

# INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DA MATÉRIA PRIMA E DO TRATAMENTO TÉRMICO NA RESISTÊNCIA À FRATURA DO AÇO AISI D2<sup>1</sup>

*Adriano Mendanha<sup>2</sup>  
Hélio Goldenstein<sup>2</sup>  
Carlos Eduardo Pinedo<sup>2,3</sup>*

## **Resumo**

Foi estudada a influência da estrutura inicial de carbonetos eutéticos e do processo de tratamento térmico na tenacidade do aço para trabalho a frio AISI D2. A tenacidade foi avaliada por ensaio de impacto em amostras não entalhadas e por flexão em 4 pontos. Foi verificado que a energia absorvida sob impacto diminui com o aumento no diâmetro da barra, sendo esta queda mais intensa na direção transversal de teste. Estes resultados são relacionados ao tamanho, morfologia e distribuição dos carbonetos eutéticos, mais desfavorável à medida que o diâmetro do material aumenta, por uma diminuição no grau de deformação a quente da estrutura bruta de solidificação. Com relação ao processo de tratamento térmico, verificou-se que o uso de temperatura de revenimento elevada, superior a 500°C, aumenta a tenacidade do material. Ainda, a temperatura de austenitização tem forte efeito na tenacidade, sendo a melhor temperatura observada próxima de 1040°C.

**Palavras-chave:** Carbonetos; Tratamento térmico; Impacto; Flexão.

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no 4º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 2 a 5 de maio de 2006, Joinville, SC.

<sup>2</sup> Membro da ABM. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

<sup>3</sup> Membro da ABM. Heat Tech - Tecnologia em Tratamento Térmico e Engenharia de Superfície Ltda.

## 1 INTRODUÇÃO

O aço ferramenta para trabalho a frio tipo AISI D2 é amplamente utilizado em ferramentais para corte e conformação de metais por possuir uma excelente combinação entre resistência mecânica, dureza, e resistência ao desgaste. Entretanto, a tenacidade deste aço é fortemente dependente da distribuição dos carbonetos eutéticos tipo  $M_7C_3$ . Esta dependência é de particular importância à medida que a dimensão do material de partida deve ser adequada à dimensão final da ferramenta, principalmente quando a matéria prima é proveniente de material cortado em distribuidores. Recentemente, com a crescente utilização dos tratamentos superficiais, os ciclos de tratamento térmico têm sido modificados e se mostrado importante no controle da tenacidade.

Fornecido no estado recozido, com dureza máxima de 255 HB o aço AISI D2 tem composição química básica: Fe-1,55%C-12,0%Cr, com adições dos elementos de liga Mo e V da ordem de 1,0% para melhorar a resposta ao revenimento. Sua seqüência de solidificação se inicia pela formação da austenita ( $\gamma$ ), com o líquido sofrendo uma reação eutética para:  $\gamma + M_7C_3$ .<sup>(1,2)</sup> Os carbonetos eutéticos são os principais responsáveis pela elevada resistência ao desgaste deste aço. Com o trabalho mecânico a quente dos lingotes, a estrutura de carbonetos eutéticos é quebrada, sendo a intensidade desta quebra proporcional ao grau de deformação. Com isto, quanto maior o grau de deformação maior será a intensidade de quebra da rede e, portanto, menor será o tamanho final dos carbonetos e melhor será a sua distribuição. Esta redistribuição de carbonetos é responsável pela forte anisotropia de propriedades entre as direções longitudinal e transversal das barras.

O objetivo deste trabalho foi estudar a tenacidade do aço AISI D2 em diferentes condições de microestrutura, variando-se: (i) a dimensão das barras e, portanto, o tamanho e a distribuição dos carbonetos eutéticos e (ii) o tratamento térmico de têmpera e revenimento. A tenacidade foi avaliada por ensaio de impacto em corpos de prova não entalhados. A distribuição dos carbonetos está relacionada à influência da dimensão do material de partida para a confecção da ferramenta. Na prática corrente de tratamento térmico dois ciclos podem ser utilizados; um com baixa temperatura de revenimento, mais comum e outro com temperatura de revenimento elevada, superior a 500°C e aplicado para ferramentas destinadas a nitretação, revestimento e eletroerosão.

A Figura 1<sup>(3)</sup> mostra as curvas de revenimento do aço AISI D2 obtidas para diferentes temperaturas de austenitização. Verifica-se que a dureza especificada de 58-60HRC pode ser obtida com o uso de temperatura de austenitização baixa e revenimento a 200°C e por temperaturas de austenitização elevada e revenimento em torno de 540°C. Ainda, o aumento na temperatura de austenitização leva a um aumento na dureza no estado temperado e em um aumento na quantidade de austenita retida após a têmpera.

