

# TENACIDADE DO AÇO FERRAMENTA PARA TRABALHO A FRIO AISI D2 – PARTE II INFLUÊNCIA DO CICLO DE TRATAMENTO TÉRMICO

Adriano Mendanha <sup>1</sup>  
Carlos Eduardo Pinedo <sup>2</sup>  
Hélio Goldenstein <sup>3</sup>

A despeito de sua elevada resistência ao carregamento e ao desgaste, a tenacidade do aço ferramenta AISI D2 desempenha um papel importante, principalmente em operações de corte. Além da importância da distribuição de carbonetos  $M_7C_3$ , este trabalho mostra as variações da tenacidade em diferentes condições de tratamento térmico de têmpera e revenimento utilizadas na prática industriais, objetivando dureza final próxima de 59 HRC.

Os experimentos foram conduzidos em duas séries. Na primeira, as amostras foram austenitizadas a 1030°C por 30 minutos, temperadas em óleo e revenidas parte a 200°C e parte a 540°C, em revenimentos duplos de duas horas. Um ciclo opcional com sub-zero entre o primeiro e o segundo revenimento a 200°C também foi utilizado. Na segunda, as amostras foram austenitizadas entre 1020 – 1080°C e revenidas a 540°C. A tenacidade foi avaliada por ensaios de flexão em quatro pontos em corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5,0 mm e comprimento de 60,0 mm.

Os resultados mostram que os ciclos de tratamentos térmicos programados são eficientes para atingir uma dureza na faixa de 58 – 60 HRC. Os resultados apontam para uma diferença de tenacidade entre os diferentes procedimentos de tratamento. Esta diferença é função basicamente da quantidade de austenita retida gerada na têmpera e ao endurecimento secundário presente nos revenimentos em alta temperatura.

Palavras-chave: tratamento térmico, aço ferramenta, tenacidade.

---

Trabalho apresentado no “1º Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes”, 29 – 30 de outubro de 2003. São Paulo/SP.

(1) Engenheiro Mecânico. Mestrando na Escola Politécnica da USP.

(2) Professor da Universidade de Mogi das Cruzes e Pesquisador do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas/UMC. Diretor Técnico da *HEAT TECH* - Tratamentos Térmicos e Engenharia de Superfície Ltda.

(3) Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

## 1. Introdução

O setor metal-mecânico é um grande consumidor de aços ferramenta utilizados em operações de corte e conformação de metais, polímeros e cerâmicas. Estes aços possuem uma combinação única entre resistência mecânica e resistência ao desgaste. No entanto, mesmo em aços ferramenta para trabalho a frio também se procura aliar propriedades como dureza e desgaste à resistência à fratura. Dentre os principais aços desta família destaca-se a série AISI D, na qual o aço Tipo D2 é o mais utilizado quando se deseja combinar suas propriedades de resistência com a tenacidade.

Trabalhos anteriores [1-2] têm mostrado que a tenacidade do aço AISI D2 é sensível não apenas a dimensão inicial da barra e, portanto à morfologia, tamanho e distribuição dos carbonetos ledeburíticos, mas também ao ciclo de tratamento térmico utilizado. Ou seja, a dureza não pode ser utilizada como único parâmetro para a seleção de tratamentos térmicos quando a tenacidade é um requisito importante de desempenho. Nesta linha, este trabalho pretende avaliar a influência dos principais parâmetros de tratamento térmico, como a temperatura de austenitização, a temperatura de revenimento e o uso de tratamento sub-zero sobre a tenacidade do aço AISI D2, sempre para um nível de dureza entre 58 – 60 HRC.

Considerando a aplicação da ferramenta e, principalmente a 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. O uso do tratamento sub-zero é requisitado muitas vezes como meio fornecer estabilidade dimensional. Frente a estas condições diversas da prática de tratamento térmico, este trabalho objetiva estudar a tenacidade do aço AISI D2 em diferentes ciclos, variando-se as condições de revenimento, o uso de sub-zero e variando-se a temperatura de austenitização.

