

EMPREGO ESTATÍSTICO DE DADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E DUCTILIDADE NA MODELAGEM DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E ESTIMATIVA DA TENACIDADE DE AÇOS PLANOS

Willy Ank de Morais ¹

Resumo

A tenacidade dos materiais em geral, inclusive dos aços, está relacionada simultaneamente a uma boa capacidade de deformação plástica (ductilidade) e alta resistência mecânica, características reconhecidamente incompatíveis e difíceis de serem obtidas em valores elevados ao mesmo tempo. A relação entre a ductilidade e a resistência mecânica é normalmente expressa na forma de uma curva, similar a um decaimento exponencial, conhecida popularmente como “curva da banana”. O posicionamento desta curva está diretamente associado ao desempenho mecânico dos materiais. Neste trabalho, foram analisados milhares de conjuntos de dados com o intuito de estudar interrelações entre resistência e ductilidade de forma a se obter critérios de controle de qualidade. São obtidas equações de regressão correlacionando a resistência mecânica com a ductilidade e, a partir da análise destes resultados, introduz-se uma nova forma de quantificar a tenacidade.

Palavras-chave: Tenacidade; Propriedades mecânicas; Modelo matemático; Aços.

STATISTICAL USE OF STRENGTH AND DUCTILITY DATA ON MODELLING MECHANICAL CHARACTERISTICS AND TOUGHNESS ESTIMATION OF FLAT STEELS

Abstract

Fracture toughness of materials is proportional to both high plastic deformation capacity (ductility) and mechanical strength. However, ductility and strength are incompatible characteristics and thus tough to be obtained at high level simultaneously. The mathematical relationship between ductility and strength can be expressed like an exponential decay function so-called “banana curve.” The position of this curve is associated to the mechanical performance of the materials. In this work, thousands of data set was analyzed with the aim to study relationships between strength and ductility in way to create quality control judgment criterions. Regression equations describing strength-ductility relationship are obtained and by these, a new way to quantify toughness are introduced.

Key words: Toughness; Mechanical properties; Mathematic modeling; Steels.

I INTRODUÇÃO

O grande desafio da Metalurgia Física é, em uma determinada liga metálica, obter o controle simultâneo da microestrutura e da textura cristalina finais do material. Estas duas características são responsáveis pela suas conformabilidade, propriedades eletromagnéticas, propriedades de condução de calor e resistência à corrosão. Em aços laminados a quente, o controle microestrutural se faz mais importante, em função das propriedades de resistência mecânica, ductilidade e tenacidade que lhe são exigidas.

Por outro lado, em aços laminados a frio, o controle de textura cristalina é muito importante, sendo a textura um fator preponderante para garantir o sucesso da operação de estampagem realizada pelo cliente final.⁽¹⁾

A maneira mais simples de se obter um metal de maior resistência mecânica é reduzindo a movimentação das suas discordâncias, principal fenômeno responsável pela deformação plástica dos metais.⁽¹⁾ Assim, quando a resistência mecânica é aumentada, por algum mecanismo de endurecimento, ocorre uma natural diminuição da capacidade de deformação plástica (ductilidade) do metal

¹Engenheiro Metalurgista. Professor Adjunto da Faculdade de Engenharia da Universidade Santa Cecília – Unisantia. Técnico em Metalurgia. Gerência de Controle Integrado, Usiminas-Cubatão. Rod. Cônego Domênico Rangoni, s/nº, Jardim das Indústrias, Cep 11573-900, Cubatão, SP, Brasil. E-mail: willyank@unisanta.br; willy.morais@usiminas.com

ou de sua conformabilidade, como ilustrado pelo gráfico da Figura 1a.⁽²⁾ Sempre que é necessário aumentar a resistência mecânica e minimizar os efeitos da perda de ductilidade associada, empregam-se mecanismos especiais de controle microestrutural.

O aço é reconhecidamente um material com ampla gama de propriedades e aplicações,^(1,3-5) sendo possível obter valores relativamente elevados de resistência e ductilidade, garantindo assim um elevado nível de tenacidade ao aço, superior a dos demais materiais de engenharia.⁽⁶⁾ As formas mais usuais de melhorar a tenacidade de aços são, por exemplo:^(3,5) dispersão de precipitados finos, refino de grão, diminuição ou controle da forma das inclusões, cujo efeito benéfico está ilustrado pelo gráfico da Figura 1b. Neste gráfico, a ductilidade é representada pela máxima capacidade de expansão de um furo, previamente introduzido em um corpo de prova plano, através do estiramento (estampagem) desse corpo de prova.

