

# TENACIDADE DO AÇO FERRAMENTA PARA TRABALHO A FRIO AISI D2 – PARTE I INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DE PARTIDA

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

Os aços ferramenta para trabalho a frio são utilizados amplamente na indústria metal mecânica para a fabricação de ferramentas de conformação e corte a frio. Este artigo procura mostrar a importante relação existente entre a resistência à fratura do aço AISI D2, com o tamanho, forma e distribuição de carbonetos ledeburíticos  $M_7C_3$ , em barras de diâmetro entre 25 e 210 mm.

Os resultados a energia absorvida ao impacto diminui com o aumento do diâmetro inicial das barras estudadas. Este comportamento está relacionado ao tamanho dos carbonetos e à formação de uma estrutura de morfologia celular na barra com 210 mm. A isotropia é baixa para todas as barras. A tenacidade na direção longitudinal é maior do que na direção transversal. Este comportamento é decorrente do forte bandeamento de carbonetos que ocorre durante as operações de deformação a quente, como forjamento e laminação, realizadas durante a fabricação das barras.

Por estas razões, é importante considerar que o tamanho da barra selecionado para a fabricação de uma determinada ferramenta deve ser o mais próximo possível de suas dimensões finais. O uso de materiais provenientes de Centros de Distribuição, obtidos por corte de blocos forjados de grandes dimensões pode trazer uma vida inesperadamente baixa para a ferramenta devido a estrutura de carbonetos inadequada.

Palavras-chave: Microestrutura, tenacidade, aço AISI D2.

---

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 do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP.

(3) 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.

## 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 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 a medida que a dimensão do material de partida deve ser adequado à dimensão final da ferramenta, principalmente quando a matéria prima é proveniente de material cortado em distribuidores.

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:  $\gamma + M_7C_3$  [1,2]. 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 à nitretação, revestimento e eletroerosão.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste estudo utilizaram-se barras recozidas com diâmetros de 25,4 – 70,0 – 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. O objetivo deste ciclo de tratamento é obter dureza no intervalo de 58-60 HRC, normalmente empregada nos ferramentais. A caracterização da morfologia dos carbonetos foi realizada por análise metalográfica em microscópio óptico. A preparação metalográfica seguiu os procedimentos normais de corte, lixamento e polimento. As amostras foram atacadas com Nital 10%, de modo a obter o melhor contraste entre matriz e carbonetos. A resposta ao tratamento térmico foi avaliada por medidas de dureza Rockwell C.