## 2. Materiais e Métodos

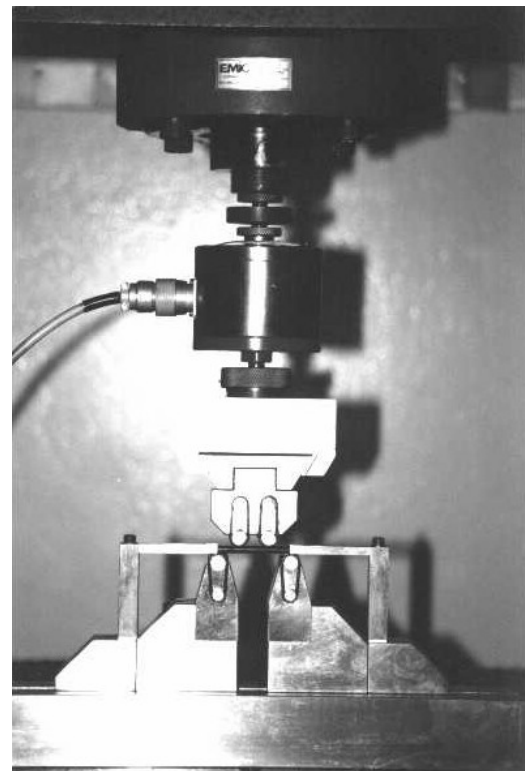
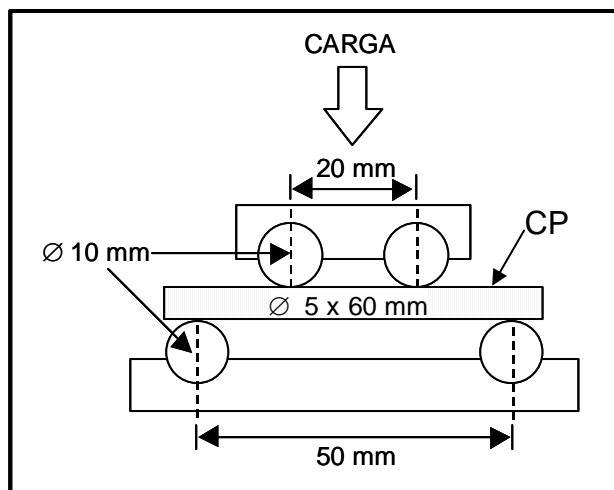
O material utilizado neste estudo corresponde ao aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2, na forma de barra redonda e recozida, com diâmetro de 70,0 e 7,94 mm. Os tratamentos térmicos foram realizados em fornos de mufla com sistema de retorta de vácuo para eliminar os efeitos de oxidação e decarbonetação superficial, garantindo assim, a integridade das amostras. As temperaturas de tratamento foram sempre aferidas por termopar externo (Tipo K) ligado a um indicador digital de temperaturas Yokogawa, com junta fria eletrônica.

Duas séries de tratamentos térmicos foram testadas. Na Série 1, a temperatura de austenitização para a têmpera foi de  $1030^{\circ}\text{C}$  com resfriamento em óleo. Os revenimentos foram duplos, de duas horas cada nas temperaturas de  $200^{\circ}\text{C}$  e  $540^{\circ}\text{C}$ . Em um dos casos foi utilizado o resfriamento sub-zero em nitrogênio líquido entre o primeiro e o segundo revenimento a  $200^{\circ}\text{C}$ . Na Série 2, a temperatura de austenitização para a têmpera foi variada entre  $1020 - 1080^{\circ}\text{C}$  com resfriamento em óleo. Os revenimentos foram duplos, de duas horas na temperatura de  $540^{\circ}\text{C}$ . Estes tratamentos foram utilizados procurando atingir uma dureza entre 58-60 HRC.

Para caracterização microestrutural a preparação metalográfica seguiu os procedimentos normais de corte, lixamento e polimento. As amostras recozidas foram atacadas com reagente de Nital 10%. Os corpos de prova tratados foram embutidos em uma mesma amostra e atacados, também com Nital 10%. As observações foram realizadas em banco metalográfico Olympus com sistema de vídeo impressão para a obtenção das fotomicrografias. A dureza após tratamento térmico foi medida em Rockwell C, média de cinco determinações.

A tenacidade foi avaliada pelo ensaio de flexão em 4 pontos, procedimento utilizado com sucesso em trabalho anterior [1], utilizando corpos de prova cilíndricos de diâmetro 5 mm e comprimento de 60 mm. Este método, descrito anteriormente na literatura para aços rápido [3], 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 atual [4]. 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 ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universais EMIC com célula de carga de 2.000 kg, conforme mostrado na Figura 1. A carga e a deflexão dos corpos de prova foram obtidas por um registrador X-Y integrado à máquina. A carga máxima do ensaio também é fornecida, digitalmente, pela máquina. A partir da carga máxima foi calculada a resistência no ensaio de flexão. Os resultados se referem à média de cinco corpos de prova por condição de tratamento térmico.