Considerando a aplicação da ferramenta e principalmente à necessidade ou não do uso de tratamentos superficiais como nitretação e revestimentos duros, TiN p. ex., o procedimento de tratamento térmico pode adotar revenimento em temperatura baixa ( $T \sim 200^\circ\text{C}$ ) para uso geral ou revenimento em temperatura elevada ( $T > 500^\circ\text{C}$ ) quando a ferramenta é destinada a tratamentos superficiais posteriores. Frente a estas condições diversas da prática de tratamento térmico, este trabalho mostra a tenacidade do aço AISI D2 em diferentes ciclos, variando-se as condições de revenimento e a temperatura de austenitização.

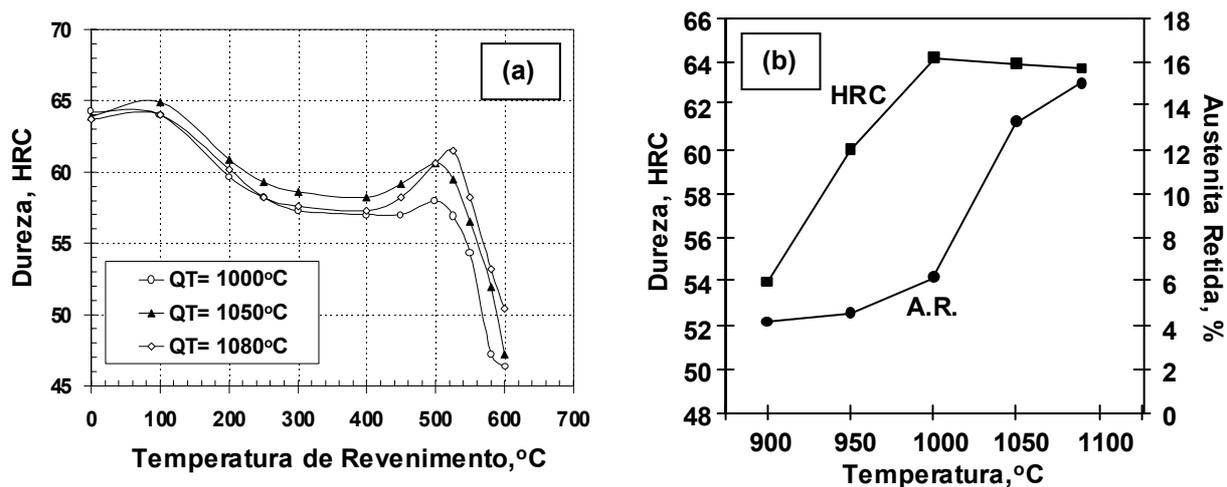


Figura 1. (a) Curvas de revenimento (b) variação da dureza e teor de austenita retida em diferentes temperaturas de austenitização no aço AISI D2. <sup>(3)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

### 2. 1 Influência da Microestrutura de Partida

Neste estudo utilizaram-se barras recozidas com diâmetros de 7,94, 25,4, 70,0 e 210,0 mm. As diferentes dimensões foram selecionadas para fornecer diferentes distribuições de carbonetos eutéticos. As barras recebidas foram inicialmente caracterizadas com relação à composição química, microestrutura e dureza. A composição química das barras foi determinada por métodos instrumentais e fornecida pelo fabricante. A dureza do material foi avaliada por medidas em escala Brinell, sendo os resultados apresentados referentes à média de cinco determinações. A medida dos tamanhos dos carbonetos  $M_7C_3$  foi realizada em Analisador de Imagens LEO 500MC, em amostras recozidas e atacadas com Nital 10%. Para cada condição foram medidos no mínimo 500 carbonetos. As medidas fornecem os valores médio e máximo dos carbonetos.

Os tratamentos térmicos de têmpera e de têmpera seguida de revenimento foram realizados em fornos de mufla com sistema de retorta de vácuo. As temperaturas de tratamento foram aferidas com termopar externo Tipo K e indicador digital de temperaturas Yokogawa. Os estudos foram conduzidos utilizando amostras temperadas a partir de 1080°C por 30 minutos, seguido de resfriamento em óleo, com agitação manual. Os revenimentos foram duplos, de duas horas cada, na temperatura de 540°C, objetivando dureza no intervalo de 58-60 HRC. A caracterização da morfologia dos carbonetos foi realizada por análise metalográfica em microscópio óptico. A resposta ao tratamento térmico foi avaliada por medidas de dureza Rockwell C.

Os ensaios de tenacidade ao impacto foram realizados em corpos de prova não entalhados de dimensões 7 x 10 x 55 mm<sup>3</sup>.<sup>(4)</sup> A opção de uso de corpos de prova não entalhados foi necessária devido a baixa tenacidade do material quando do uso de corpos de prova do tipo Charpy com entalhe em "V", o que impossibilita a diferenciação entre as diferentes condições microestruturais.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> PINEDO, C.E.; SILVA, M.A. Pesquisa não publicada.

