

A IMPORTÂNCIA DA TENACIDADE EM AÇOS FERRAMENTAS PARA TRABALHO A FRIO¹

Rafael Agnelli Mesquita²
Celso Antonio Barbosa³

Resumo

As propriedades principais dos aços ferramenta para trabalho a frio são a resistência mecânica, promovida pela alta dureza, e a resistência ao desgaste a frio. Contudo, a tenacidade também possui papel importante em muitas aplicações, principalmente em conformação de metais a frio, como corte e conformação de aço. O presente trabalho trata desta propriedade nos aços ferramenta para trabalho a frio, discutindo variáveis como tipo de aço, dureza e tratamento térmico. Os resultados obtidos podem ser comparados e empregados na seleção dos aços para trabalho a frio, de modo a promover a melhor relação de custo e desempenho.

Palavras-chave: Aço ferramenta; Trabalho a frio; Tenacidade; Desempenho.

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

² Engenheiro de Materiais, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: rafael.mesquita@villaresmetals.com.br.

³ Engenheiro Metalurgista, Gerente de Tecnologia da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: celso.barbosa@villaresmetals.com.br.

1 INTRODUÇÃO

Os aços ferramenta para trabalho a frio são empregados em diversas operações industriais de conformação de materiais, em temperaturas abaixo de 200°C e, principalmente, na temperatura ambiente. Nestas aplicações, destacam-se as operações de conformação de metais, principalmente aços, na indústrias metal-mecânica. Exemplos típicos são as ferramentas para corte e conformação de chapas, rolos laminadores de rosca, punções para cunhagem e matrizes para forjamento a frio.

Dadas suas condições de operação, os aços ferramenta empregados nas matrizes de conformação a frio possuem como propriedades fundamentais a resistência mecânica e a resistência ao desgaste. Contudo, a tenacidade também é uma propriedade importante para tais materiais, pois inibe falhas prematuras e, em muitas situações, pode reduzir o desgaste. Esta propriedade é descrita no presente trabalho, para vários aços e, também, discutida em função das condições de tratamento térmico. O foco é dado sobre os aços típicos para trabalho a frio, ou seja de alta dureza e resistência ao desgaste. Outros aços, como da série AISI O e S, não são considerados.

2 PROPRIEDADES DOS AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A FRIO

Uma vez que a conformação é realizada normalmente na temperatura ambiente, as tensões aplicadas à peça conformada devem ser elevadas, gerando assim elevadas tensões nas matrizes. Isto ocorre especialmente em regiões como cantos e ângulos das peças. As ferramentas empregadas, contudo, devem produzir séries de peças que normalmente superam mil peças, sem que ocorra deformação. Isto implica na necessidade de empregar materiais nas ferramentas que possuam *Alta Dureza*, normalmente acima de 60 HRC.

Outra solicitação importante em conformação a frio é o desgaste. A elevada pressão associada ao movimento de material implicam no desgaste, ou seja, perda de material e da dimensão da ferramenta. Com isso, as peças produzidas perdem as dimensões e a ferramenta precisa ser reparada ou substituída. Portanto, além de alta dureza, os materiais empregados em ferramentas devem possuir *Alta Resistência ao Desgaste*.

Para promover tal arranjo de propriedades, os aços ferramentas para trabalho a frio possuem uma microestrutura característica. A matriz microestrutura é composta de martensita de alta dureza. Nela, estão dispersos carbonetos grandes, conhecidos como primários por formam-se diretamente do líquido, durante a solidificação do material. A Figura 4, mais adiante, apresenta várias microestruturas de aços típicos desta classe.

A função dos carbonetos pode ser entendida no esquema da Figura 1, a partir da qual pode-se entender o desgaste abrasivo. Em termos microestruturais, o desgaste por uma partícula relaciona-se, primeiramente, à penetração dela no material e seu deslocamento, promovendo perda de material e o desgaste.

O aumento da dureza promove melhoria da resistência ao desgaste, uma vez que diminui a penetração de uma partícula abrasiva (Figura 1). Contudo, a dureza dos aços é limitada, sendo normalmente obtidos valores abaixo de 67 HRC (950 HV). Assim, uma partícula abrasiva, composta de material cerâmico, sempre poderá penetrar no material, dada sua superior dureza (acima de 2000 HV). Assim, uma maneira de

reduzir o desgaste é adicionar ao material fases duras, com dureza equivalente ou superior às partículas abrasivas. Os carbonetos primários, acima de 10 μm , desempenham este papel. Com dureza entre 1000 e 3000 HV, reduzem drasticamente à perda de material por desgaste.