### Dispositivo de Ensaio



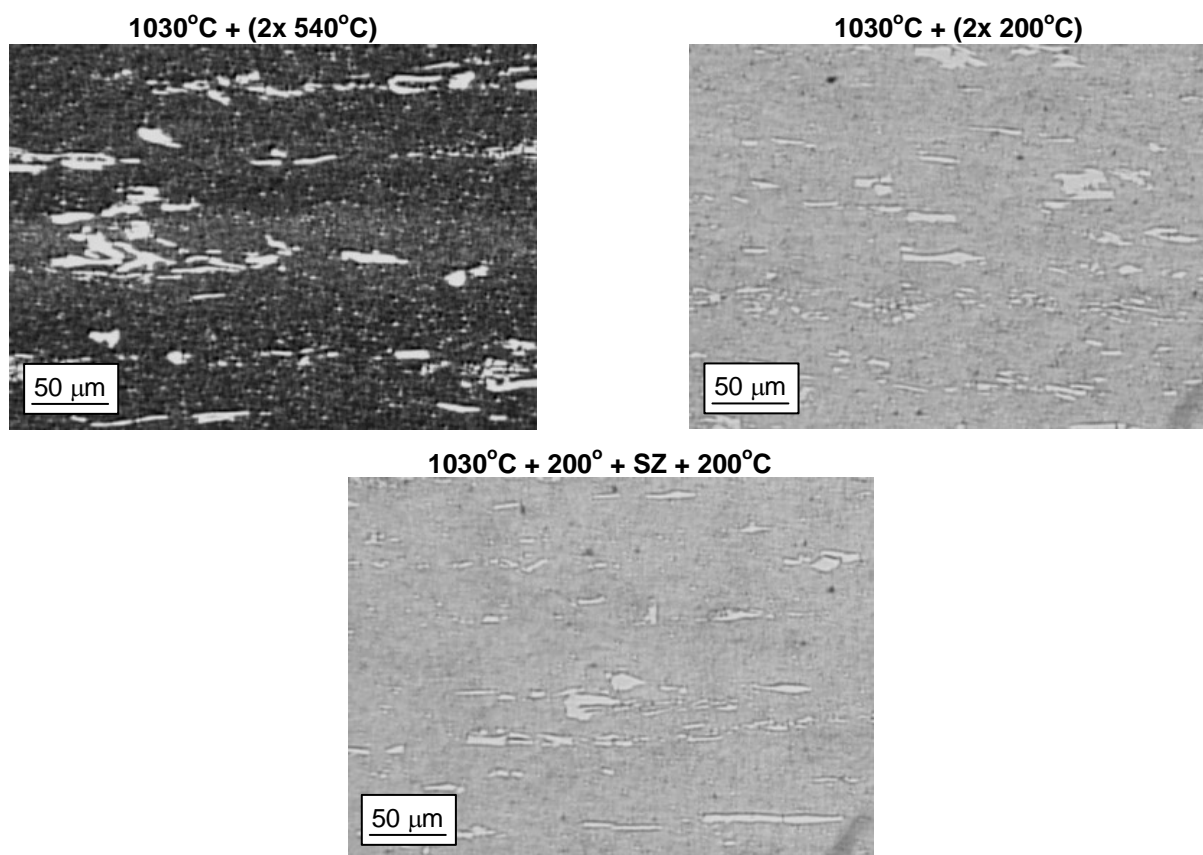
**Figura 1** – Esquema e fotografia do dispositivo construído para a avaliação de tenacidade em ensaio de flexão 4 pontos.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Tratamentos da Série 1

Após o tratamento térmico de têmpera e revenimento, com e sem sub-zero, 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, independente do uso de tratamento sub-zero, Figura 2. 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 e após o tratamento sub-zero. Em todas as amostras a dureza final após o tratamento térmico situou-se entre o intervalo desejado de 58 – 60 HRC.