Os resultados apresentados referem-se à média de cinco corpos de prova. As amostras para o ensaio de impacto foram retiradas sempre ao meio raio das barras. Em todas as barras foram retiradas amostras correspondentes a direção longitudinal. Amostras para teste da direção transversal foram retiradas das barras com 70,0 e 210,0 mm de diâmetro. Para todas as amostras ensaiadas a dureza foi de 58-60 HRC.

## **2. 2 Influência do Ciclo de Tratamento Térmico**

Duas séries de tratamentos térmicos foram testadas. Na Série 1, a temperatura de austenitização para a têmpera foi de 1030°C com resfriamento em óleo. Os revenimentos foram duplos, de duas horas cada nas temperaturas de 200 e 540°C. Na Série 2, a temperatura de austenitização para a têmpera foi variada entre 1020 - 1080°C com resfriamento em óleo. Os revenimentos foram duplos, de duas horas na temperatura de 540°C. Estes tratamentos foram utilizados procurando atingir uma dureza entre 58-60 HRC. Os procedimentos de tratamento térmico foram os mesmos utilizados na descrição anterior. Foram estudadas amostras provenientes de barra redonda e recozida, com diâmetro de 70,0 mm (Série 1) e 7,94 mm (Série 2). O uso de bitolas finas objetivou minimizar a influência dos carbonetos na avaliação da tenacidade.

A tenacidade foi avaliada pelo ensaio de flexão em 4 pontos, procedimento utilizado com sucesso em trabalho anterior,<sup>(3)</sup> utilizando corpos de prova cilíndricos de diâmetro 5 mm e comprimento de 60 mm. Este método, descrito anteriormente na literatura para aços rápido,<sup>(5)</sup> parece ser o mais aplicado para materiais com dureza elevada, acima de 55 HRC. A construção do dispositivo de ensaio utilizou os parâmetros fornecidos pela literatura.<sup>(6)</sup> Na barra de 70 mm, os corpos de prova foram retirados da posição do meio-raio e na direção longitudinal, usinados e retificados. Na barra de 7,94 mm os corpos de prova foram usinados diretamente. Os resultados se referem à média de cinco corpos de prova por condição de tratamento térmico. Para todas as amostras ensaiadas a dureza foi de 58-60 HRC.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3. 1 Influência da Microestrutura de Partida**

O material recebido, nas diferentes bitolas, possui microestrutura composta de matriz ferrítica com dispersão de carbonetos secundários e carbonetos eutéticos tipos  $M_7C_3$ , conforme a Figura 2. Observa-se a matriz ferrítica totalmente escurecida e os carbonetos de cor branca. Verifica-se que os carbonetos eutéticos  $M_7C_3$  tornam-se mais grosseiros à medida que a bitola aumenta e que tendem a manter sua morfologia eutética no diâmetro de 210 mm. Na dimensão de 25,0 mm os carbonetos encontram-se totalmente quebrados, com morfologia ideomorfa, e bem distribuídos na matriz.

Os valores de tamanho dos carbonetos são mostrados na Tabela I. Verifica-se que o tamanho dos carbonetos é sempre superior na direção longitudinal do que na transversal, em decorrência da anisotropia de deformação que promove o alinhamento dos carbonetos. O tamanho médio dos carbonetos varia pouco entre as bitolas de 25,4 e 70,0 mm, verificando-se um aumento para a bitola de 210,0 mm. O tamanho máximo dos carbonetos varia de forma crescente com o aumento da bitola de 25,4 até 210,0 mm.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de impacto sem entalhe para todas as condições de microestrutura de partida, após tratamento térmico para 58 – 60 HRC. Verifica-se que existe uma diminuição crescente na resistência ao impacto com o aumento da bitola de partida e que energia absorvida por corpos de prova longitudinais são sempre superiores aos transversais, levando a uma elevada anisotropia.

