



ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS E SUA TENACIDADE¹

Willy Ank de Moraes²

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. Com o intuito de estudar esta relação e permitir criar critérios matemáticos para fazer previsões de controle de qualidade em produtos, foram analisados milhares de dados reais obtidos no laboratório de ensaios mecânicos da empresa. Equações de regressão foram obtidas e relações entre as variáveis foram verificadas em função dos tipos de produtos e faixas de propriedades.

Palavras-chave: Tenacidade; Propriedades mecânicas; Modelamento; Aços.

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN STEEL CHARACTERISTICS AND THEIR TOUGHNESS

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 mechanical performance of the materials. In this work, thousands of data set was analyzed with the aim to study this relationship and further to create quality control judgment criterions. Regression equations were obtained by product types and properties ranges.

Key-words: Toughness; Mechanical properties; Modeling; Steels.

¹ Contribuição técnica ao 65^o Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Doutorando, MSc., Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia, Engenheiro de Produto Sênior da USIMINAS de Cubatão, Professor da Faculdade de Engenharia da UNISANTA e Diretor da divisão técnica “Aplicações de Materiais” da ABM. E-mail: willyank@unisanta.br ou willy.morais@usiminas.com.

1 INTRODUÇÃO

O grande desafio da Metalurgia Física é, com uma determinada liga metálica, obter o controle simultâneo da microestrutura e da textura cristalina finais do material. Estas duas características são responsáveis pela sua conformabilidade, propriedades eletromagnéticas, propriedades de condução de calor, propriedades ópticas (tais como a opacidade) e pela 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 é fator preponderante para garantir o sucesso da operação de estampagem no cliente final.⁽¹⁾

A maneira mais simples de se obter um metal de maior resistência mecânica é reduzindo a movimentação das suas discordâncias, fenômeno que é o principal responsável pela deformação plástica dos metais. Assim, quando a resistência mecânica é aumentada, por algum mecanismo de endurecimento, ocorre uma natural diminuição da capacidade de deformação plástica (ductilidade) do metal ou de sua conformabilidade, conforme esquematizado na Figura 1.⁽²⁾

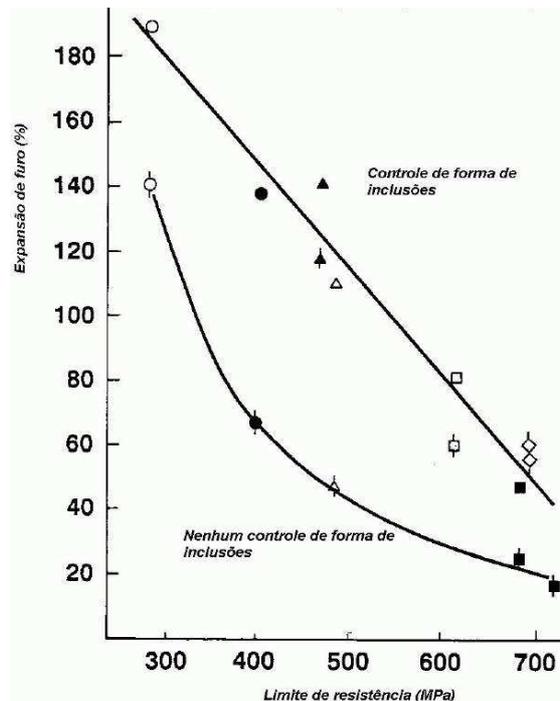


Figura 1 – Exemplo da relação resistência versus ductilidade, adaptado de Davies.⁽²⁾

Sempre que é necessário aumentar a resistência mecânica e minimizar os efeitos da perda de ductilidade associada, empregam-se mecanismos especiais de controle microestrutural, tais como: dispersão de precipitados finos, refino de grão, diminuição ou controle da forma das inclusões. A Figura 1⁽²⁾ apresenta o efeito benéfico da transformação das inclusões presentes no aço para a forma globular. Em complementação, a Figura 2 ilustra dois exemplos^(3,4) da bem conhecida influência do conteúdo em enxofre de um aço sobre a energia Charpy obtida, sendo que esta energia é um parâmetro relacionado à tenacidade do aço.