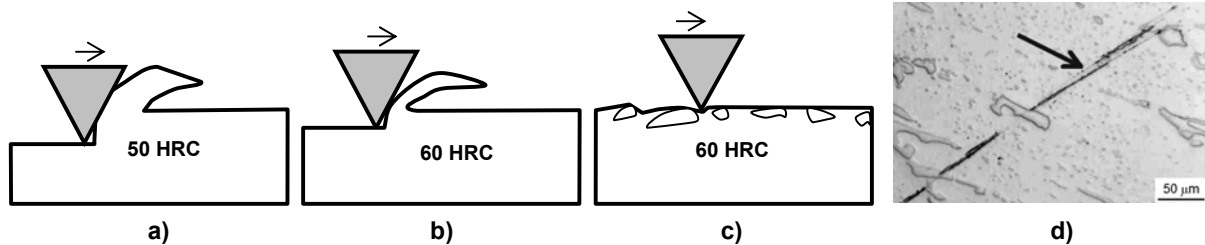


Figura 1. Esquema de desgaste, em termos microestruturais, de uma partícula abrasiva sobre: **a)** aço ferramenta, sem carbonetos primários, com 50 HRC; **b)** idem a b, porém com 60 HRC e **c)** idem a b, porém o material com carbonetos primários; **d)** imagem do desgaste de um material com carbonetos primários, mostrando a interrupção do desgaste por uma partícula abrasiva em aço VC131.

Portanto, uma microestrutura adequada para resistir ao desgaste puramente abrasivo deve conter um matriz de mais alta dureza possível e carbonetos mais duros e em maior número possível. Contudo, tal arranjo microestrutural também confere, ao material, alta fragilidade. Torna-o altamente susceptível à falhas que envolvam lascamentos, trincas ou quebras catastrófica, além de mecanismos de desgaste em condições adesivas (metal-metal). Isto porque, a *Tenacidade* fica altamente prejudicada com o arranjo microestrutural acima descrito.

Enquanto observa-se naturalmente a importância da dureza e da resistência ao desgaste, a tenacidade é uma propriedade não facilmente visualizada nos aços ferramenta para trabalho a frio. A deformação plástica e o desgaste são fáceis de ser reconhecidos e, por esta razão, seus “antídotos” – dureza e resistência ao desgaste – também o são. Por outro lado, a tenacidade é, em muitos casos, despercebida, a não ser nas situações em que ocorrem falhas drásticas, como quebra ou lascamento da ferramenta. Uma descrição desta propriedade é, portanto, dada abaixo.

3 A TENACIDADE EM AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A FRIO

A tenacidade é um conceito comumente utilizado, mas difícil de ser definido.⁽¹⁾ Uma definição muito empregada é a dada pela mecânica da fratura, referindo-se à resistência do material à propagação de uma trinca na presença de um concentrador de tensão. Outra definição estende à um conceito mais amplo, definindo a tenacidade como “a capacidade do material

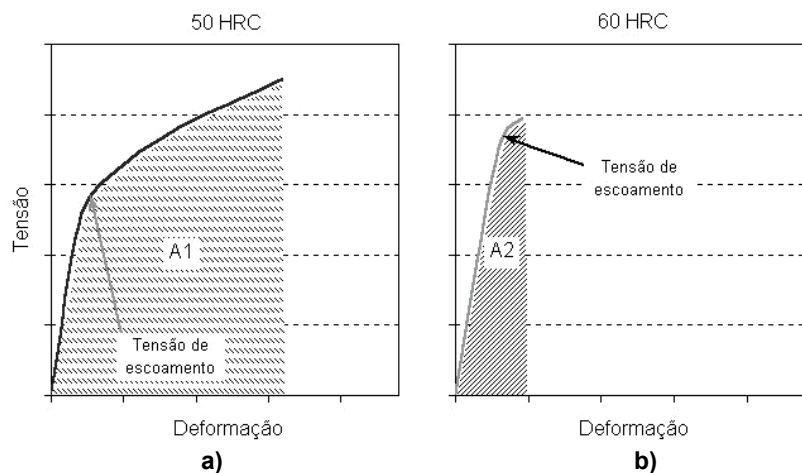


Figura 2. Curva tensão-deformação esquemática para um aço com **a)** 50HRC e **b)** 60HRC. A área sob o gráfico indica a energia necessária, por unidade de volume, para a fratura do material.

absorver energia na região plástica”,⁽¹⁾ antes da fratura, ou “de suportar tensões ocasionais acima da tensão de escoamento sem fraturar”.⁽¹⁾

Independente da definição, é observado que a tenacidade decresce com o aumento da resistência e, por isso, é naturalmente baixa nos aços ferramenta para trabalho a frio após tratamento térmico. Isto é facilmente visualizado na Figura 2, se considerada a definição da energia para a fratura do material.