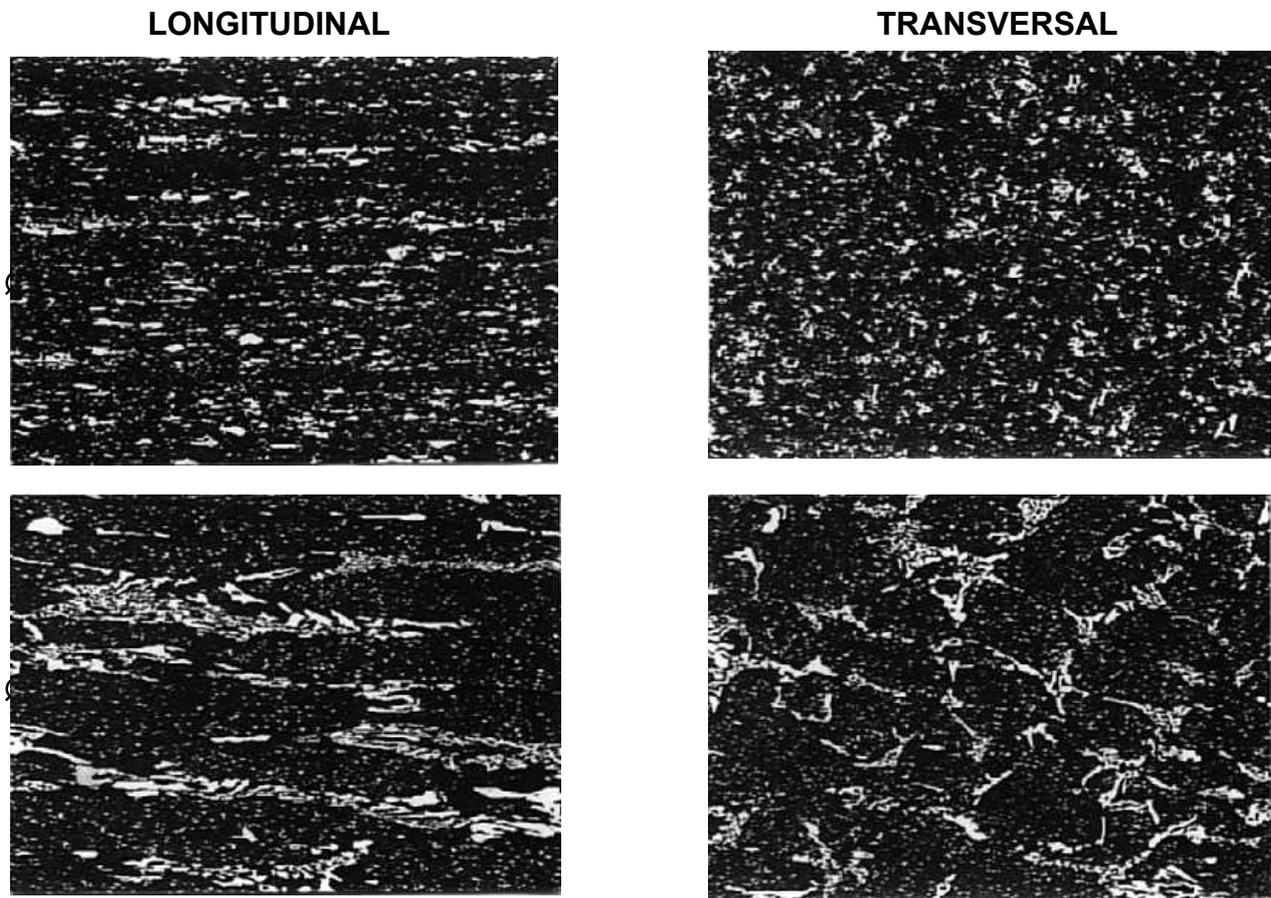
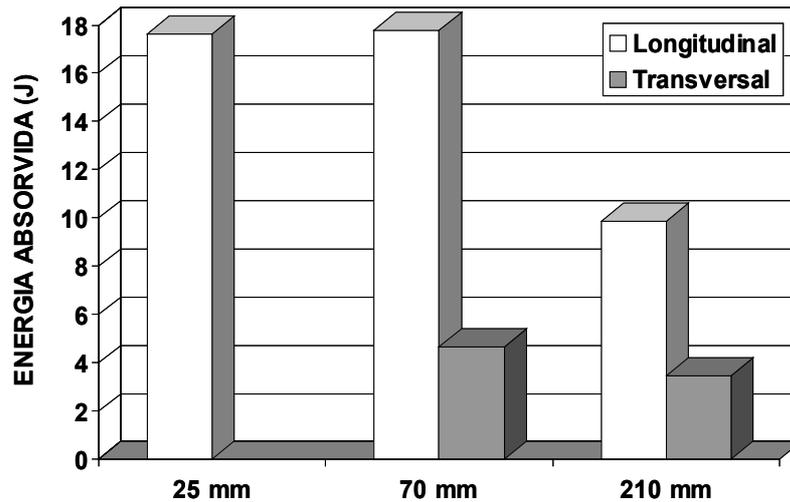


Figura 2. Microestrutura das barras no estado recozido, Nital 10%. 90x.

Tabela 1. Tamanho dos carbonetos  $M_7C_3$  determinados na estrutura recozida.