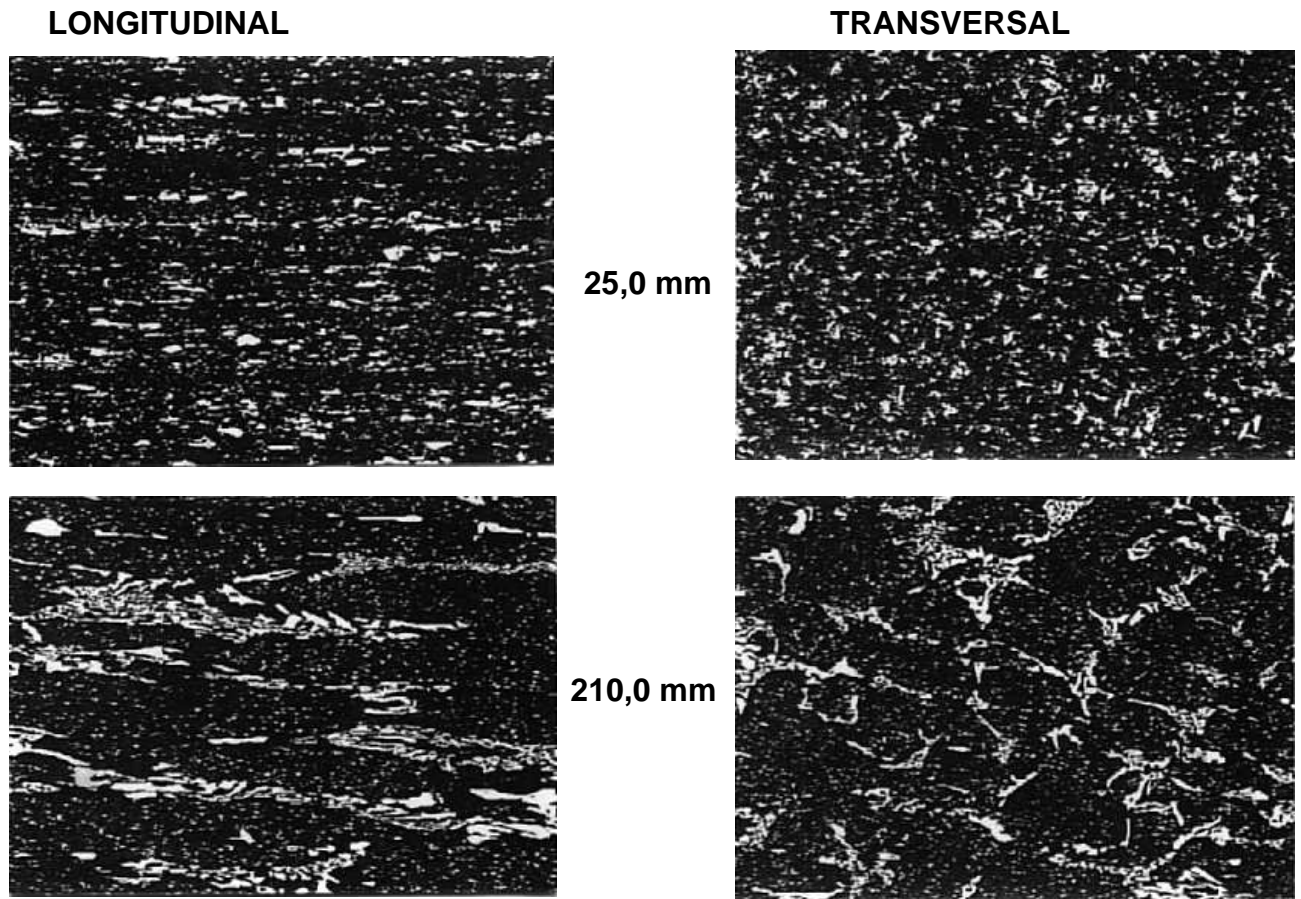
Os ensaios de tenacidade ao impacto foram realizados em corpos de prova não entalhados de dimensões 7 x 10 x 55 mm<sup>3</sup> [3]. A opção de uso de corpos de prova não entalhados foi necessária devido a baixa tenacidade do material quando do uso de corpos de prova do tipo Charpy com entalhe em “V”, o que impossibilita a diferenciação entre as diferentes condições microestruturais [4]. 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. Todas as amostras foram retificadas nas quatro faces, tomando-se o cuidado para que a direção de remoção de material pelo rebolo nunca ocorresse na direção transversal as faces.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química e a dureza dos materiais estudados encontram-se na Tabela I. O material recebido, nas diferentes bitolas, possui microestrutura composta de matriz ferrítica com dispersão de carbonetos secundários e carbonetos eutéticos tipos M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, conforme a Figura 1. Observa-se a matriz ferrítica totalmente escurecida e os carbonetos de cor branca. Verifica-se que os carbonetos eutéticos M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 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.

**Tabela I** – Composição química (% em massa) e dureza (HB) nas barras estudadas.

	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Dureza, HB</b>
<b>Ø 25,4 mm</b>	1,55	11,70	0,77	0,96	0,025	0,002	223
<b>Ø 70,0 mm</b>	1,47	11,80	0,81	0,93	0,024	0,002	256
<b>Ø 210 mm</b>	1,50	11,60	0,87	0,90	0,026	0,002	215



**Figura 1** – Microestrutura das barras no estado recozido, Nital 10%. 90x.

Os valores de tamanho dos carbonetos são mostrados na Tabela II. 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.