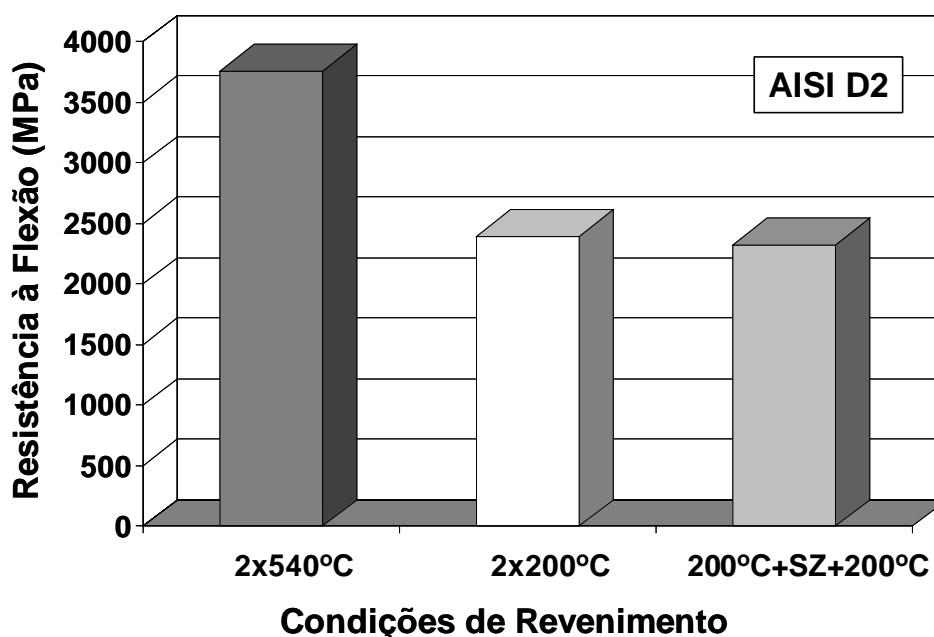
**Figura 2** – Microestrutura do aço AISI D2 após tratamento térmico. Nital 10%.

Os resultados de tenacidade obtidos nos ensaios de flexão são apresentados na Tabela I e mostrados na Figura 3. 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 e não foi verificada uma diferença de tenacidade com a inclusão do tratamento sub-zero intermediário aos revenimentos.

**Tabela I** – Resistência à flexão nas diferentes condições de tratamento térmico.

	Resistência à Flexão (MPa)		
	T1	T2	T3
Média	3.760,20	2.396,94	2.322,04
Desvio Padrão	179,27	220,99	289,56

T1: TP = 1030°C + RV: (2x2h)540°C,  
T2: TP = 1030°C + RV: (2x2h)200°C e  
T3: TP = 1030°C + RV: 2h/200°C + SZ + 2h/200°C.



**Figura 3** – Variação da resistência à flexão quatro pontos com o tratamento térmico.

Os resultados mostram que 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 eutéticos é o mesmo em todas as amostras. Verifica-se que a variável microestrutural 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 [5]. Quando o revenimento é realizado a 540°C o efeito da temperatura de tratamento na elevação da tenacidade é nítido. Deve-se ter em mente que a elevada dureza atingida neste tratamento é decorrente do fenômeno de endurecimento secundário presente no sistema Fe-C-Cr, como o AISI D2: Fe-1,5%C-11,5%Cr [6] e não é mais causada exclusivamente

pela dureza da matriz. Esta, por sua vez continua sofrendo os efeitos de alívio de tensões na temperatura de revenimento o que eleva a tenacidade.

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 matensítica e, também, a inclusão de um tratamento sub-zero não tem efeito sobre a tenacidade. Portanto, o tratamento sub-zero deve ser encarado como um processo que causa exclusivamente um aumento na estabilidade dimensional do aço [7], mas sem alterar a sua tenacidade.