Assim, aços mais adequados para uma determinada aplicação podem ser produzidos a partir de um projeto de produto adequado, levando-o a apresentar as propriedades necessárias ao seu uso final. A quantidade de variáveis e parâmetros de controle definidos nos projetos de aço de uma Siderúrgica é diretamente proporcional à variabilidade de aplicações de seus produtos.

Neste trabalho, utiliza-se uma extensa base de dados gerados em ensaios mecânicos, para verificar e quantificar correlações entre parâmetros comuns de resistência mecânica e ductilidade. Esta análise ocorre tanto em função dos tipos de produtos quanto em função das rotas de fabricação, empregadas especificamente para cada tipo de produto e

sua aplicação final. Com isto, objetiva-se criar novas opções de ferramentas para o acompanhamento e controle integrado da qualidade dos produtos analisados, assim como para servir de referência para tomada de decisões.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados analisados neste trabalho foram obtidos a partir do teste de produtos das linhas de chapas grossas, bobinas laminadas a quente e bobinas laminadas a frio. No caso particular dos dados dos ensaios de tração, deve-se considerar que a geometria do corpo de prova influencia no resultado do alongamento obtido. Por isso, empregaram-se os valores de alongamento proporcional (%AP),⁽⁷⁻⁹⁾ pois os valores deste parâmetro são função apenas do tipo de material testado. O alongamento proporcional pode ser obtido diretamente de ensaios de tração, quando se utilizam corpos de prova de dimensões proporcionais, ou pela conversão de valores de alongamento normais empregando a Equação 1, devida a Oliver:⁽²⁾

$$\%AP = \left(\frac{\text{Alongamento}_{L_0}}{2} \right) \times \left[\frac{\sqrt{\text{ÁreaCP}}}{L_0} \right]^{0.4} \quad (1)$$

Onde:

- Alongamento_{L₀} é o valor do alongamento medido em um CP com base de comparação L₀;
- Área CP é o valor da área da seção reta do CP de tração utilizado para se medir o alongamento;
- L₀ é o valor da base de comparação.

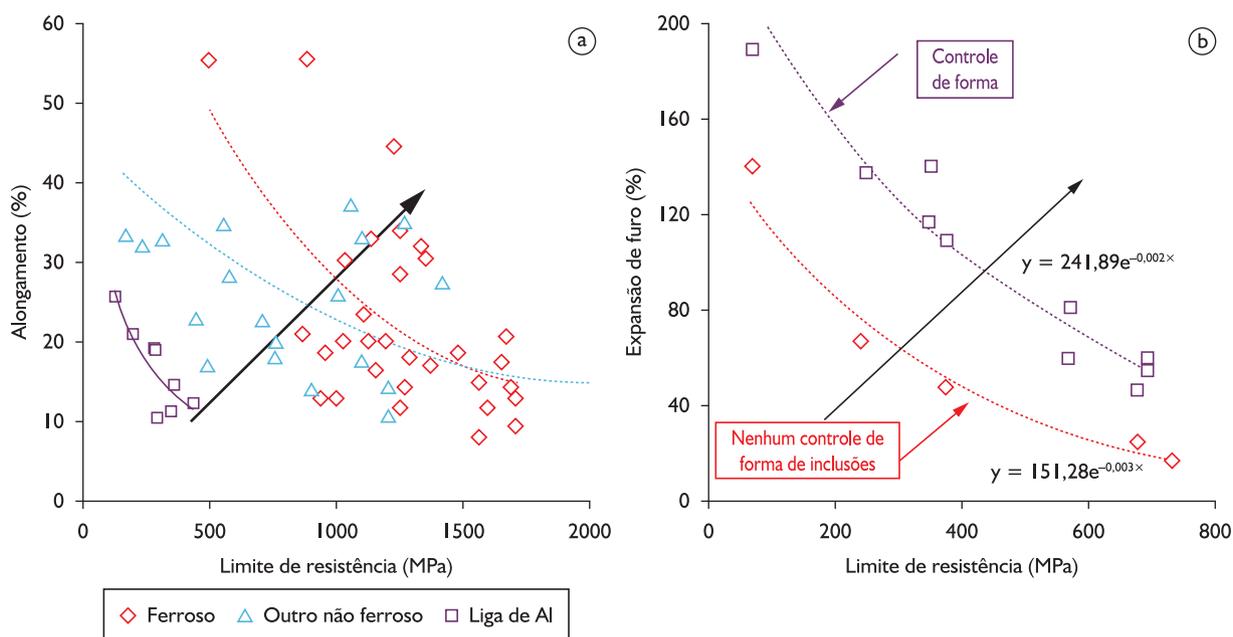


Figura 1. a) Relação geral entre a ductilidade e resistência mecânica comparando três diferentes categorias de metais;⁽²⁾ b) Exemplo da relação resistência versus ductilidade, adaptado de Davies.⁽³⁾ As setas indicam a melhoria no desempenho dos materiais em termos da relação resistência x ductilidade (tenacidade).