Os carbonetos primários, apesar de essenciais para a resistência ao desgaste, também diminuem a tenacidade. Devido à sua alta dureza, podem ser considerados, em termos da mecânica da fratura, como defeitos presentes no material e capazes de concentrar tensões. Assim, a combinação de alta dureza da matriz associada a elevada fração, dureza e tamanho de carbonetos corresponde à situação ideal para redução da tenacidade.

Os aços para trabalho a frio são, por esses motivos, aços de tenacidade intrinsecamente baixa. Apesar deste fato, a tenacidade é importante em muitas aplicações de conformação a frio, principalmente aquelas que envolvem contato metal-metal. Nestas, os mecanismos de desgaste envolvem condições também adesivas, em que o microlascamento e microarrancamento de material, ocorridos em termos microestruturais, refletem-se macroscopicamente em desgaste da ferramenta. Um exemplo típico são ferramentas como facas de corte de chapas finas (abaixo de 10 mm) ou matrizes de conformação finas (*fine blanking*). E, como o desgaste não é unicamente abrasivo, como aquele descrito na Figura 1, a tenacidade deve também ser considerada na seleção do aço ferramenta.

Em outras situações, como punções e ferramentas de forjamento a frio, a tenacidade é facilmente percebida, pois quebras catastróficas das ferramentas são, freqüentemente, observadas. Nestas situações, a redução da dureza é a primeira atitude a ser considerada, pois a experiência prática indica que, reduzindo esta propriedade, existe uma menor tendência de quebra. Por outro lado, como comentado anteriormente, a dureza não é o único fator a afetar a tenacidade. A presença de carbonetos primários, associada ao tamanho e distribuição deles na microestrutura, podem ser tão ou mais importantes que apenas a variação da dureza. Assim, mesmos nas situações de quebra, um bom entendimento da tenacidade dos aços empregados também pode conduzir a importantes melhorias de vida útil.

No próximo item são descritas variáveis que afetam a tenacidade em aços ferramenta para trabalho a frio, como: tratamento térmico, dureza, tipo de aço e seu processo de fabricação. É, também, discutida, em função dessas variáveis, a relação entre a tenacidade e o desempenho da ferramenta.

4 VARIÁVEIS QUE AFETAM A TENACIDADE DE AÇOS FERRAMENTA PARA TRABALHO A FRIO

4.1 Ensaios Empregados

A baixa tenacidade dos aços ferramenta para trabalho a frio dificulta, também, sua avaliação nesses materiais. Os ensaios comuns para avaliação da tenacidade, como o ensaio de impacto, dificilmente aplicam-se à esses materiais, devido aos baixos valores obtidos (menores que 10 J) e a alta dispersão dos resultados. O ensaio de tenacidade a fratura também é complicado nesses materiais, uma vez que envolve

primeiramente a nucleação de uma trinca, de tamanho conhecido. Esta trinca é, normalmente, produzida por fadiga, a partir de um concentrador de tensão. Contudo, a baixa tenacidade, faz com que, uma vez iniciada, a trinca propague e gere fratura do material durante a etapa de nucleação. Ou seja, torna-se difícil o crescimento estável da trinca, dificultando o ensaios de mecânica da fratura para determinação dos valores de K_{IC} .

Um ensaio que vem sendo muito utilizado para a avaliação da tenacidade nesses materiais, com relativo sucesso, é o ensaio de flexão.⁽²⁾ Neste ensaio, o material é submetido a um dobramento, assim como no ensaio de impacto, porém em velocidades de deformação muito menores. Como o ensaio é instrumentado, mede-se com precisão os valores de força e deslocamento, proporcionando a obtenção da energia (do trabalho) necessária para fratura do corpo de prova. Assim, assemelha-se ao ensaio de impacto em termos da simplicidade de obtenção de resultados, porém com maior precisão e menor dispersão. Esta semelhança é clara quando o ensaio é denominado ensaio de dobramento estático (*static bending test*) e o ensaio de impacto de ensaio de dobramento dinâmico (*dynamic bend test*).

As curvas tensão-deformação dos aços para trabalho a frio tratados para alta dureza é semelhante à mostrada na Figura 2b, sendo notada alta tensão de escoamento, porém baixa deformação plástica. A área sob a curva, indicativa da energia para fratura do corpo de prova, é normalmente baixa. Também, dada a baixa deformação plástica, a energia (área) depende principalmente da tensão de ruptura (ao quadrado). Assim, para dureza acima de 62 HRC, muitos trabalhos reportam o resultado do ensaio de flexão apenas em termos da tensão de ruptura ou limite de resistência.