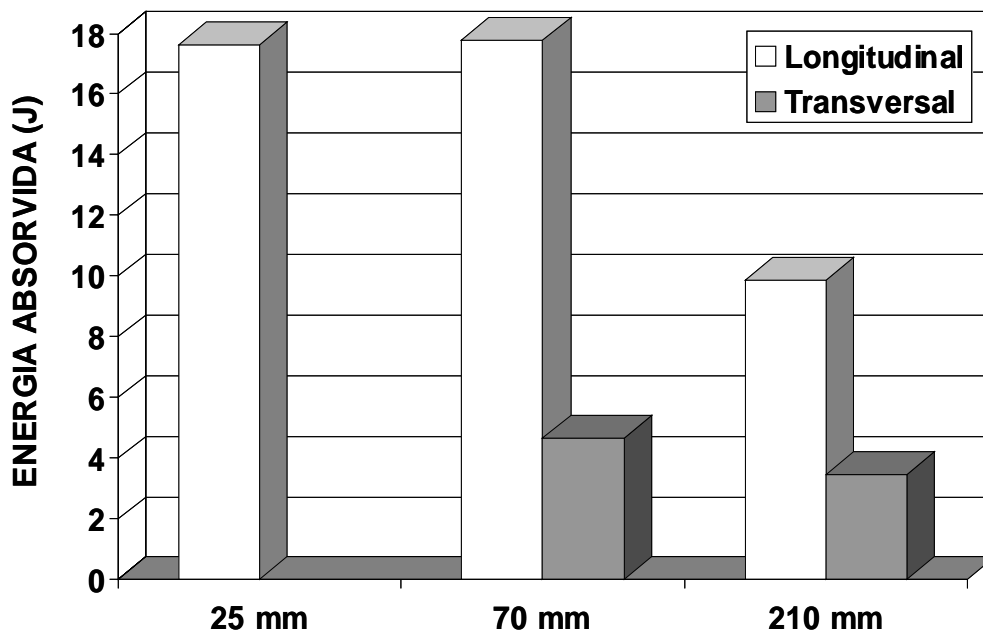
**Tabela II** – Tamanho dos carbonetos  $M_7C_3$  determinados na estrutura recozida.

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

A Tabela III e a Figura 2 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de impacto para todas as condições de microestrutura de partida. Verifica-se que existe uma tendência de diminuição crescente de tenacidade com o aumento da bitola do material nas amostras retiradas da direção longitudinal. A tenacidade ao impacto diminui, significativamente, com o aumento do diâmetro da barra para 210,0 mm. A diferença de tenacidade encontrada nas diferentes bitolas está relacionada à diferença entre o tamanho, a morfologia e a distribuição dos carbonetos eutéticos. Na bitola de 210,0 mm, onde ocorre a maior queda de tenacidade, os carbonetos possuem maiores dimensões, apresentam morfologia celular e uma distribuição alinhada e interconectada na matriz.

**Tabela III** – Energia absorvida no ensaio de impacto de corpos de prova sem Entalhe nas diferentes dimensões de partida.

Bitola (mm)	ENERGIA ABSORVIDA NO IMPACTO (J)		
	Longitudinal	Transversal	Isotropia
Ø 25,4 C	17,6	-----	-----
Ø 70,0 C	15,4	4,7	0,30
Ø210,0 C	9,9	3,5	0,35



**Figura 2** – Tenacidade ao impacto em amostras sem entalhe.

Existe ainda uma diferença de tenacidade entre amostras longitudinais e transversais. Esta diferença decorre da anisotropia decorrente da deformação [5,12]. Na deformação longitudinal do lingote ocorre um alinhamento preferencial tanto da microsegregação química, quanto dos carbonetos, que tendem a se apresentar na forma de estrias alongadas. Na Tabela II 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. Os valores de isotropia (I) são bastante baixos, Tabela III, em torno de 0,20-0,35. A anisotropia encontrada é conseqüência da diferença do tamanho dos carbonetos e da mudança de sua morfologia.

## 5. 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 tenacidade 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.

É importante salientar que, muitas vezes as operações de corte e recorte de blocos de grandes dimensões, com estruturas mais frágeis, fornecem partes de pequenas dimensões que são vendidas indistintamente para a fabricação de ferramentas de pequeno porte. Estas ferramentas podem sofrer quebra prematura ou ter sua vida limitada pela estrutura frágil proveniente do bloco original. Considerando a diminuição da tenacidade com o aumento na dimensão das barras do aço AISI D2, provocada pela distribuição de carbonetos eutéticos desfavorável, é de extrema importância que a dimensão da matéria prima seja a mais próxima possível da ferramenta a ser fabricada. Ou seja, material laminado e forjado em bitolas pequenas sempre devem ser priorizados na fabricação de ferramentas de pequeno porte. Ainda, a deformação no tratamento térmico também é afetada pela distribuição dos carbonetos e peças pequenas podem apresentar deformações inesperadas quando confeccionadas a partir de material cortado.