Valores de dureza são tipicamente mais imprecisos que os valores obtidos em ensaios de tração, devido ao menor volume de material testado em relação a um ensaio de tração.⁽¹⁰⁾ Porém, os ensaios de dureza são de execução relativamente fácil e rápida. Assim, a facilidade na medição da dureza torna este parâmetro interessante para fazer o acompanhamento estatístico da qualidade. Entretanto, a dureza pode ser medida utilizando penetradores e cargas diferentes e podendo ser expressa em diferentes escalas,⁽¹⁰⁾ regidas pelas respectivas normas. Para viabilizar o uso dos diferentes valores de dureza obtidos dos bancos de dados na análise proposta deste trabalho, define-se como referência a dureza Vickers (HV). Esta decisão foi embasada por três razões práticas:

- 1) É possível medir valores de dureza Vickers para qualquer aço (material), pois a escala Vickers é única e pode ser empregada para todos os materiais;
- 2) Existe grande disponibilidade de valores de dureza Vickers nas bases de dados da usina (81% do total pesquisado);
- 3) Há possibilidade de executar ensaios de microdureza Vickers.

A partir da norma DIN EN ISO 18265⁽¹¹⁾ é possível obter regressões polinomiais, relacionando os diversos valores de dureza, convertendo para a escala Vickers (HV) aqueles valores de dureza que não foram originalmente medidos em HV.

Todas as análises são feitas com parâmetros adimensionais, que é uma prática bastante comum nas modelagens e análises estatísticas gerais, como já realizadas anteriormente pelo autor.⁽¹²⁾ Neste trabalho estes parâmetros são especialmente úteis, pois permitem uma comparação e análise mais direta entre as diferentes variáveis de resistência mecânica com a ductilidade, mesmo que os dados sejam oriundos de produtos e processos diferentes. Assim sendo, o Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência (LR), Dureza Vickers (HV) e Alongamento Proporcional (%AP) foram convertidos para as respectivas formas adimensionais de acordo com a Equação 2:

$$V_x = \left(\frac{V_{\text{Real}} - V_{\text{Min.}}}{V_{\text{Máx.}} - V_{\text{Min.}}} \right) \quad (2)$$

Onde:

- V_x é a variável no formato adimensional (V_E , V_R , V_D ou V_A);
- V_{Real} , V_{Min} e $V_{\text{Máx}}$ são os respectivos valores real, mínimo e máximo de cada uma das variáveis (LE, LR, HV ou %AP).

Os valores mínimo e máximo (V_{Min} e $V_{\text{Máx}}$) são únicos para cada variável estudada (LE, LR, HV ou %AP) e são utilizados para todos os tipos de produtos analisados. Estes valores foram definidos a partir de um critério esta-

tístico aplicado em um conjunto de mais de dez mil dados, obtidos em ensaios de dureza e tração realizados em amostras de produtos planos de aço.

A análise dos dados adimensionais foi executada por três modelos simples de correlação matemática, escolhidos pela sua simplicidade e por permitirem gerar o formato “curva da banana” esperado na relação entre os dados de resistência e ductilidade.^(3,13) Esses modelos são representados pelas Equações 3 a 5:

$$V_A = A \cdot e^{-B \cdot V_x} \quad (3)$$

$$V_A = A \cdot (V_x)^{-B} \quad (4)$$

$$V_R = A + B \cdot V_D \quad (5)$$

Onde:

- V_A é o valor do alongamento adimensional;
- A e B são os parâmetros das equações de correlação;
- V_x é o valor da resistência adimensional, sendo V_E para o LE, V_R para o LR e V_D para a dureza Vickers (HV).

Os modelos foram aplicados de forma integral nos resultados de todos os produtos e, posteriormente, para cada tipo de produto, de maneira isolada. Ao longo da execução deste trabalho, observou-se que a Equação 3 se aplica melhor aos materiais estudados, por apresentar uma melhor representatividade global, demonstrada pelos maiores valores obtidos do coeficiente de determinação (R^2). Os valores de R^2 são especialmente maiores quando se empregam dados de aços mais resistentes. Já a Equação 4 ajusta-se melhor aos dados de produtos mais dúcteis, materiais para os quais essa equação apresenta maiores valores de R^2 . A Equação 5 é utilizada somente para validar a correlação linear entre os dados de limite de resistência e dureza (HV), conforme já esperado pela literatura.^(10,11)

A distância relativa (afastamento ou aproximação) entre um ponto definido por um par de dados resistência (V_E , V_R ou V_D) e ductilidade (V_A) da respectiva regressão, estabelecida pelas Equações (3 ou 4), é definida como sendo uma característica adimensional T_w . Esta variável apresenta um comportamento similar ao de um parâmetro de tenacidade, pois, como ilustrado na Figura 1, este parâmetro quantifica o quão elevada é a combinação entre a resistência mecânica e a ductilidade do material analisado de forma que:

- T_w negativo para um material indica que ou sua resistência ou sua ductilidade do material (ou ambos) foram menores do que a média geral;
- T_w positivo equivale a um desempenho melhor ou acima da média.