Bitola (mm)	TAMANHO MÉDIO ( $\mu\text{m}$ )		TAMANHO MÁXIMO ( $\mu\text{m}$ )	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
$\varnothing$ 25,4 C	13,13	11,47	49,74	38,53
$\varnothing$ 70,0 C	13,63	11,83	71,00	43,81
$\varnothing$ 210,0 C	20,97	13,53	100,13	58,86



**Figura 3.** Tenacidade ao impacto em amostras sem entalhe após têmpera e revenimento para 58 – 60 HRC.

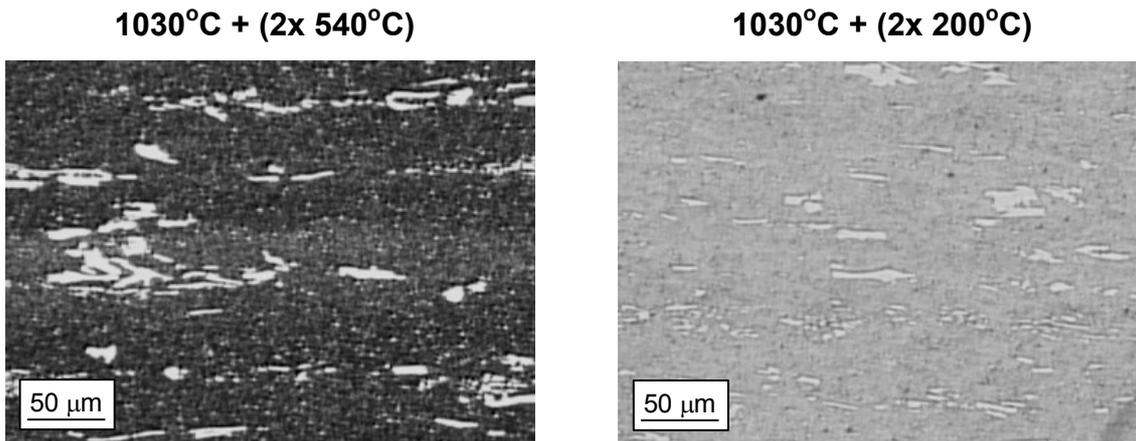
A diferença na resistência ao impacto encontrada nas diferentes bitolas está relacionada à diferença entre o tamanho, a morfologia e a distribuição dos carbonetos eutéticos. A tenacidade superior entre amostras longitudinais e transversais é decorrente do processo de deformação a quente que promove um alinhamento de carbonetos ao longo da direção longitudinal das barras.<sup>(7,8)</sup> Na Tabela 1 observa-se que o tamanho dos carbonetos é maior na direção longitudinal do que na transversal, o que indica esta anisotropia. É importante salientar que a direção de propagação das trincas das amostras transversais corresponde à microestrutura longitudinal das barras, ou seja, aquela que possui carbonetos de maiores dimensões, o que conduz a menor tenacidade.

### 3. 2 Influência do Ciclo de Tratamento Térmico

#### 3.2.1 Tratamentos da Série 1

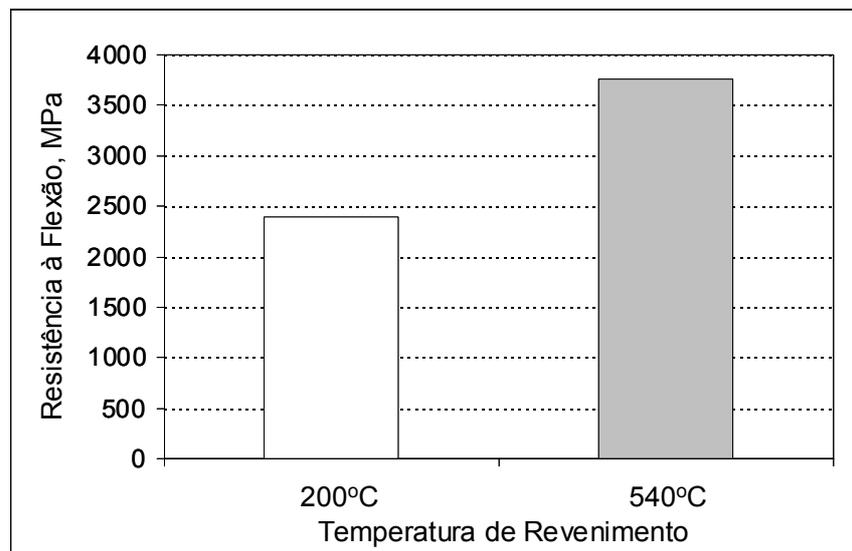
Após o tratamento térmico de têmpera e revenimento verifica-se que a microestrutura é composta basicamente de martensita revenida com as estrias de carbonetos eutéticos não dissolvidos na austenitização. Existe uma clara diferença de tonalidade entre a amostra revenida à 540°C e as amostras revenidas a 200°C, Figura 4. Considerando que as amostras foram preparadas e atacadas simultaneamente, no mesmo baquelite, esta diferença de resposta ao ataque com Nital 10% deve ser consequência de uma diferença microestrutural. Quando o teor de austenita retida e martensita virgem é elevado, os aços ferramenta são mais resistentes ao ataque com Nital.