4.2 Tenacidade x Tipos de Aço

A variação da composição química entre os vários tipos de aço para trabalho a frio promove variações na microestrutura e, portanto, na tenacidade desses materiais. Uma comparação pode ser feita na Figura 3, que apresenta a energia para fratura em flexão para três aços muito empregados para trabalho a frio: o aço VD2 (AISI D2), VC131 (AISI D6) e o aço VF800AF (desenvolvido pela Villares Metals).⁽³⁾

Inicialmente, observa-se que os materiais apresentam comportamento distinto, destacando-se a elevada tenacidade do aço VF800AT. Também, que para todos aços, com exceção do VF800AT, existe um comportamento constante entre tensão (ao quadrado) e energia, visto que, como discutido, a energia para fratura depende diretamente muito do limite de resistência (Figura 2b). Para o VF800AT, a relação é diferente, porque o material possui maior deformação plástica até a fratura.

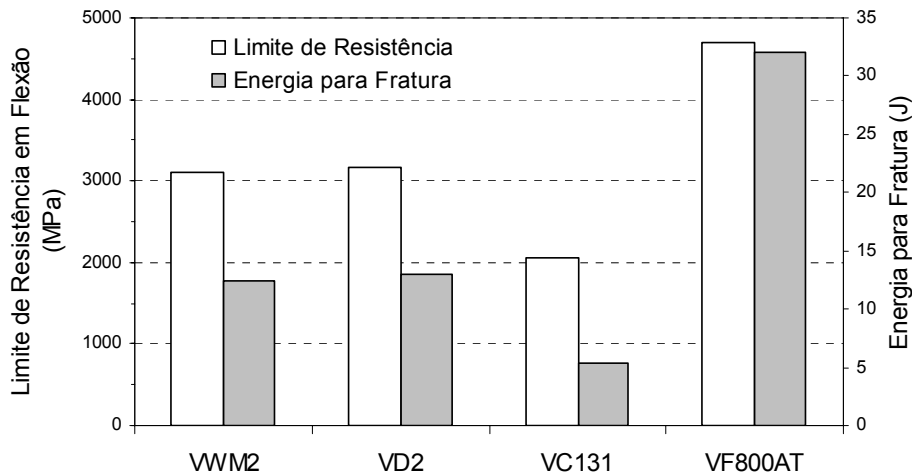


Figura 3. Resultados do ensaio de flexão a quatro pontos para os aços VWM2, VD2, VC131 e VF800AT. Resultados para bitolas de 60 mm, tratadas para dureza de $60 \pm 0,7$ HRC. Corpos de prova $5 \times 7 \text{ mm}^2$ de secção, orientação longitudinal.

As diferenças observadas na Figura 3 estão relacionadas diretamente à microestrutura dos materiais, mostrada na Figura 4. O aço VC131 possui a maior fração de carbonetos primários, que lhe conferem alta resistência ao desgaste abrasivo (4), pois estes carbonetos dificultam a remoção de material durante o desgaste pela partícula abrasiva. Contudo, os carbonetos também atuam como concentradores de tensão, reduzindo a tenacidade (Figur 3). A fração de carbonetos primários é menor no aço VD2 e, ainda menor no VF800AT, proporcionando maior tenacidade.