Os dados de T_w foram comparados com os respectivos valores de energia Charpy, em Joules (J). Estes foram obtidos em ensaios de impacto com corpos de prova (CPs) 10 mm × 10 mm ou em dimensões menores (*subsize*), cujas energias, por unidade de área (J/cm²), foram convertidas para a energia em Joules (J) equivalente a uma área de 10 mm × 10 mm. Utilizaram-se valores de energia Charpy, oriundos de testes realizados em várias temperaturas: 0°C, -15°C, -20°C, -25°C, -35°C, -40°C, -45°C e -46°C.

Adicionalmente, utiliza-se a equação devido à Rolfe e Novak,⁽¹⁴⁾ recomendada como forma de estimar os valores de K_{IC} (fator de intensidade de tensões crítico) utilizando valores de energia Charpy (E_c), quando estes são obtidos acima da transição dúctil-frágil. Esta equação é adotada, já que os produtos siderúrgicos apresentam, notoriamente, uma tenacidade acima da transição dúctil-frágil.⁽⁹⁾ Os valores obtidos de K_{IC} são comparados e correlacionados com os respectivos valores de energia Charpy e T_w

$$K_{IC} = LE \times \sqrt{\left(\frac{0,646 \cdot E_c}{LE}\right) - 0,00635} \quad (6)$$

Onde:

- E_c (J) é a energia Charpy em CPs 10 mm × 10 mm;
- LE (MPa) é o limite de escoamento;
- K_{IC} (MPa·√m) é um parâmetro de tenacidade à fratura (fator de intensidade de tensões crítico).

Os valores obtidos da base de dados da Usiminas-Cubatão foram pré-processados utilizando-se o *software* Microsoft Excel® e analisados estatisticamente pelo *software* Origin 7.0: *Scientific Graphing and Data Analysis*®, produzido pela OriginLab.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos das Figuras 2a, b e c ilustram a tendência geral existente entre as variáveis adimensionais, calculadas pela Equação 2, após ser alimentada pelos seguintes dados obtidos de ensaios de tração e dureza:

