumétrica de carbonetos  $\eta$  obtida por eles foi de 6%).

Yen apud Kamody<sup>(10)</sup> determinou então ciclos de revenimento para a precipitação de 5% de carbonetos (temperaturas altas – tempos curtos; temperaturas baixas – tempos longos), conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Temperatura de revenimento em função do tempo para precipitação de 5% de carbonetos  $\eta$ .<sup>(10)</sup>

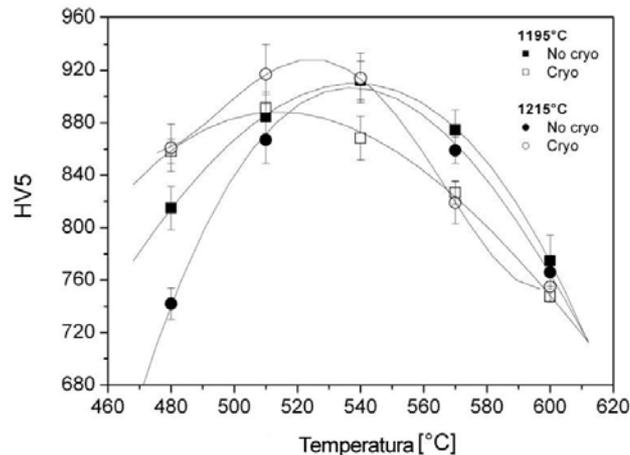
|            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| T (°C)     | 650 | 595 | 540 | 480 | 425 | 370 | 315 | 260 | 205 | 150 |
| t (min/cm) | 2   | 4   | 8   | 12  | 30  | 45  | 75  | 90  | 120 | 150 |

Alguns autores<sup>(4,11,12)</sup> citaram o aumento na dureza como uma das melhorias conferida ao aço ferramenta submetido ao tratamento criogênico. Este aumento na dureza é discutível, pois pode ser conferido simplesmente à transformação da austenita retida em martensita e não ter nenhuma correlação com a precipitação de carbonetos  $\eta$ .

Molinari et al.<sup>(11)</sup> atribuíram a melhora na resistência ao desgaste nas amostras tratadas criogenicamente ao aumento na dureza. No entanto, a maior diferença de dureza entre aços (M2) tratados convencionalmente e com a etapa criogênica foi de 68 HV e não foi apresentado o erro experimental destes valores. No trabalho de Yun, Xiaoping e Hongshen<sup>(4)</sup> verificaram a máxima diferença de dureza de 1,8 HRC para o aço T1 e 1,1 HRC para o aço M2 em amostras tratadas convencionalmente e com a inclusão da etapa criogênica, da mesma forma, não apresentaram o erro envolvido. No trabalho de Leskovsek e Ule<sup>(12)</sup> esta diferença foi de 1,5 HRC com desvio de 0,5 HRC.