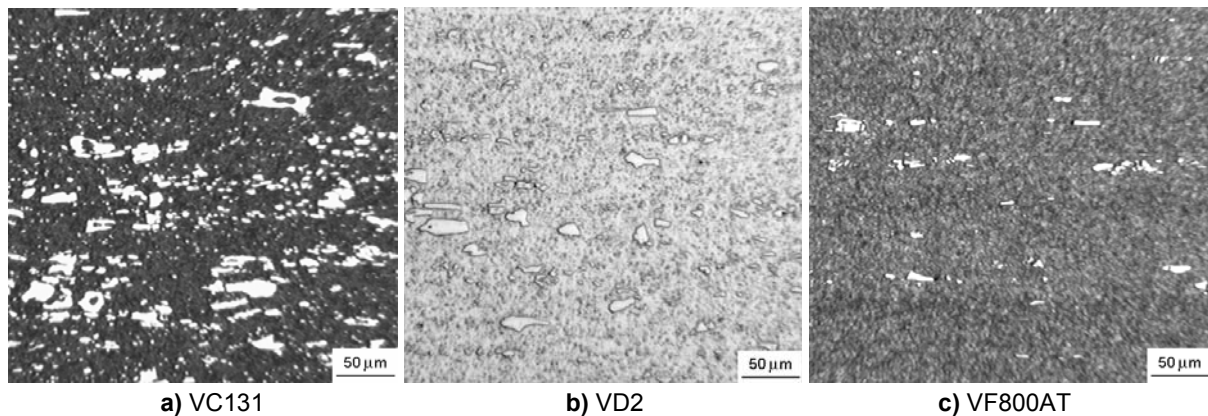


Figura 4. Microestrutura dos aços para trabalho a frio a) VC131, b) VD2 e c) VF800AT. Regiões meio raio, bitolas de 60 mm, após tratamento térmico para 60HRC. Ataque nital 4%, pelo mesmo tempo. Orientação longitudinal.

Além do aspecto dos carbonetos, a tenacidade também depende da matriz microestrutural. No caso dos aços VC131 e VD2, a dureza é promovida por martensita pouco revenida, ou seja, ainda altamente tensionada e com alta fragilidade. No aço VF800AT, contudo, o tratamento térmico envolve revenimento em alta temperatura. Isto possibilita maior alívio das tensões da martensita e, assim, aumenta sua tenacidade.

Apesar da menor fração de carbonetos primários, o aço VF800AT possui maior resistência ao desgaste abrasivo que o aço VD2 (4). Dois fatores causam esta diferença. Primeiro, o fato do VF800AT possuir, além dos carbonetos M_7C_3 ricos em Cr, também carbonetos tipo MC, ricos em V e Nb (3). No caso do VD2, a microestrutura possui majoritariamente carbonetos M_7C_3 , cuja dureza é inferior à dos carbonetos MC. Em segundo lugar, pela maior tenacidade do VF800AT, evitando microlascamentos e microtrincamentos durante o ensaio.

A questão dos microlascamentos, relacionada diretamente à tenacidade, é fundamental nas condições de desgaste adesivo (Figura 5). Esta situação envolve aplicações de contato metal-metal, típicas nas ferramentas de trabalho a frio aplicadas à estampagem, corte e repuxo de chapas, bem como outras aplicações como forjamento à frio e cunhagem. Os resultados da Figura 5 indicam, portanto, que a maior tenacidade do aço VF800AT implica em resistência ao desgaste significativamente maior. Com efeito, o arranjo de propriedades, em termos de resistência ao desgaste abrasivo e adesivo, associada à alta tenacidade conferem a este material melhoria de vida útil em ferramentas testadas em campo, como mostra a Figura 6.

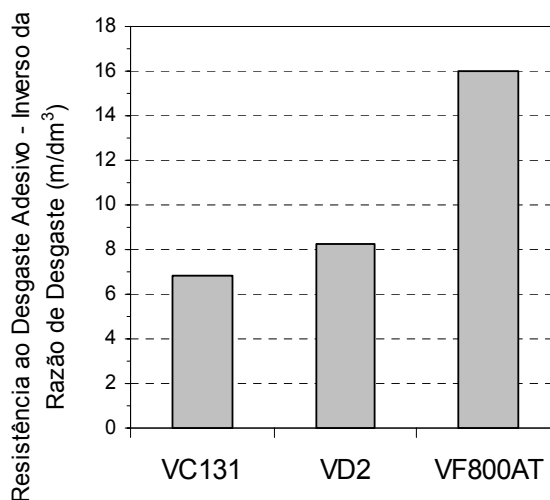


Figura 5. Ensaio de desgaste pino contra disco, pino do aço ferramenta e disco de aço SAE 1008, obtida com os dados da referência [5], carga de 30N. Neste ensaio tem-se condições tipicamente de desgaste adesivo, sendo o desgaste maior para maiores valores de razão de desgaste; o inverso desta razão caracteriza a resistência ao desgaste do aço ferramenta.

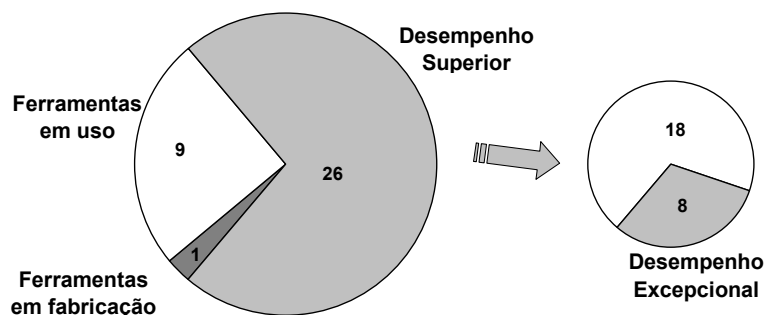


Figura 6. Resultados dos testes práticos de desempenho do aço VF 800AT, em relação aos aços VD2, VC131 e VWM2. O assinalado como desempenho excepcional corresponde a aumento de mais de 80% na vida útil das matrizes. Resultados de ferramentas de conformação a frio de aços, em condições de desgaste principalmente adesivo, avaliadas entre junho de 2000 e junho de 2001.