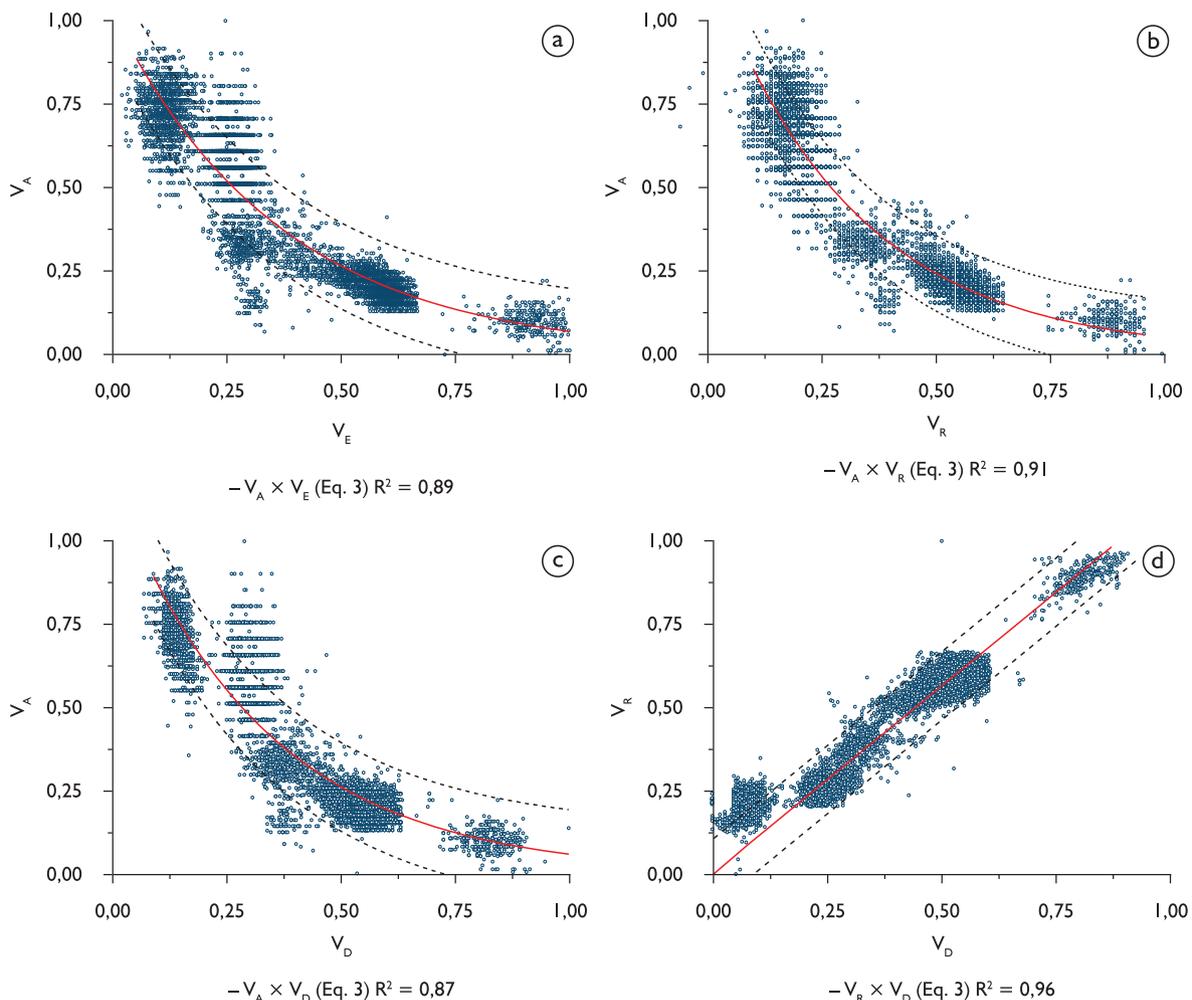


Figura 2. Resultados das análises das variáveis adimensionais de resistência (V_E , V_R e V_D) e ductilidade (V_A) obtidas em testes com três diferentes tipos de produtos planos de aço (12.417 dados).

- LE – Limite de Escoamento (V_E)
- HV – Dureza Vickers (V_D)
- LR – Limite de Resistência (V_R)
- %AP – Alongamento Proporcional (V_A)

Nestes gráficos também estão representados a modelagem, baseada na Equação 3. A linha cheia representa o modelo matemático de regressão e as duas linhas pontilhadas representam o envelope de 90% de probabilidade de predição do modelo adotado. A Figura 2d ilustra a relação linear, representada pela Equação 5, esperada entre os valores do limite de resistência (V_R) e dureza (V_D). Mesmo no formato adimensional, a esperada relação linear^(10,11) é bem definida.

A Tabela 1 apresenta os resultados da interpolação dos valores de ductilidade (V_A) pelos de resistência mecânica (V_E , V_R e V_D), conforme as Equações 3 e 4, e dos valores do limite de resistência (V_R) pela dureza (V_D), conforme a Equação 5. Nesta tabela também estão listados os respectivos erros na estimativa dos dois parâmetros (A e B) das Equações 3 a 5 e os respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos pelo ajuste feito nos dados reais pelas equações.

De acordo com os dados da Tabela 1, pode-se perceber que as Equações 3 e 4 são relativamente eficazes no modelamento da dependência entre as diferentes formas de avaliar a resistência (LE, LR e HV) com a ductilidade (%AP) de diversas formas de aços. Utilizando-se os valores do coeficiente de determinação (R^2) como critério de precisão, verifica-se que a interpolação dos dados pela Equação 3 ($R^2_{méd} = 0,89$) é mais representativa do que a obtida pela Equação 4 ($R^2_{méd} = 0,79$). Assim, a Equação 3 é definida como referência na análise dos dados dos ensaios de tração e dureza e também para gerar os dados de tenacidade adimensional (T_w).

Ainda considerando-se os resultados ilustrados pela Tabela 1, verifica-se maior dispersão na relação entre a ductilidade pela resistência mecânica, quando esta é quantificada pelo Limite de Escoamento (LE) ou pela dureza Vickers (HV). Os valores do coeficiente de determinação (R^2) para a relação $V_E \times V_A$ (0,89 e 0,77) e $V_D \times V_A$ (0,87 e 0,76) são menores do que os valores de R^2 obtidos para a relação $V_R \times V_A$ (0,91 e 0,83). Esta maior dispersão pode também ser notada, ainda que apenas qualitativamente,

observando-se os gráficos da Figura 2. Pode-se atribuir este resultado a uma maior representatividade na medição do Limite de Resistência em relação à dureza, devido à diferença de tamanho do material sendo efetivamente testado. No caso do Limite de Escoamento, a dispersão obtida é maior devido à maior dificuldade experimental na sua medição, conforme já salientado em trabalho anterior.⁽⁸⁾