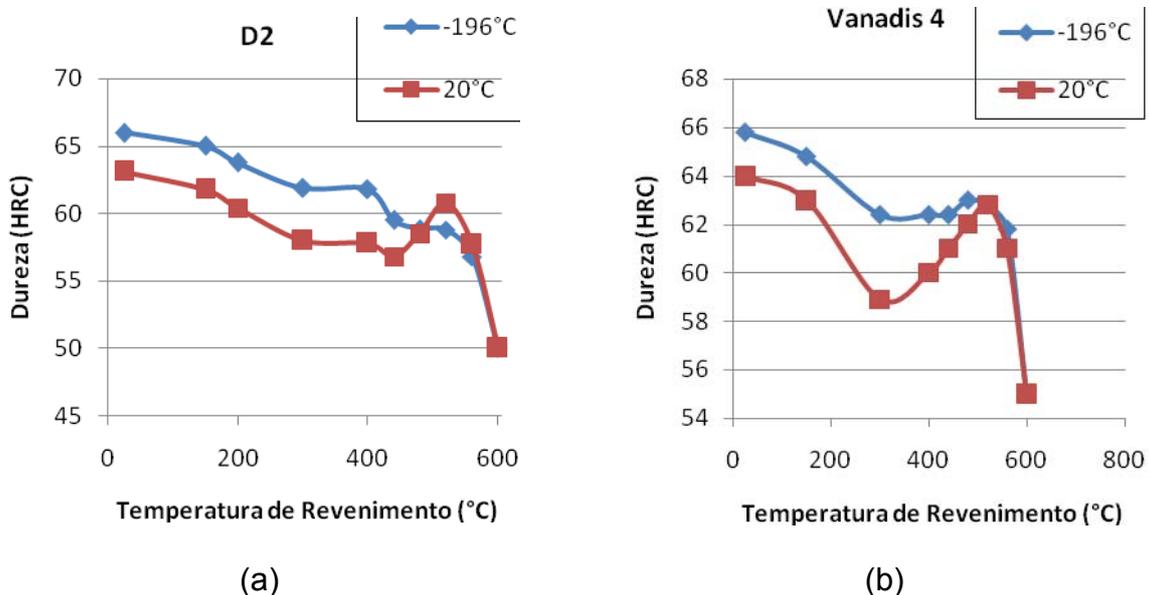
Segundo Pellizari et al.,<sup>(8)</sup> a ausência do aumento da dureza (ou mesmo a queda) nos materiais tratados por têmpera + criogênico + revenimento (triplo) pode ser atribuída à mudança no pico de dureza secundária destes aços quando comparados com os tratados convencionalmente. A Figura 1 apresenta a curva de revenimento para o aço M2 tratado convencionalmente (com duas temperaturas de austenitização) e com a inclusão da etapa criogênica. Verifica-se que, para as duas temperaturas de austenitização, há um deslocamento do pico de dureza secundária

para o lado esquerdo da curva, ou seja, para temperaturas mais baixas. Segundo os autores se o aço for revenido nas temperaturas tradicionalmente utilizadas ele sofrerá um “*over-tempering*”. No entanto, o coalescimento deveria ocorrer nos carbonetos eutéticos, que são os mesmos nas amostras com e sem tratamento criogênico. Os carbonetos  $\eta$  seriam muito finos e, segundo Speich e Leslie,<sup>(13)</sup> carbonetos secundários muito finos atrasam e não antecipam o *over-tempering*.



**Figura 1** - Curva de revenimento do aço M2. (No cryo): t $\acute{e}$ mpera (1.195 $^{\circ}$ C ou 1.215 $^{\circ}$ C – resfriamento em atmosfera de nitrogênio) + revenimento triplo. (Cryo): t $\acute{e}$ mpera (1.195 $^{\circ}$ C ou 1.215 $^{\circ}$ C – resfriamento em atmosfera de nitrogênio) + criogênico (-180 $^{\circ}$ C/24hs) + revenimento triplo.<sup>(8)</sup>

Moore e Collins<sup>(2)</sup> não verificaram o mesmo efeito com o pico de dureza secundária nos aços D2 e Vanadis 4, como pode ser observado na Figura 2.



**Figura 2** - Curva de revenimento dos aços (a) D2 e (b) Vanadis 4. Tratamento convencional (20 $^{\circ}$ C): t $\acute{e}$ mpera (1.075 $^{\circ}$ C) + revenimento duplo por duas horas. (-196 $^{\circ}$ C): t $\acute{e}$ mpera (1.075 $^{\circ}$ C) + criogênico (-196 $^{\circ}$ C/15min) + revenimento único por duas horas.<sup>(2)</sup>

Verifica-se, portanto, da Figura 1 e da Figura 2 que não há um consenso na literatura em relação ao efeito do tratamento criogênico sobre a etapa de revenimento, e/ou, que este estudo deve ser feito separadamente para cada tipo de aço.

A Figura 1 apresenta também indicações do efeito da temperatura de austenitização na dureza final dos aços. Valores de dureza mais baixos para as amostras revenidas a 480°C indicam a presença de austenita retida e que esta presença é mais evidente para os aços austenitizados em temperaturas mais altas, como esperado. Os picos de dureza para as amostras austenitizadas a 1.215°C foram mais altos do que o das amostras austenitizadas a 1.195°C tratados criogenicamente ou não. E o maior valor de dureza foi para a amostra austenitizada a 1.215°C e tratada criogenicamente. Este ganho em dureza, no entanto, refletiu em perda de tenacidade (para as amostras tratadas a 1.215°C). As amostras austenitizadas a 1.195°C mantiveram a tenacidade constante com o aumento da temperatura.<sup>(8)</sup>