Como esperado, no revenimento a 540°C a austenita retida na têmpera é revertida entre o primeiro e o segundo revenimento e a martensita virgem é revenida eficientemente na temperatura elevada, seja no primeiro ou no segundo revenimento. O fato das microestruturas revenidas a 200°C não serem suscetíveis ao ataque com Nital 10% mostra que esta temperatura é insuficiente para promover a reversão da austenita retida e o alívio de tensões na martensita virgem gerada na têmpera. Em todas as amostras a dureza final após o tratamento térmico situou-se entre o intervalo desejado de 58 – 60 HRC.



**Figura 4.** Microestrutura do aço AISI D2 após tratamento térmico. Nital 10%.

Os resultados de tenacidade obtidos nos ensaios de flexão são mostrados na Figura 5. Verifica-se que a tenacidade do aço é superior quando o revenimento é realizado na temperatura de 540°C. Na temperatura de revenimento de 200°C a tenacidade é substancialmente menor.



**Figura 5.** Variação da resistência à flexão com o tratamento térmico. Amostras temperadas de 1030°C e revenidas (2x2h) nas temperaturas indicadas.

A tenacidade do aço AISI D2 é fortemente controlada pela sua microestrutura após tratamento térmico, considerando, neste caso, que o peso da presença dos carbonetos é o mesmo em todas as amostras, retiradas de barra com 70,0 mm de diâmetro. A variável microestrutural que se mostra mais importante no revenimento é a etapa de alívio de tensões da estrutura martensítica que ocorre de forma diferente de acordo com a temperatura de tratamento.<sup>(9)</sup> Quando o revenimento é realizado a 540°C o efeito da temperatura de tratamento na elevação da tenacidade é decorrente do intenso alívio de tensões na martensita. Nesta temperatura, a dureza é atingida pelo fenômeno de endurecimento secundário<sup>(10)</sup> e não é mais causada exclusivamente pela dureza da matriz martensítica. Quando o revenimento é realizado a 200°C, a dureza do material ainda é resultado da dureza da matriz imediatamente após a têmpera. Neste caso a baixa temperatura não é

suficiente para eliminar as tensões geradas na transformação martensítica e conduz a tenacidade inferior.

### 3.2.2 Tratamentos da Série 2

Após o tratamento térmico de têmpera e revenimento, verifica-se que a microestrutura é composta basicamente de martensita revenida, carbonetos eutéticos não dissolvidos na austenitização e austenita retida, Figura 6. A fração de austenita retida aumenta nitidamente com o aumento da temperatura de austenitização, sendo visível para as temperaturas de 1060 e 1080°C com relação às demais. É importante salientar que as amostras foram preparadas e atacadas simultaneamente, no mesmo baquelite, e esta diferença de resposta ao ataque com Nital 10% deve ser consequência exclusivamente da diferença microestrutural.