### 3.2 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 4. 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.

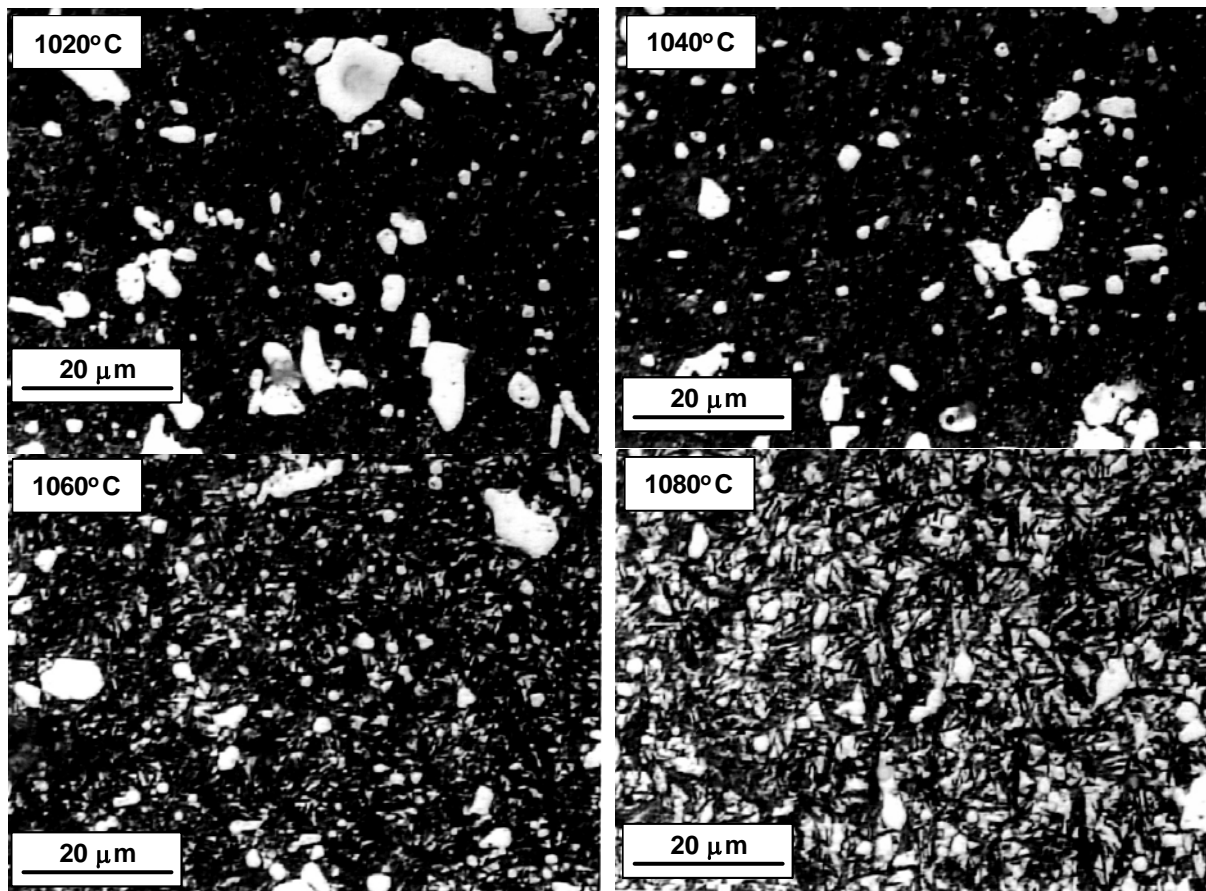
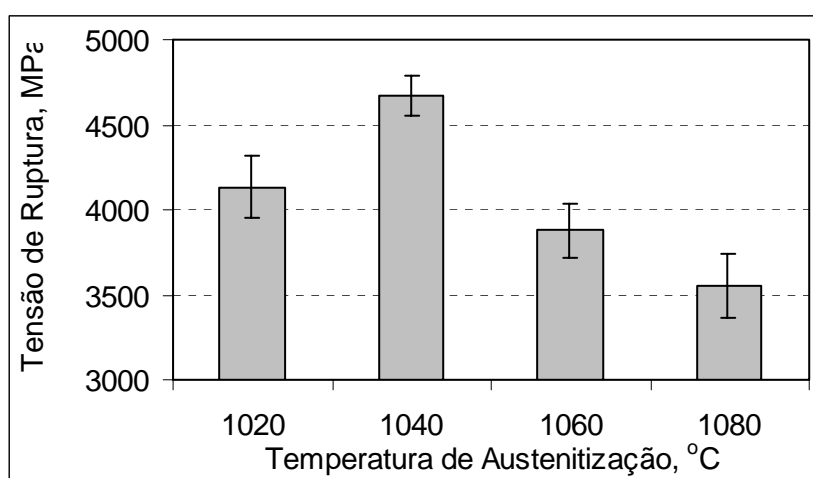


Figura 4 – Microestruturas após tratamento térmico. Nital 10%.