4.3 Tenacidade x Tratamento Térmico

Como descrito em trabalho anterior,⁽⁶⁾ o tratamento térmico possui muita importância nas propriedades dos aços ferramenta em geral. Assim, as condições empregadas devem ser as adequadas de cada material. Mesmo promovendo a dureza necessária, uma condição de tratamento térmico incorreta pode prejudicar significativamente a tenacidade dos materiais, como mostra a Figura 7. Assim, uma vez influenciando a tenacidade, o tratamento térmico pode atuar positiva ou negativamente na vida útil das ferramentas.

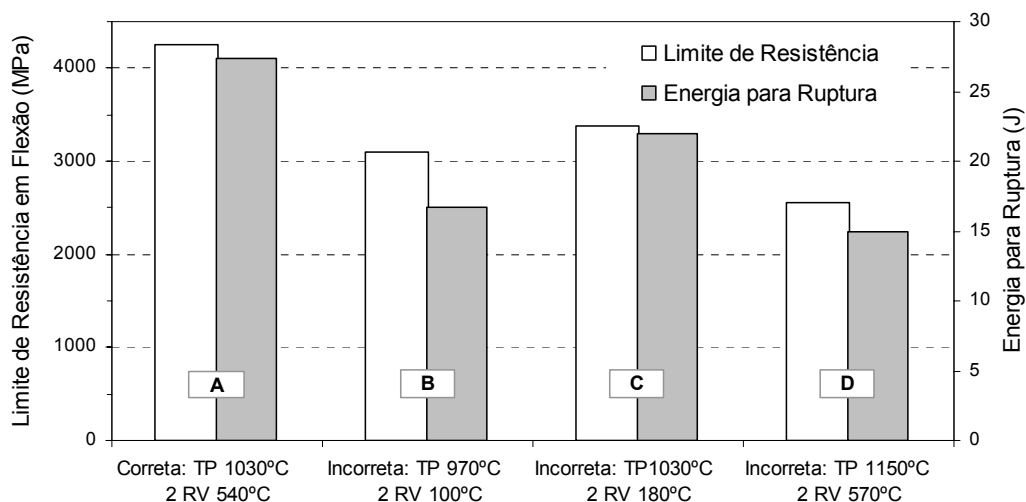
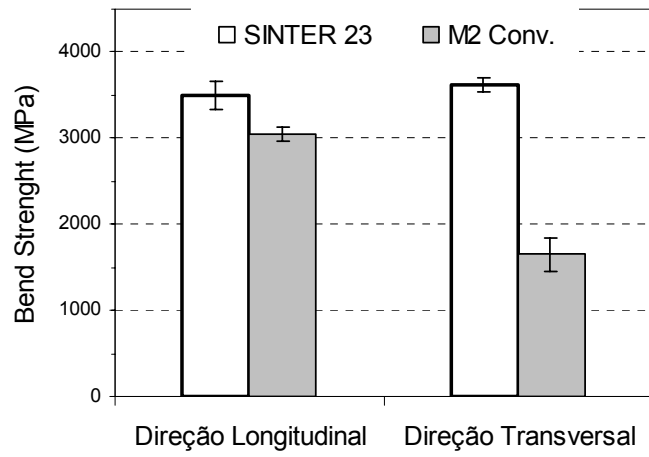


Figura 7. Resistência em flexão e energia para fratura, para o aço VF800AT tratado para diversas condições, todas com 60 HRC, sendo A a condição indicada para o material e as demais não indicadas. Os termos TP e RV referem-se, respectivamente, as temperaturas de austenitização empregadas na têmpera e as temperaturas de revenimento. Para todas, o tempo de austenitização foi de 30 min e o revenimento foi duplo de 2h.