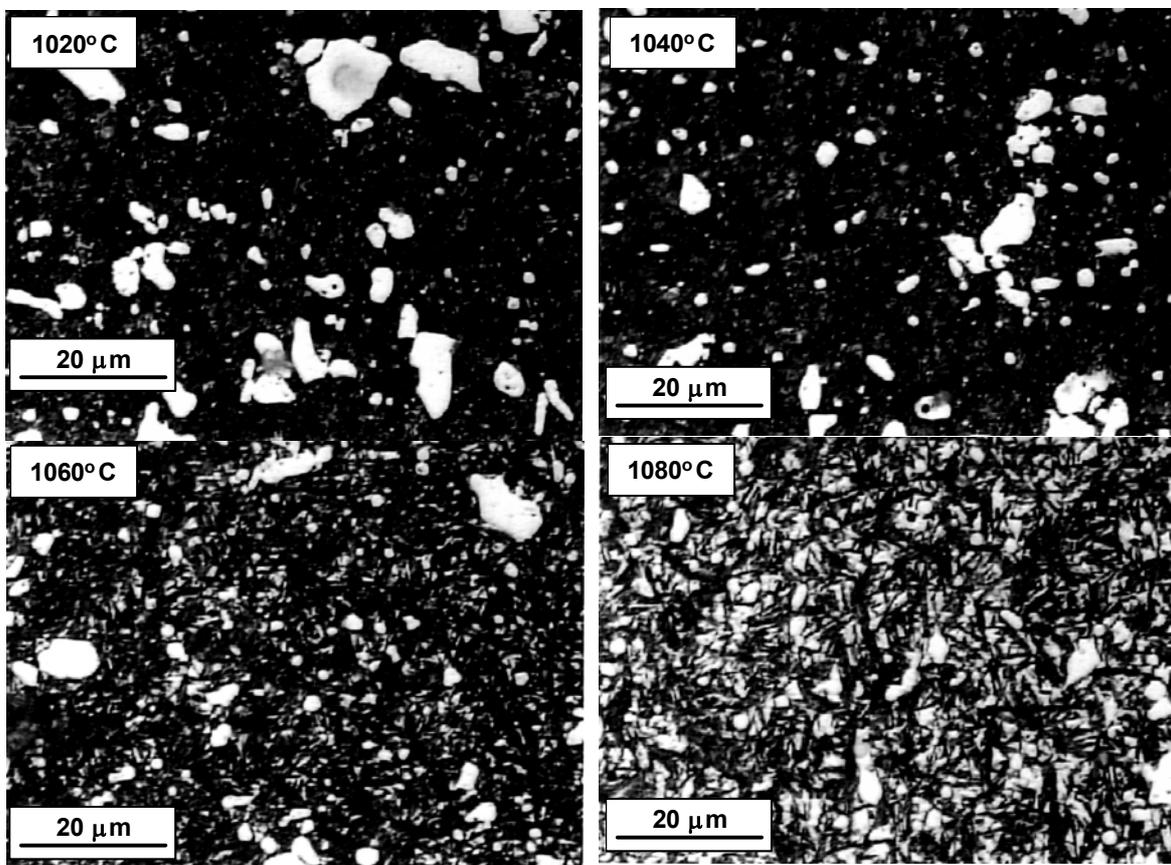
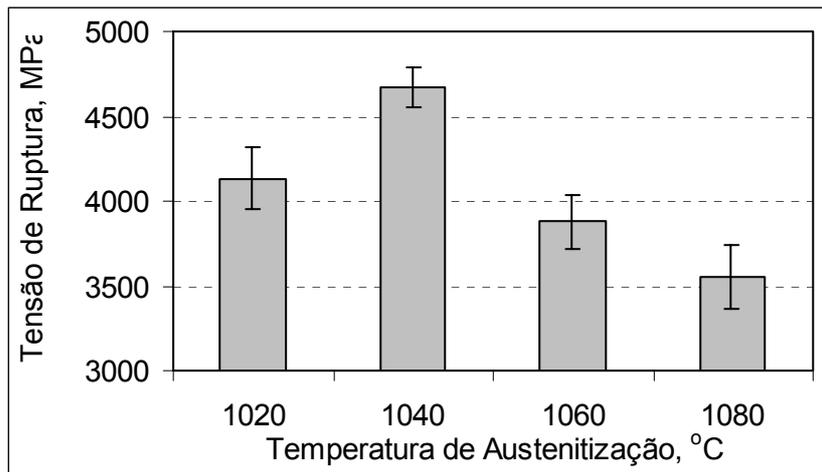


Figura 6. Microestruturas após tratamento térmico. Nital 10%.

Os resultados de tenacidade obtidos nos ensaios de flexão 4 pontos são apresentados na Figura 7. Verifica-se que a tenacidade do aço AISI D2 é muito sensível à variação na temperatura de austenitização. A tenacidade é máxima para a temperatura de austenitização de 1040°C e diminui à medida que a temperatura aumenta. A dureza média dos corpos de prova ensaiados foi de  $669,1 \pm 11,8$  HV1 (58,8 HRC convertida) o que é relevante para não considerar esta variável como fundamental na variação da tenacidade.



**Figura 7.** Variação da tensão máxima de ruptura sob flexão 4 pontos. Amostras com 7,94 mm de diâmetro revenidas para 58 – 60 HRC.

A presença de austenita retida e o efeito do endurecimento secundário são os fatores microestruturais que colaboram para explicar os resultados de tenacidade obtidos.<sup>(11,12)</sup> A literatura cita a austenita retida como sendo uma fase benéfica para a tenacidade, pela possibilidade de atenuar a propagação da trinca, mas não relaciona uma fração ótima desta fase.<sup>(9,11)</sup> Por outro lado, nos aços de alta liga, a tenacidade é mínima na região do pico de endurecimento secundário, por consequência da máxima precipitação e endurecimento, aumentando para temperaturas superiores de revenimento.<sup>(6,7)</sup> Portanto, o comportamento quanto à tenacidade deve ser composto pelo balanço entre o peso destas duas variáveis simultaneamente.

Utilizando as curvas de revenimento da Figura 1, verificamos ainda o efeito deletério do endurecimento secundário é maior quanto maior a temperatura de austenitização e máximo para 1080°C, não apenas pela máxima dureza de pico, mas pelo deslocamento da temperatura de pico para 525°C, mais próxima da utilizada neste trabalho, de 540°C. Nestas condições, 1060 e 1080°C, o aumento da fração de austenita retida não é suficiente para melhorar a tenacidade. Portanto, a temperatura de 1040°C parece refletir a melhor combinação entre os efeitos considerados, ou, possivelmente, a fração de austenita retida é suficiente para compensar, de forma benéfica, os deletérios efeitos do endurecimento secundário, o que não ocorre para a austenitização a 1020°C. Estas temperaturas de austenitização se encontram no intervalo de maior incremento na fração de austenita retida conforme mostrado pela Figura 1.