Este trabalho tem como objetivo iniciar o estudo do efeito dos tratamentos criogênicos no aço AISI D2, a partir da avaliação das curvas de revenimento. Para isto, foram comparados tempos de revenimento e a presença ou não da etapa criogênica, para três temperaturas de austenitização. O tratamento criogênico foi realizado como uma etapa adicional à têmpera, ou seja, entre a têmpera e o revenimento. No futuro, tais informações serão comparadas a outros ensaios, como testes de resistência ao desgaste, tenacidade e avaliação da precipitação de carbonetos secundários. Assim, o objetivo final será elucidar os efeitos metalúrgicos nas propriedades mecânicas do aço D2 tratado criogenicamente, verificando se a diferença ocorre apenas pela transformação da austenita retida em martensita, ou se existem outros efeitos presentes, como afirmado pelos trabalhos de literatura anteriormente descritos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de um aço ferramenta AISI D2 para trabalho a frio (composição química nominal na Tabela 2) lingotado convencionalmente e laminado até bitola de 52mm.

**Tabela 2** - Composição química nominal de um aço AISI D2 em %peso, Fe-balanço.

| C         | Mn        | Si        | Cr      | V         | Mo         |
|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|------------|
| 1,4 – 1,6 | 0,2 – 0,4 | 0,1 – 0,4 | 11 - 13 | 0,2 – 1,0 | 0,7 – 1,20 |

As amostras foram austenitizadas a 1.010°C, 1.040°C e 1.100°C por 40 minutos, sob vácuo, e temperadas em óleo. Para cada uma das temperaturas de austenitização foram realizados os seguintes tratamentos:

- i) dois revenimentos por uma hora cada (2R/1h);
- ii) 2R/1h + um revenimento por duas horas (1R/2h);
- iii) alívio de tensões a 130°C por 90min + tratamento criogênico a -196°C por 15 minutos (TC);
- iv) TC + 2R/1h;
- v) TC + 2R/1h + 1R/2h.

Para realização do tratamento criogênico, as amostras temperadas em óleo foram imersas em nitrogênio líquido, com aquecimento ao ar até a temperatura ambiente. Os revenimentos e o alívio de tensões foram realizados em forno tipo mufla.

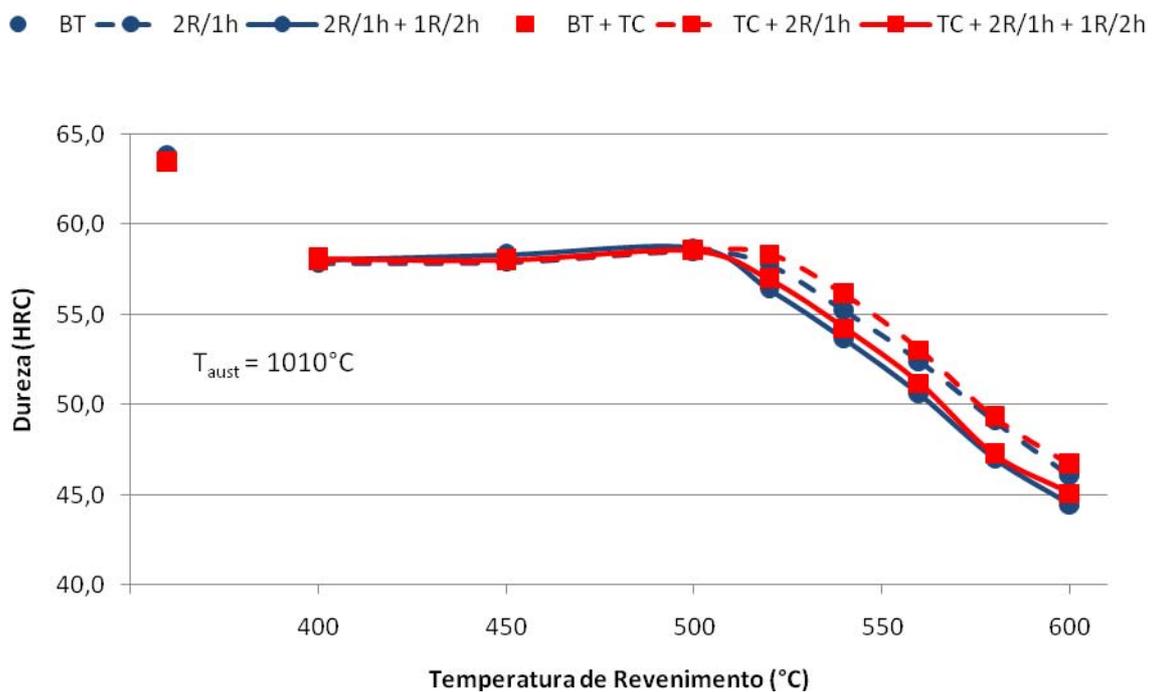
Previamente às medições de dureza, as amostras foram lixadas para remoção da camada oxidada/descarbonetada e para obter planicidade.