Os ciclos de tratamentos térmicos testados mostram uma vantagem para o revenimento em torno de 200°C. Entretanto, no caso de ferramentas destinadas a tratamentos superficiais, eletroerosão ou com necessidade de elevada estabilidade dimensional, o ciclo de revenimento em temperatura superior a 500°C pode ser aplicado em detrimento sensível da resistência à fratura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Villares Metals – “Aços Ferramenta para Trabalho a Frio”, **catálogo técnico**.
- [2] **Metals Handbook** – Metallography, Structures and Phase Diagrams, pp.: 402-404, V.8, 8º Ed., 1978.
- [3] Norström, L.A. - “Ductility and Toughness in Hot Work Die Steels – The influence of Test Procedures”, **Die Casting Engineer**, V. 33, N° 2, pp.: 42-47, 1973.
- [4] Pinedo, C.E. & da Silva, M.A. – **Pesquisa não publicada**.
- [5] Reiss, W. – Untersuchung des Werkzeugbruches beim Voll-Vorwärts-Fliesspressen, **Dr-Ing. Thesis**, Ed. Springer-Verlag, 159p.,1987.
- [6] Krauss, G. – “Heat Treated Martensitic Steels: Microstructural Systems for Advanced Manufacture”, **ISIJ International**, N° 4, V. 35, pp.: 349-408, 1995.
- [7] Honeycombe, R.W.K. – **Steels Microstructures and Properties**, Ed. Adward Arnold, 1981.
- [8] Speich, G.R. & Leslie, W.C. – “Tempering of Steel”, **Metallurgical Transactions A**, pp.: 1043-1054, N° 5, V.3, 1972.
- [9] Honeycombe, R.W.K. – **Structure and Strength of Alloy Steels**, Climax Molibdenum Co Ltd, 36p.
- [10] Berns, H.B. – Distortion and Crack Formation By Heat Treatment of Tools”, **Radex-Rundschau**, Heft 1, pp.: 40-57, 1989.
- [11] Gümpel, P., Weigang, H.H. – Untersuchungen zum Einfluss der Wärmebehandlung auf Einigeigenschaften des Kaltarbeitsstahles X155CrVMo 12 1 (Thyrodur 2379)”, **Thyssen Edelst. Techn. Ber.**, V. 9, pp.: 140-147, 1983.
- [12] Dieter, G.E. – **Mechanical Metallurgy**, Ed. McGraw HillKogakusha Ltd., pp.: 247-291, 1976
- [13] Thelning, K-E. – **Steel and Its Heat Treatment**, Ed. Butterworths & Co., pp.:332-346, 1984.

## AGRADECIMENTOS

À empresa Villares Metals S.A. pelo fornecimento dos materiais utilizados nos experimentos.

# ON THE TOUGHNESS OF THE COLD WORK TOOL STEEL AISI D2 – PARTE I THE INFLUENCE OF START MICROSTRUCTURE

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

Tool steels are widely used for industry on cutting and forming operations. This paper shows the importance of the type  $M_7C_3$  ledeburitic carbides size and distribution on the toughness of the cold work tool steel grade AISI D2, using different bar sizes, ranging from 25 to 210 mm. The results show that the carbide structure has a strong influence on the toughness. It was verified that as large the bar diameters as lower is the toughness. This behavior is related to the increase of size and the formation of network carbide morphology for the 210 mm bar. The isotropy is low for all the bars. The toughness on the longitudinal direction is higher than in the transverse. The reason is the high banding effect found on the bars hot deformation by forging and rolling.

For these reasons it is important to point out that the bar size for a given tool must be considered to be the most close to the final dimensions. The use of material from service centers, which are obtained by cutting parts from large forged blocks, may cause an unexpected tool life, because the carbide structure is not adequate.

**Key words:** Microstructure, toughness, steel AISI D2.