#### 4 CONCLUSÕES

A distribuição de carbonetos eutéticos no aço AISI D2 varia de acordo com a dimensão da barra. Os tamanhos médios e máximos dos carbonetos aumentam com o aumento do diâmetro das barras. A morfologia varia de ideomorfa, para as bitolas de 25,4 e 70,0 para celular na bitola de 210,0 mm.

A resistência ao impacto diminui com o aumento do diâmetro das barras sendo sempre superior na direção longitudinal do que na direção transversal. Este resultado é decorrente do tamanho e da distribuição dos carbonetos eutéticos  $M_7C_3$  que leva a uma intensa anisotropia microestrutural.

Quando a temperatura de austenitização é fixa em 1030°C, para barras com 70,0 mm de diâmetro, o revenimento a temperatura de 540°C conduz a uma maior tenacidade quando comparado com o revenimento a 200°C. O aumento na resistência à flexão 4 pontos é decorrente de um maior alívio de tensões do reticulado cristalino da martensita.

A tenacidade do aço AISI D2 varia de acordo com a temperatura de austenitização. A maior tenacidade é obtida para a temperatura de austenitização de 1040°C. A fração de austenita retida e o efeito do endurecimento secundário são os fatores microestruturais que controlam a tenacidade. Nesta etapa de estudo, não sendo possível isolar estes efeitos.

## REFERÊNCIAS

- 1 VILLARES METALS. **Aços ferramenta para trabalho a frio**. [S.l, s.d.]. (Catálogo técnico)
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metallography, structures and phase diagrams**. 8.ed. Metals Park, 1978. p. 402-404. (Metals Handbook, 8)
- 3 MENDANHA, A.; PINEDO, C. E. Estudo da tenacidade do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2 em diferentes condições de microestrutura e tratamento térmico. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO, 2., 1988, Porto Alegre. Local de publicação : Editora, 1998. p. 122-135.
- 4 NORSTRÖM, L.A. Ductility and toughness in hot work die steels: the influence of test procedures. **Die Casting Engineer**, v. 33, n. 2, p. 42-47, 1973.
- 5 GROBE, A. H.; ROBERTS, G. A. The Bend test for hardened high speed steel", **Transactions ASM**, v. 40, p. 435-490, 1948.
- 6 WESTIN, L. Mechanical properties of PM high speed steels related to heat treatment and hardness. **Metal Powder Report**, p. 768-773, Nov. 1989.
- 7 REISS, W. **Untersuchung des Werkzeugbruches beim Voll-Vorwärts-Fliesspressen**. 1987. 159p. Thesis (Dr.-Ing.). Berlin: Springer- 1987.
- 8 DIETER, G.E. **Mechanical metallurgy**. New York: McGraw Hill, 1976. p. 247-291
- 9 THELNING, K-E. **Steel and its heat treatment**. London : Butterworths, 1984.
- 10 HONEYCOMBE, R. W. K. **Structure and strength of alloy steels**. Phoenix : Climax Molybdenum, 1973.
- 11 OKORAFOR, O. E. Fracture toughness of M2 and D2 alloy tool steels. **Materials Science and Technology**, v. 3, p. 111-124, 1987.
- 12 KARAGÖZ, S.; FISCHMEISTER, H. Microstructure and toughness in high speed steels: the influence of hot reduction and austenitization temperature. **Steel Research**, v. 58, p. 353-360, 1987.

*Adriano Mendanha<sup>2</sup>  
Hélio Goldenstein<sup>2</sup>  
Carlos Eduardo. Pinedo<sup>2,3</sup>*

## **Abstract**

A study has been made on the effect starting microstructure and heat treatment processes on the toughness of AISI D2 cold work tool steel. Bars with different diameters were selected in order to obtain different carbide structures. Toughness was evaluated by impact tests using unnotched samples and 4 point bending test. It was verified that the impact energy in the longitudinal and transverse directions decreases with the increase of the bar diameter, as a result of the increase in the eutectic carbide size and the change in their morphology and distribution. The results are important to show that the bar size must be an important criteria for the row material selection in order to obtain the optimum performance of the tool. Regarding heat treatment processes results show that tempering at high temperature is responsible for high toughness. On the other hand, austenitizing temperature affects toughness. The best austenitizing temperature was found to be 1040°C.

**Key words:** Carbides, Heat treatment, Impact test, Bending test.

<sup>1</sup> *4º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes – ABM, 21-24 de março de 2006, Joinville/CS.*

<sup>2</sup> *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.*

<sup>3</sup> *Heat Tech - Tecnologia em Tratamento Térmico e Engenharia de Superfície Ltda.*