### 3 RESULTADOS

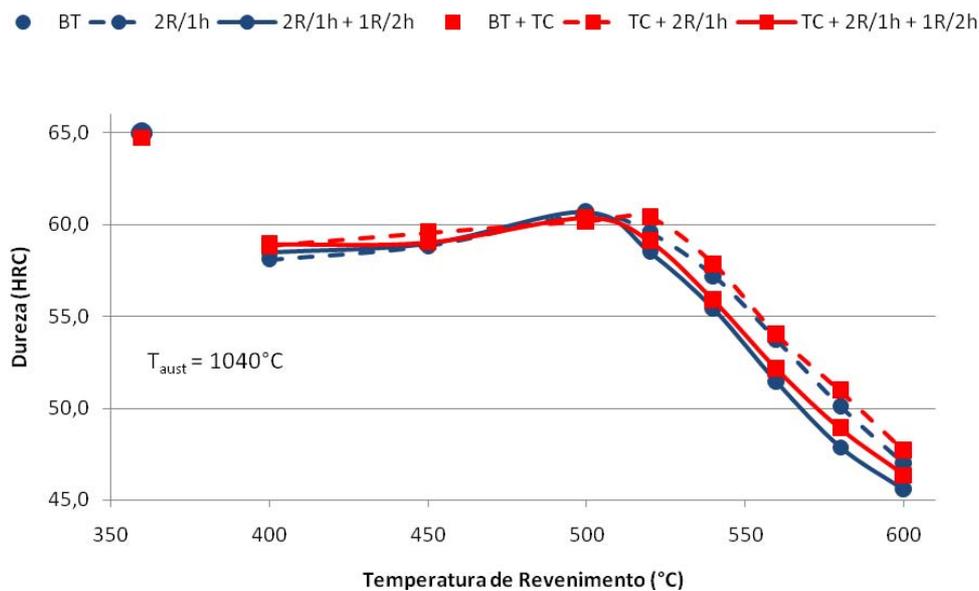
As Figuras 3, 4 e 5 apresentam as curvas de revenimento para as temperaturas de austenitização de 1.010°C, 1.040°C e 1.100°C, respectivamente.

Conforme a Figura 3, os picos de dureza para as amostras austenitizadas a 1010°C variou entre 58,5 e 58,7HRC, ou seja, não houve variação no valor máximo de dureza para as amostras com e sem tratamento criogênico e para os diferentes tempos de revenimento, sendo que o desvio é de 0,2HRC. Para as amostras austenitizadas a 1.040°C(Figura 4), os picos de dureza variaram entre 60,3 e 60,7, estando a variação dentro do desvio das medições (0,2HRC).