Quando se modela isoladamente cada tipo de produto (chapas grossas, bobinas a quente e a frio) é obtido um grau de dispersão mais elevado. Neste caso, são obtidos valores do coeficiente de determinação (R^2) tão baixos quanto 0,40. Isso ocorre porque, considerando apenas uma linha de produtos, obtém-se um conjunto mais limitado de valores de resistência e ductilidade. Essa restrição na amplitude dos dados disponíveis prejudica a abrangência do modelo da “curva da banana”, que funciona melhor quando relaciona produtos diferenciados, como tipicamente apresentado pela literatura.⁽¹³⁾

Para fazer a quantificação e análise pelo parâmetro T_w adota-se a relação $V_A \times V_E$, descrita pela Equação 3. Esta escolha é justificada em relação ao uso da relação $V_A \times V_R$, que possui maior valor de R^2 , porque os valores de LE são naturalmente utilizados para estimar a tenacidade, como indicado na Equação 6. Já a escolha da Equação 3 se dá, como já salientado, por esta relação apresentar valores mais elevados de R^2 (0,89) em relação ao obtido (0,77) pela Equação 4.

Na Figura 3 estão ilustrados os valores da energia Charpy (E_C), parâmetro de tenacidade (T_w) e os valores (estimados) de tenacidade à fratura (K_{IC}) em função do teor de enxofre. A utilização do teor de enxofre como referência deve-se a este elemento ser reconhecidamente um fator de grande influência (prejudicial) na tenacidade dos aços.⁽¹⁻⁵⁾ Assim, o teor de enxofre dos aços é utilizado como base para verificar a dependência dos parâmetros citados (E_C , T_w e K_{IC}).

Para fazer a comparação com os resultados de energia Charpy, define-se como referência os resultados obtidos a -40°C , pois estes são mais representativos que os valores obtidos em outras temperaturas. Nesta temperatura (-40°C), foi testada uma maior variedade de chapas

Tabela 1. Resultados da interpolação das variáveis adimensionais de resistência (V_E , V_R e V_D) e ductilidade (V_A) de produtos planos de aço (12.417 dados)

Equação	Variáveis	A	Erro A	B	Erro B	R^2	
(3)	$V_A \times$	V_E	1,152	$\pm 3,92 \times 10^{-3}$	2,82	$\pm 1,09 \times 10^{-2}$	0,89
		V_R	1,170	$\pm 3,59 \times 10^{-3}$	3,14	$\pm 1,11 \times 10^{-2}$	0,91
		V_D	1,162	$\pm 4,00 \times 10^{-3}$	3,00	$\pm 1,11 \times 10^{-2}$	0,87
(4)	$V_A \times$	V_E	0,165	$\pm 1,00 \times 10^{-3}$	0,791	$\pm 3,89 \times 10^{-3}$	0,77
		V_R	0,142	$\pm 0,86 \times 10^{-3}$	0,863	$\pm 3,78 \times 10^{-3}$	0,83
		V_D	0,160	$\pm 1,01 \times 10^{-3}$	0,778	$\pm 3,89 \times 10^{-3}$	0,76
(5)	$V_R \times$	V_D	0,00	–	1,13	$\pm 1,3 \times 10^{-3}$	0,96