Os resultados de tenacidade obtidos nos ensaios de flexão 4 pontos são apresentados na Tabela II e mostrados na Figura 5. 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. Considerando o desvio padrão obtido, verifica-se que desvio percentual das medidas situa-se na ordem de 5% com relação à média o que é um excelente resultado para este tipo ensaio. A interpenetração observada nos intervalos de confiança não deve ser considerada decisiva para alterar o comportamento das médias. 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.

**Tabela I** – Resistência à flexão nas diferentes condições de tratamento térmico

	Temperatura de Austenitização, °C			
	1020	1040	1060	1080
<b>Tensão de Ruptura, MPa</b>	4134,7	4674,0	3877,1	3552,6
<b>Desvio Padrão</b>	177,76	119,85	163,12	185,40



**Figura 5** – Variação da tensão máxima de ruptura sob flexão 4 pontos.

Para uma melhor discussão dos resultados obtidos neste trabalho, é necessário resgatar as curvas de têmpera e de revenimento do aço AISI D2, publicadas pelos autores em trabalho anterior [1] e mostradas na Figura 5. Nesta figura a austenita retida foi determinada por DRX. A presença de austenita retida e o efeito do endurecimento secundário são os fatores microestruturais que colaboram para explicar os resultados de tenacidade obtidos [8,9]. 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 [5,8]. 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>(7,8)</sup>. Portanto, o comportamento quanto à tenacidade deve ser composto pelo balanço entre o peso destas duas variáveis simultaneamente.

Utilizando as curvas da Figura 5, verificamos que 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 5. É importante considerar que a literatura não fornece uma fração de austenita retida limite, a partir da qual o efeito benéfico é perdido, por isto deve ser considerado que uma fração excessiva de austenita retida diminui a tenacidade e acentua o efeito do endurecimento secundário, como verificado neste trabalho. Uma fração mínima não seria suficiente para compensar a fragilização do endurecimento secundário.

No estágio atual deste trabalho devemos salientar que são necessárias mais investigações para tentar isolar os efeitos que controlam a tenacidade do aço AISI D2. Mas estes resultados são suficientes para considerar que a temperatura de austenitização e de revenimento são parâmetros de extrema importância no tratamento térmico do aço AISI D2, principalmente para o caso de ferramentas que serão submetidas posteriormente a tratamentos superficiais, e que, por isso, devem ser revenidas em temperatura elevada.

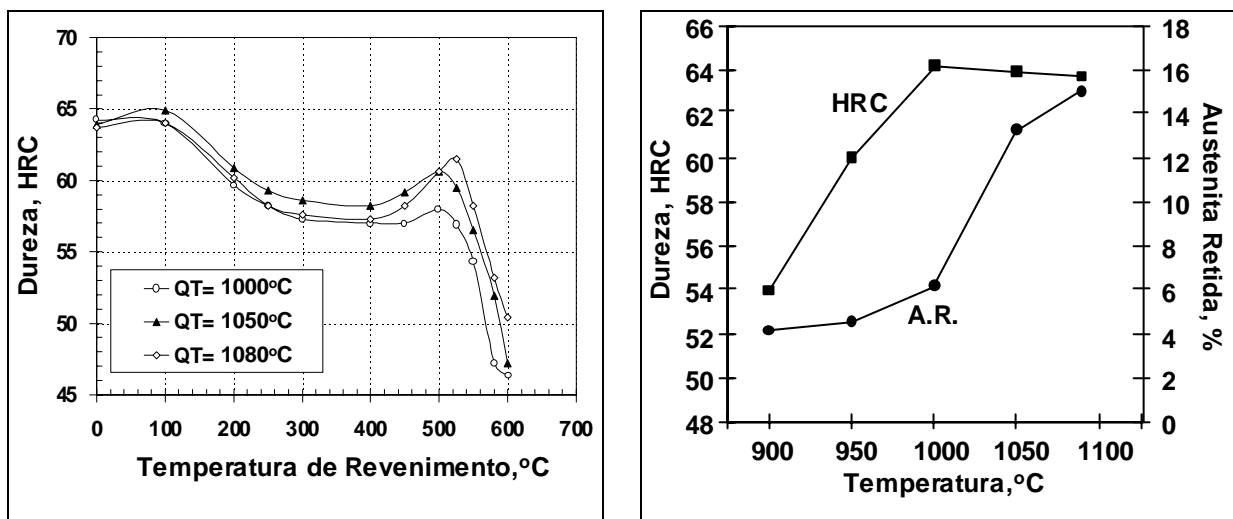


Figura 5 – Curva de têmpera e de revenimento para o aço AISI D2 [1].