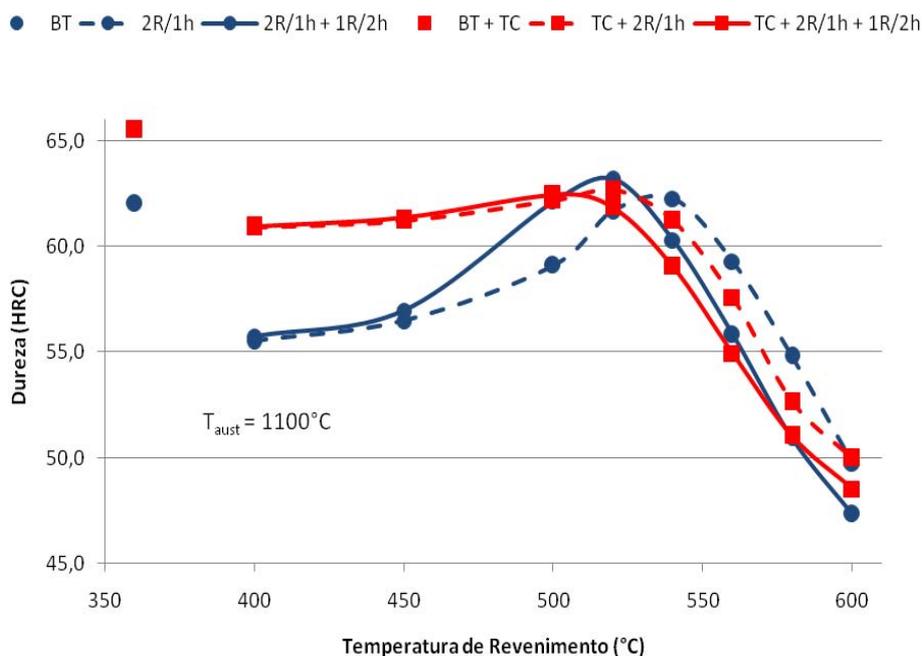
Portanto, para as temperaturas de 1.010°C e 1.040°C, o comportamento das curvas, com e sem tratamento criogênico, para um mesmo tempo de revenimento apresentou-se bastante próximo para os mesmos tempos de revenimento.



**Figura 3** – Curva de revenimento para amostras de um aço AISI D2 austenitizadas a 1.010°C e temperadas em óleo. BT – bruta de têmpera; R – revenimento; TC – tratada criogenicamente. Desvio de 0,2HRC.



**Figura 4** - Curva de revenimento para amostras de um aço AISI D2 austenitizadas a 1.040°C e temperadas em óleo. BT – bruta de têmpera; R – revenimento; TC – tratada criogenicamente. Desvio de 0,2HRC.



**Figura 5** - Curva de revenimento para amostras de um aço AISI D2 austenitizadas a 1.100°C e temperadas em óleo. BT – bruta de têmpera; R – revenimento; TC – tratada criogenicamente. Desvio de 0,2HRC.

Para as amostras austenitizadas a 1.100°C, Figura 5, as curvas com e sem tratamento criogênico apresentaram comportamento diferente. Na região das curvas que antecede o pico de dureza (temperaturas abaixo de 500°C), observa-se uma dureza bastante superior para as amostras com tratamento criogênico. Isto ocorre devido a presença de alta fração volumétrica de austenita retida nestes aços (cerca de 36%)<sup>(5)</sup> quando austenitizados a 1.100°C. Com o tratamento criogênico, esta austenita retida é transformada em martensita, aumentando assim a dureza do material.

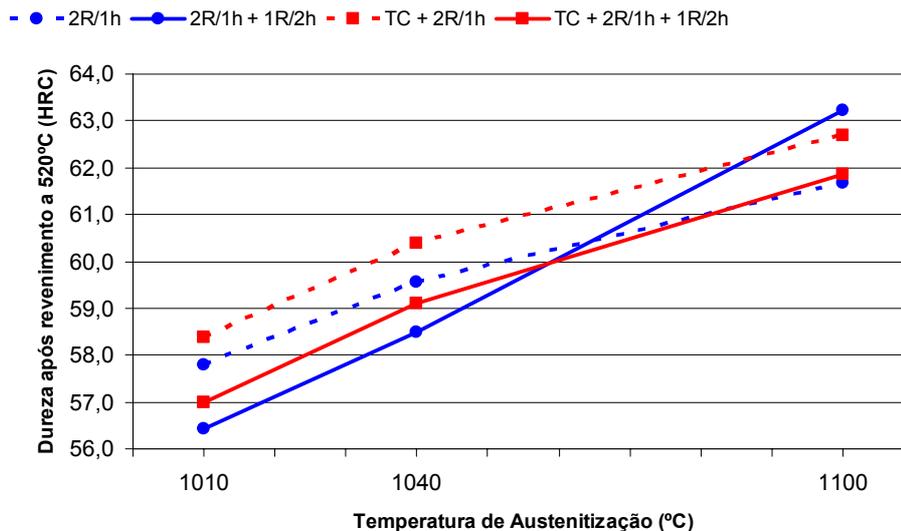
A amostra sem TC e com tempo menor de revenimento apresentou o menor valor de dureza, devido a presença de austenita ainda não transformada. A amostra sem TC e com maior tempo de revenimento (4 horas) apresentou o maior valor de dureza. Nas amostras com TC, o pico de dureza variou entre 62,5 e 62,7 HRC, ou seja, dentro do erro experimental.