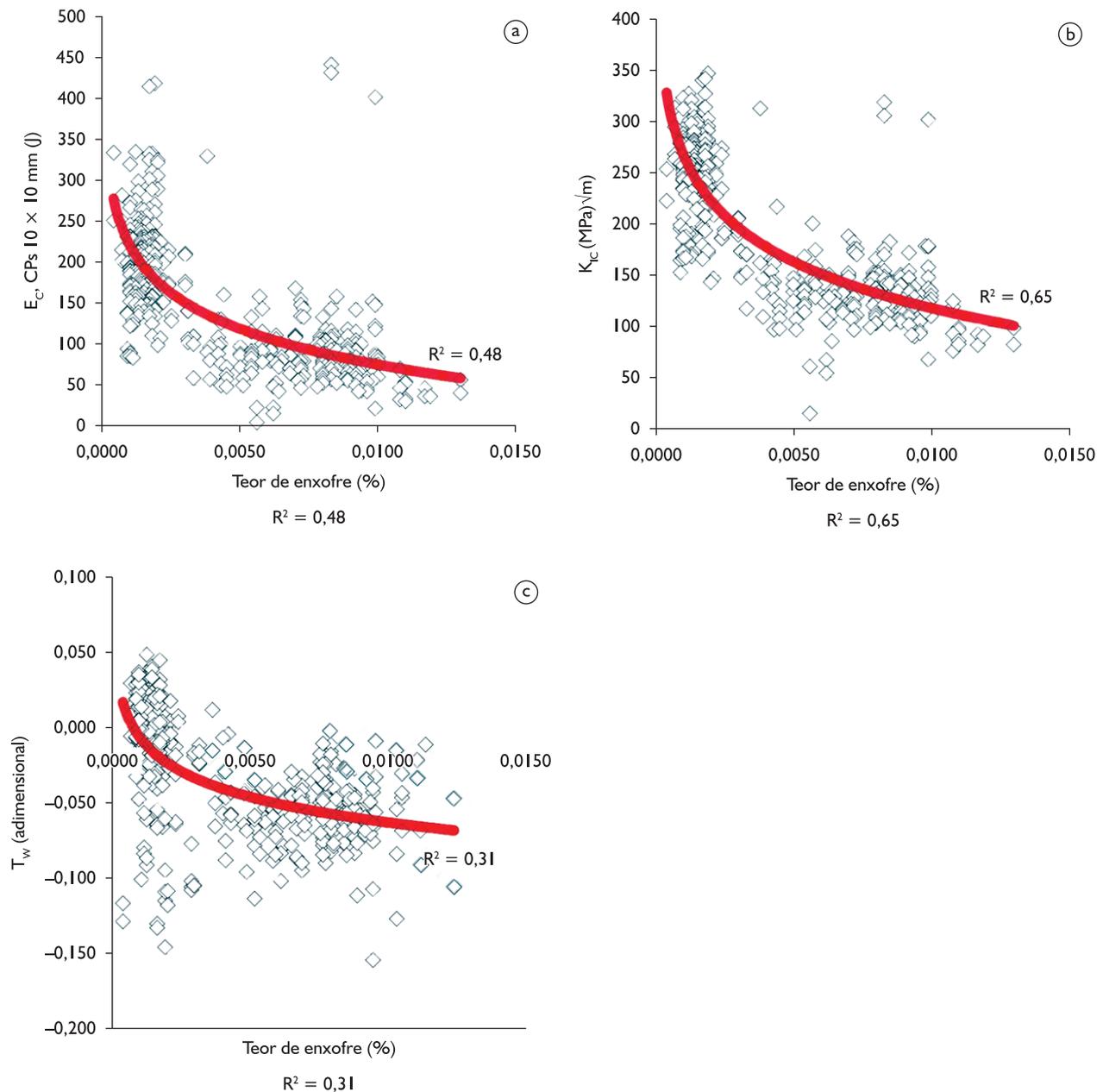


Figura 3. Variação dos parâmetros de estimativa de tenacidade com o teor de enxofre do aço: a) energia Charpy (E_C), avaliada a -40°C ; b) fator de intensidade de tensões crítico (K_{IC}) estimado pela Equação 6 e c) parâmetro de tenacidade adimensional T_W (422 dados).

grossas e bobinas laminadas a quente, produzidas em rotas e condições de laminações mais variadas, que oferecem maior abrangência à modelagem.

A estimativa da tenacidade (T_W), quantificada por uma melhor relação entre a resistência e ductilidade do material, conforme sugerido na Figura 1, apresenta a mesma tendência de valores que os obtidos pela medição direta da energia Charpy (E_C) ou pela estimativa dos valores de tenacidade à fratura (K_{IC}), pelo uso da Equação 6. Por isso, foram feitas correlações lineares entre estas variáveis ($T_W \times K_{IC}$ e $E_C \times K_{IC}$) de tal forma que, conhecendo T_W , é possível estimar E_C .

A estimativa de K_{IC} a partir de T_W não é tão precisa ($R^2 = 0,4$) quanto E_C a partir de K_{IC} ($R^2 = 0,9$). Os valores de T_W apresentam uma maior imprecisão na estimativa da tenacidade ($R^2 = 0,31$) do que os ensaios de energia Charpy ($R^2 = 0,48$), porém os valores de T_W podem ser facilmente obtidos pela análise dos resultados de ensaios de tração. Esta facilidade de obtenção torna o parâmetro T_W interessante para o acompanhamento do nível de qualidade de produtos, nos quais não são realizados nem ensaios de tenacidade à fratura e nem ensaios Charpy. O acompanhamento da variável T_W também permite estabelecer previamente as melhores práticas industriais para

controlar e maximizar a tenacidade dos aços de forma mais rápida e econômica, sem a necessidade de execução imediata de outros ensaios mecânicos que não o de tração.