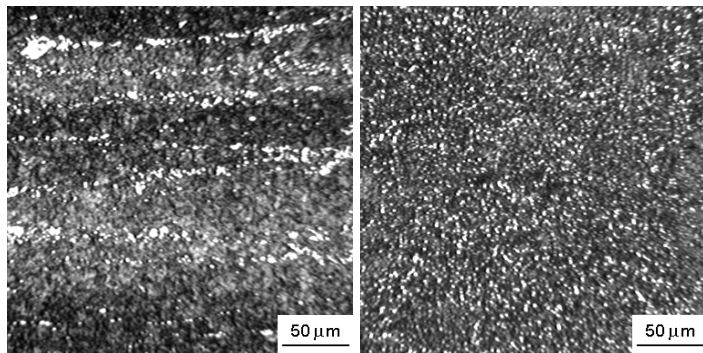
4.4 Tenacidade x Processo de Manufatura

O aço ferramenta, quando produzido, parte normalmente de lingotes. Os carbonetos nesta condição possuem a estrutura bruta de solidificação, com morfologia eutética e inadequada à utilização, devido à baixa tenacidade e falta de homogeneidade da distribuição dos carbonetos. O processo de conformação a quente “quebra” esta estrutura inicial, promovendo a distribuição que foi observada na Figura 4.

Um outra forma de modificar a microestrutura inicial é partir de uma condição com carbonetos já refinados. Isto é possível pela utilização de processos conhecidos como metalurgia do pó, que promovem distribuições homogêneas de carbonetos refinados (ver Figura 8). Assim, esses materiais possuem tenacidade superior, além de mais homogênea nas diversas direções. Os aços convencionais, por outro lado, naturalmente possuem menor tenacidade na direção longitudinal, como mostra a Figura 8.



a)



b) M2 convencional

c) Sinter 23

Figura 8. a) Resultados do ensaio de flexão para os aços Sinter 23, obtido por metalurgia do pó, comparado ao aço M2 convencional. A proximidade dos valores indica a isotropia, relacionada à homogeneidade da microestrutura, mostrada em **b)** e **c)**. Todos resultados para dureza de 64 HRC

4.5 Tenacidade x Dureza

A redução da tenacidade pelo aumento da dureza é um normalmente conhecida. Porém, é importante avaliar este efeito comparativamente ao efeito de outras variáveis descritas anteriormente. Este efeito pode ser feito, baseado na Figura 9 e comparando-a às anteriores.

Algumas discussões podem ser feitas nesta Figura. Por exemplo, para o aço D2, a redução de 1 ou dois pontos de dureza afeta a tenacidade, porem menos intensamente que a alteração do aço D2 para o aço VF800AT. Ou mesmo, um tratamento incorreto, como mostra a Figura 7, pode ser reduzir significativamente a tenacidade deste material, mais que a variação da dureza.

Para o aço M2 convencional, a redução da dureza em alguns pontos dificilmente conduz à mesma tenacidade do aço Sinter 23, obtido por metalurgia do pó, especialmente se considerada a direção transversal. E, para a falha de uma ferramenta complexa, submetida a esforços em todas direções, esta é a direção que deve ser considerada, pois é a direção de menor tenacidade e, como consequência, mais susceptível à propagação de trincas.