#### 4 DISCUSSÃO

As curvas de revenimento obtidas para as temperaturas de austenitização menores (Figuras 3 e 4), de uma maneira geral, não apresentam diferenças de dureza entre o tratamento criogênico e o tratamento sem criogenia. Assim, não tiveram o mesmo comportamento apresentado pela literatura (Figuras 1 e 2). Esta diferença de comportamento, quando os resultados são comparados à Figura 2, pode ser simplesmente um artefato metalúrgico, visto que o presente trabalho emprega as mesmas condições de revenimento no tratamento com e sem criogenia, o que não acontece nos resultados da literatura. Com base apenas nos mecanismos clássicos de revenimento, espera-se diferenças de dureza se o número ou o tempo de revenimento for diferente. Sendo assim, este é o principal fator que dificulta discutir os resultados da literatura. A comparação com a Figura 1 é ainda mais difícil por tratar-se de materiais diferentes.

Nas amostras tratadas a 1.100°C, observou-se uma maior queda na dureza para as amostras com TC (nas temperaturas altas de revenido) ao contrário do observado para temperaturas de austenitização mais baixas. Esta diferença deve ocorrer principalmente pelo teor de austenita retida muito maior na condição de têmpera a 1.100°C. Conforme a literatura, a têmpera com austenitização a 1020°C e 1.040°C geram teores de austenita retida de 12%<sup>(5)</sup> e 14%<sup>(16)</sup> enquanto que na austenitização a 1.100°C o teor aumenta para 40%<sup>(5)</sup> a 60%<sup>(17)</sup>. Pode ocorrer, assim, um efeito significativo de austenita retida que, mesmo após 2 revenimentos, pode transformar-se em martensita não revenida, aumentando a dureza e justificando a dureza mais alta se comparada ao tratamento criogênico. Reforçando este fato, o uso de revenimentos a 600°C mostra o encontro das curvas com e sem TC; ou seja, em temperaturas de revenimento mais altas, em que o efeito da austenita retida é menor, as durezas praticamente coincidem (Figura 5). Além disso, o aumento do número de revenimentos, que também promove maior transformação da austenita retida, tende a diminuir as diferenças entre os tratamentos com e sem TC: observar na Figura 5 a menor distância entre as linhas cheias, relativas a 2 revenimentos, e as tracejadas, de 3 revenimentos.

Uma aplicação prática desses resultados seriam as ferramentas que necessariamente precisam ser revenidas em altas temperaturas (acima de 500°C), como por exemplo, as submetidas a tratamentos de nitretação ou PVD. A Figura 6 apresenta resultados interessantes neste sentido, mostrando a dureza após revenimento a 520°C para as três temperaturas de austenitização. Se a dureza necessária é superior a 60 HRC, o uso de altas temperaturas de austenitização torna-se indispensável. Para austenitização a 1.100°C, como comentado, ainda existe quantidade apreciável de austenita retida, mesmo após 2 revenimentos. E esta austenita retida pode promover instabilidade dimensional e fragilidade, quando transformada em trabalho (por aplicação das tensões de operação da ferramenta). Desta forma, o tratamento criogênico é importante, mantendo a condição de alta dureza e revenido em alta temperatura, mas evitando os efeitos deletérios da austenita retida.



**Figura 4** – Comparação da dureza após revenido a 520°C para as amostras submetidas a três temperaturas de austenitização, com e sem tratamento criogênico e com dois revenimentos (curvas tracejadas) ou três revenimentos (curvas cheias).