4 CONCLUSÕES

Os resultados descritos neste artigo ilustram que é possível relacionar a resistência mecânica e a ductilidade de produtos siderúrgicos. Esta análise só é possível, porém, quando se consideram grandes volumes de dados oriundos de diferentes categorias de produtos, dentro da mesma família de materiais, no caso aço carbono ou microligado (Alta Resistência Baixa Liga).

Os modelos também permitem acessar, indiretamente, a tenacidade dos materiais, já que esta propriedade é diretamente proporcional a um maior grau de resistência

meccânica obtida para um determinado nível de ductilidade ou vice versa, conforme sugerido pelos gráficos da Figura 1.

Assim, os modelos de regressão aqui obtidos podem ser empregados para:

- averiguar detalhes das diversas famílias de aços, complementando e/ou validando os resultados de modelos já desenvolvidos previamente;^(7,14) auxiliar na compreensão do desempenho do material quanto à tenacidade e na orientação de métodos de controle, assim como na melhoria desta propriedade;⁽⁹⁾
- complementar os resultados de dureza⁽¹⁰⁾ ou de resistência mecânica obtida por métodos alternativos (não destrutivos ou sem contato),⁽¹⁵⁾ com estimativas da ductilidade dos materiais testados, mesmo que esta característica não seja efetivamente medida nestes testes.

REFERÊNCIAS

- 1 MAGNABOSCO, A.S. Resistência mecânica × conformabilidade. In: MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S.; NETTO, E.B.M. *Metalurgia física e mecânica aplicada*. 2. ed. São Paulo: ABM, 2009.
- 2 MATWEB. Material property data. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx>>. Acesso em: 11 nov. 2009.
- 3 DAVIES, R.G. High strength steels in automobiles. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON AUTOMOTIVE STEELS, 1988, Moscow. *Proceedings...* Moscow: CBMM, 1988. p. 23-39.
- 4 PICKERING, F.B. High-strength low-alloy structural steels. In: _____. *Physical metallurgy and the design of steels*. Great Yarmouth (UK): Applied Science, 1983. Cap. 4, p. 81-5.
- 5 MORAIS, W.A. et al. Desenvolvimento de aços laminados a quente na Cosipa destinados à produção de tubos API pelo processo ERW. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 40., 2003, Vitória. *Anais...* São Paulo: ABM, 2003. p. 159-68.
- 6 ASHBY, M.F. Materials selection charts. In: _____. *Materials selection in mechanical design*. Oxford: Pergamon, 1992. Cap. 4, p. 24-55.
- 7 BORGES, H.C.; MORAIS, W.A.; PLAUT, R.L. Predição de propriedades mecânicas em aços laminados a quente utilizando redes neurais adaptativas. In: CONGRESSO DA ABM, 64., 2009, Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: ABM, 2009. 1 CD.
- 8 BORGES, H.C.; MORAIS, W.A.; PLAUT, R.L. Aplicação prática de redes neurais artificiais no desenvolvimento e adequação de aços laminados a quente na Usiminas Cubatão. In: CONGRESSO DA ABM, 64., 2009, Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: ABM, 2009. 1 CD.
- 9 MORAIS, W. A.; BORGES, H.C. *Análise numérico-estatística da tenacidade de aços planos: emprego de conceito da mecânica de fratura e inteligência computacional*. In: CONGRESSO DA ABM, 66., 2011, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2011
- 10 REVANKAR, G. Hardness testing. In: ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook: mechanical testing and evaluation*. Materials Park, 2000. v. 8, p. 416-613.
- 11 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN EN ISO 18265: Metallic materials - conversion of hardness values*. Berlin, 2004.
- 12 MORAIS, W.A. et al. Simulação computacional do comportamento mecânico em tração e fadiga de materiais compostos fibrosos unidirecionais. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 50., 1995, Águas de São Pedro. *Anais...* São Paulo: ABM, 1995. v. 4, p. 713-30.
- 13 MILITITSKY, M. Advanced steel products for lightweighting at daimlerchrysler. In: THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NIOBIUM MICROALLOYED SHEET STEELS FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS, 2005, Araxá. *Proceedings...* Araxá: CBMM, 2005. 1 CD.

- 14 ROLFE, S.T.; NOVAK, S.R. *Slow-bend K_{Ic} testing of medium-strength high-toughness steels*. In: BROWN, W.F. *Review of developments in plane-strain fracture toughness testing*. Lutherville-Timonium: American Society for Testing and Materials, 1970. p. 124-59. (ASTM STP 463\0).
- 15 HERRMANN, K; IRLE, M. IMPOC[®]: an online material properties measurement system. In: GINZBURG, V.B. *Flat-rolled steel processes: advanced technologies*. Boca Raton: CRC, 2009. Chap. 24, p. 265-9.

Recebido em: 15/02/2011

Aceito em: 12/07/2011