#### 4. Conclusões

Utilizando a mesma temperatura de austenitização, 1030°C, a dureza final do material encontra-se entre 58 - 60 HRC. Este fato é decorrente por um lado do fenômeno de endurecimento secundário presente no revenimento a 540°C e por outro lado pela elevado estado de tensão da martensita revenida na temperatura de 200°C.

O efeito do revenimento na estrutura da martensita revenida é observado metalograficamente pela susceptibilidade ao ataque com reagente de Nital 4% demonstrado pelas amostras nas diferentes condições de revenimento. Quanto maior o alívio de tensões maior é o efeito do reagente.

A tenacidade do material revenido a 540°C é superior á encontrada após o revenimento a 200°C, com ou sem a inclusão do tratamento sub-zero. Este comportamento é resultado do grau de alívio de tensão da martensita revenida, maior quanto maior a temperatura de revenimento.

A tenacidade do aço AISI D2 varia de acordo com a temperatura de austenitização. A melhor 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. Não foi possível isolar estes efeitos.

#### 5. Referências Bibliográficas

- [1] 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”, **2º Conferência Internacional de Forjamento**, 19-22 de outubro, Porto Alegre - RS, pp. 122 – 135, 1998.
- [2] A. MENDANHA, C. E. PINEDO, H. GOLDENSTEIN, Anais do 57º Congressos da ABM Internacional, São Paulo, SP, Julho 2002, CD-ROM, 1205 – 1211.
- [3] GROBE, A. H. & ROBERTS, G. A. – “The Bend Test for Hardened High Speed Steel”, **Transactions ASM**, V. 40, pp. 435-490, 1948.
- [4] WESTIN, L. – “Mechanical Properties of PM High Speed Steels Related to Heat Treatment and Hardness”, **Metal Powder Report**, November, pp. 768 - 773, 1989.
- [5] THELNING, K-E. – **Steel and Its Heat Treatment**, Ed. Butterworths & Co., 1984.
- [6] HONEYCOMBE, R. W. K. – **Structure and Strength of Alloy Steels**, Climax Molybdenum Co Ltd, 36p. 1973.
- [7] BERNS, H. B. – Distortion and Crack Formation By Heat Treatment of Tools”, **Radex-Rundschau**, Heft 1, pp. 40-57, 1989.
- [8] OKORAFOR, O. E. – “Fracture Toughness of M2 and D2 Alloy Tool Stees”, **Materials Science and Technology**, V. 3, pp: 111 – 124, 1987.
- [9] KARAGÖZ, S. & FISCHIMEISTER, H. – “Microstructure and Toughness in High Speed Steels: The Influence of Hot Reduction and Austenitization Temperature”, **Steel Reseach**, V. 58, pp: 353 – 360, 1987.

#### Agradecimento

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo apoio financeiro a um dos autores através do Processo N° 00/14003-1.

## **INFLUENCE OF THE HEAT TREATMENT CYCLE ON TOUGHNESS OF THE COLD WORK TOOL STEEL TYPE AISI D2**

**Carlos Eduardo Pinedo<sup>1</sup>  
Hélio Goldenstein<sup>2</sup>  
Adriano Mendanha<sup>3</sup>**

**Cold work tool steels are widely used on industry for cutting and forming tools. Toughness is an important property for such steels despite their high hardness and wear resistance. This paper studies the toughness of the CWTS AISI D2 submitted to different heat treatment cycles. Two heat treatment cycles were used. On the first one the samples were austenitized at 1030°C and double tempered, two hours each, at 540°C and at 200°C. Sub-zero treatment was used between the tempering at 200°C. On the second cycle the samples were austenitized in the range of 1020 – 1080°C, quenched in oil, and double tempered at 540°C. The 4-point bending test using a sample with dimensions 5,0 mm in diameter and 60.0 mm in length was used to evaluate toughness.**

**The results show that the heat treatments cycles used herein were effective to attain hardness in the range of 50 – 60 HRC. The results show that the higher toughness values are obtained for the high tempering temperature. This suggests that the stress relieving of the martensitic structure is an important microstructural effect for increase toughness. The combination of sub-zero process with low temperature tempering is not effective to change the toughness. When using high austenitizing temperatures, the retained austenite content and the effect of secondary hardening must be the reason for the lower toughness.**

**Keywords: Heat treatment, cold work tool steel, toughness**