Apesar destes primeiros resultados não apresentarem diferença significativa de dureza entre as amostras tratadas e não tratadas criogenicamente, a literatura apresenta melhora em algumas propriedades do material, dentre elas, a mais citada é a resistência ao desgaste. Para verificar estas possíveis mudanças de comportamento serão realizados ensaios de desgaste, em condições abrasivas ou de deslizamento na seqüência do presente trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

As curvas de revenimento não apresentaram o mesmo comportamento das curvas apresentadas pela literatura.

Para as amostras com temperatura de austenitização de 1.010°C e 1.040°C, o comportamento do aço AISI D2 frente ao revenimento é o mesmo quando tratado ou não criogenicamente.

O comportamento das curvas com temperatura de austenitização maior (1.100°C) se deve a alta fração volumétrica de austenita retida. Nestas condições, o tratamento criogênico pode ser importante, evitando a instabilidade dimensional e fragilidade promovida pela austenita retida transformada pelas tensões de trabalho da ferramenta.

## Agradecimentos

À CAPES e à Villares Metals S.A.

## REFERÊNCIAS

- 1 BARRON, R.F. Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance. **Cryogenics**, p. 409-413, 1982.
- 2 MOORE, K. e COLLINS, D.N. Cryogenic treatment of three heat-treated tool steels. **Key Engineering Materials**, v. 86 - 87, p. 4754, 1993.

- 3 MENG, F.K., TAGASHIRA, K. e SOHMA, H. Wear resistance and microstructure of cryogenic treated Fe-1.4Cr-1C bearing steel. **Scripta Metallurgica et Materialia**, v. 31, n. 7, p. 865-868, 1994.
- 4 YUN, D., XIAOPING, L. e HONGSHEN, X. Deep cryogenic treatment of high speed steel and its mechanism. **Heat treatment of metals**, v. 3, p. 55 - 59, 1998.
- 5 MENG, F.K, et al. Role of eta carbide precipitations in the wear resistance improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C tool steel by cryogenic treatment. **ISIJ International**, v. 34, n.2, p. 205-210, 1994.
- 6 HUANG, J.Y., et al. Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel. **Materials Science & Engineering A**, v. A339, p. 241-244, 2003.
- 7 MOHAN LAL, D., RENGANARAYANAN, S. e KALANIDH, A. Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels. **Cryogenics**, v. 41, p. 149-155, 2001.
- 8 PELLIZARI, M., et al. Deep cryogenic treatment of AISI M2 high speed steel. **Anais do International Tooling Conference**, 7., 2006, Torino. Torino, 2006, v. 1, p. 127-134.
- 9 KAMODY, D.J. Using deep cryogenics to advantage. **Advanced Materials and Processes**, v. 10, p. 215 - 218, 1998.
- 10 KAMODY, D.J. Cryogenic Process Update. **Advanced Materials and Processes**, v. 6, pp. H67 - H69, 1999.
- 11 MOLINARI, A., et al. Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, p. 350-355, 2001.
- 12 LESKOVSEK, V. e ULE, B. Influence of deep cryogenic treatment on microstructure, mechanical properties and dimensional changes of vacuum heat-treated high speed steel. **Heat Treatment of Metals**, v. 3, p. 72-76, 2002.
- 13 SPEICH, G.R.; LESLIE, W.C. Tempering of Steel. **Metallurgical Transactions**, v. 3, p. 1043-1054, 1972.
- 14 OKUNO, T. Effect of microstructure on the toughness of hot work tool steels, AISI H13, H10 and H19. **ISIJ International**, v. 27, n.1, 1987.
- 15 MESQUITA, R.A., FRANÇA, L.C. e BARBOSA, C.A. Desenvolvimento de um novo aço ferramenta para trabalho a quente com tenacidade otimizada. Anais do Congresso Anual da ABM, 57, 2002, São Paulo. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002, v. 1 CD ROM, p. 444-453.
- 16 MENDANHA, A. **Estudo da resistência à fratura do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2**. 2004. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- 17 B. L. Averbach, S. A. Kulin and M. Cohen. The Effect of Plastic Deformation on Solid Reactions, Part II: The Effect of Applied Stress on the Martensite Reaction, *Cold Working of Metals*, American Society for Metals, 1949.