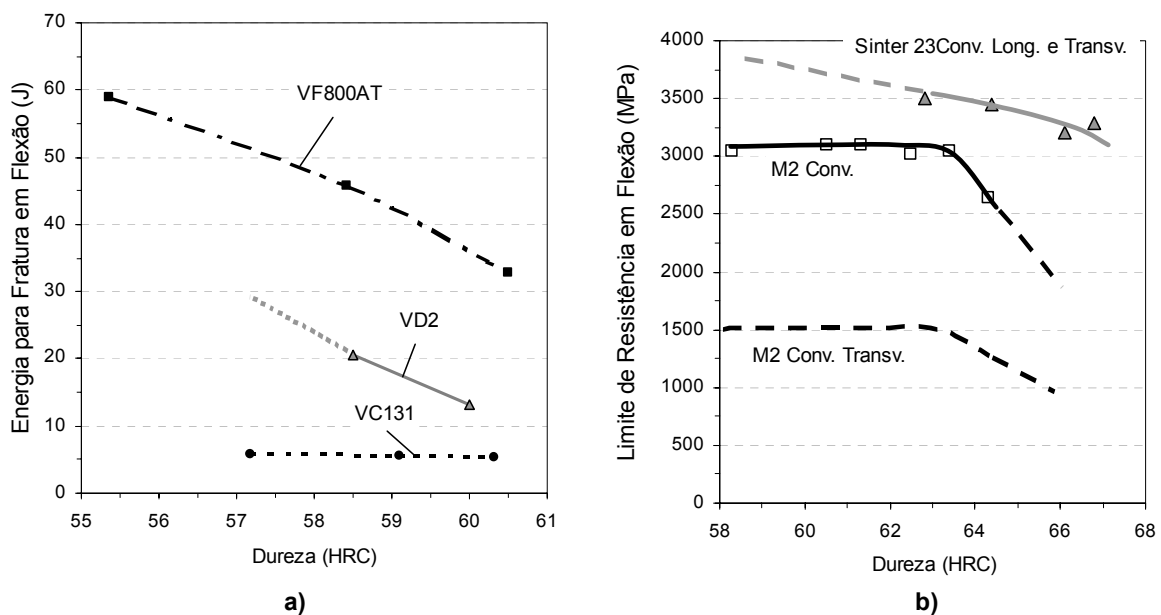


Figura 9. Resultados do ensaio de flexão para os aços VF800AT, VD2, VC131, Sinter 23 e VWM2 para várias durezas. Em a) os resultados referem-se à energia para fratura, pois as durezas mais baixas geram, para algumas condições, deformação plástica; todos valores para direção longitudinal. Em b), devido à alta dureza, apenas foi considerada o limite de resistência, proporcional a energia para esses materiais; neste gráfico são também indicados os valores aproximados, para a direção transversal, do aço M2 convencional. Para o aço Sinter 23 os valores na transversal e longitudinal são os mesmos, pois o material é 100% isotrópico.

5 CONCLUSÕES

- Além da resistência mecânica e resistência ao desgaste, a tenacidade também é uma propriedade que deve ser considerada para seleção de aços ferramenta para trabalho a frio.
- Dentre as opções para melhoria da tenacidade, destacam-se a variação do tipo de aço, a utilização de aços obtidos por metalurgia do pó e o emprego de condições corretas de tratamento térmico. A pequena variação de dureza mostra menos eficaz, na tenacidade, que essas alterações.
- Em ferramentas de conformação de metais a frio, o aço VF800AT pode promover expressiva melhoria de resistência ao desgaste, pela menor tendência à microlascamentos. Isto ocorre pela maior tenacidade do material.
- Para ferramentas complexas de dureza acima de 62 HRC, a substituição de aços rápidos convencionais por aços obtidos por metalurgia do pó pode trazer melhoria de vida útil, dada a homogeneidade de propriedades mecânicas desses materiais.

REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G.E. **Metalurgia mecânica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. p. 220-224, 287-289 e 419-439.
- 2 HOYLE, G.; INESON, E. A modified bend test for hardened tool steels. **Journal of the Iron and Steel Institute**, v. 191, p. 44-55, Jan. 1959.
- 3 MESQUITA, R.A.; ANDRIJAUSKAS, P. S.; BARBOSA, C. A. Desenvolvimento de um novo aço para trabalho a frio de alta tenacidade. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABM**, 56., 2001, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: ABM, 2001. Belo Horizonte-MG, Brasil, 2001. p. 71.
- 4 MESQUITA, R.A.; BARBOSA, C. A. Propriedades tecnológicas dos aços utilizados em ferramentas de trabalho a frio. In: ENCONTRO DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, 2., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo : ABM, 2004. CD ROM.
- 5 BRESSAN, J. D.; GILAPA, L. M.; TRAMONTIN, A. Estudo comparativo do desgaste em aços ferramenta aisi d2 , d6 e vf800at. In: ENCONTRO DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, 1., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo : ABM, 2003.
- 6 MESQUITA, R.A.; BARBOSA, C. A. Estudos de tratamento térmico nos aços ferramenta vh13iso e vf800at. In: ENCONTRO DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, 3., 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo : ABM, 2005. CD ROM.

THE IMPORTANCE OF TOUGHNESS FOR COLD WORK TOOL STEELS ¹

Rafael Agnelli Mesquita ²
Celso Antonio Barbosa ³

Abstract

The main properties for cold work tool steels are mechanical strength, reflect of material hardness, and cold wear resistance. Nevertheless, toughness also plays an important role in several applications, especially in cold metal forming, such as steel cutting and forming. The present paper deals with this property in cold work tool steels, discussing the main variables related to it, as steel grades, hardness and heat treating. The results can thus be compared and applied in material selection, leading to the best relation of tools cost and performance.

Key words: Tool steel; Cold work; Toughness; Performance.

¹ Technical contribution to be presented in the “4º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes” (4th Meeting of tools, moulds and die production chain), São Paulo, SP, Brazil, 21 to 24th March, 2006.

² Materials Engineer and Master Science in Materials Engineering, Researcher in Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brazil, e-mail: mesquita.rafael@villaresmetals.com.br.

³ Metallurgical Engineer, Technology manager in Villares Metals S. A., Sumaré - SP, Brazil, e-mail: celso.barbosa@villaresmetals.com.br.