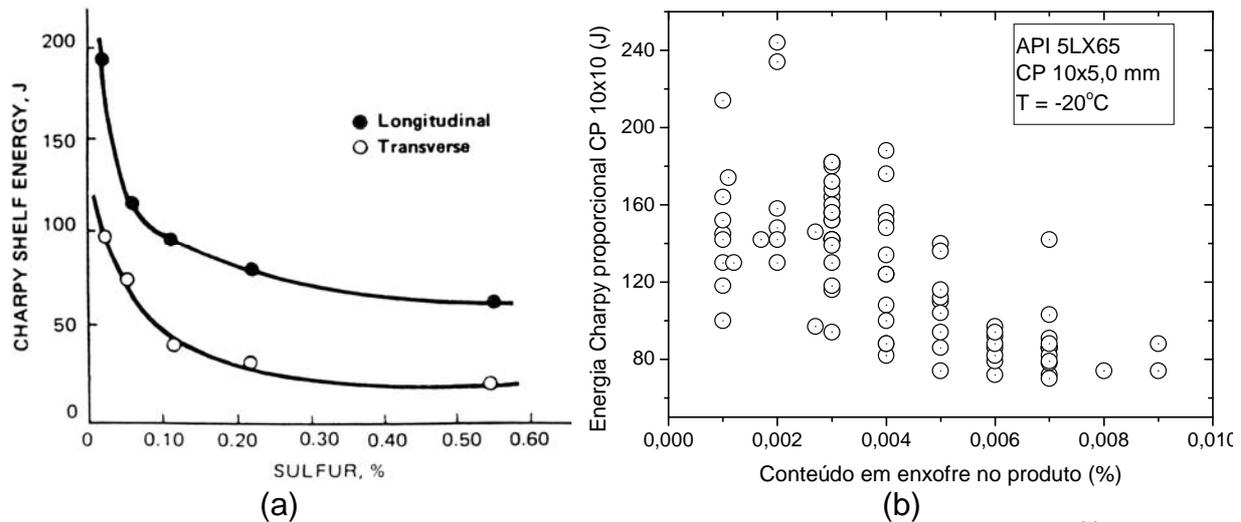


Figura 2 – Relação entre a energia Charpy e o teor de enxofre em aços: (a) Pickering⁽³⁾ em duas direções (b) Morais et. al. somente direção transversal.⁽⁴⁾

O aço é reconhecidamente um material com ampla gama de propriedades e aplicações.⁽⁵⁾ Assim o aço mais adequado para uma determinada aplicação final deve ser produzido a partir de um projeto de produto adequado, que vai oferecer a este material as propriedades desejadas e necessárias. A quantidade de variáveis e parâmetros de controle definidos nos projetos de aço de uma Siderúrgica é diretamente proporcional à variabilidade do seu portfólio e severidade de aplicações de seus produtos, como é o caso da Usiminas-Cubatão. No caso da Usiminas-Cubatão são produzidos quatro tipos de produtos planos: placas, chapas grossas, bobinas laminadas a quente e a frio. As aplicações de seus produtos são variadas:

- comercial / uso geral;
- estampagem;
- construção civil/ Estrutural/naval;
- botijões;
- tubos pequeno diâmetro;
- móveis de aço;
- longarinas de caminhões/vagões ;
- esquadrias;
- fitas de embalagem ;
- laminas de motores;
- construção mecânica/Trat. Térmico; e
- relaminação.

Assim sendo, o presente trabalho foi executado devido à:

- complexidade dos mecanismos e fenômenos que influenciam as propriedades dos produtos da empresa;
- variabilidade de aplicações e usos finais dos produtos; e
- necessidade de criar inovações no controle de qualidade de produtos.

Foram analisados milhares de dados reais obtidos no laboratório de ensaios mecânicos da Usiminas-Cubatão. Equações de regressão foram obtidas entre características de resistência, ductilidade e tenacidade dos dados analisados. Foram verificadas relações entre estas variáveis tanto em função dos tipos de produtos quanto em função das faixas de propriedades. Com isso, objetivou-se criar novas opções de ferramentas para o acompanhamento e controle integrado de qualidade de seus produtos assim como para tomada de decisões. Na prática, as equações de

regressões obtidas são empregadas para analisar detalhes de famílias de aços, os dados mostrados neste trabalho são apenas ilustrativos do potencial que vem sendo explorado pelo corpo técnico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os produtos da Usiminas-Cubatão são testados diversas normas de qualidade dos aços (ASTM, Euronorm, JIS, ABNT etc.). Considerando que a capacidade nominal da Usiminas-Cubatão é de aproximadamente 4 milhões de toneladas/ano de produtos finais, pode-se facilmente concluir que é gerada uma grande quantidade de resultados de propriedades mecânicas, chegando-se a dezenas de milhares ao longo de um ano. Esta massa de dados tem permitido que a equipe da Superintendência da Garantia da Qualidade da Usiminas-Cubatão realize análises estatísticas e também gere modelos baseados em considerações fenomenológicas⁽⁶⁾ ou empregando técnicas mais sofisticadas, tais como Redes Neurais Adaptativas⁽⁷⁾ e mais futuramente por Algoritmos Genéticos.

Foram pesquisados e utilizados dados adimensionais (razão entre o valor da variável e seu máximo) de aços carbono convencionais e microligados da Usiminas-Cubatão, que são materiais de formação estrutural similar. A análise foi feita sobre o comportamento e as tendências gerais entre a resistência mecânica e a ductilidade, como prevista na conhecida “curva da banana”, exemplificada na Figura 3.⁽⁸⁾

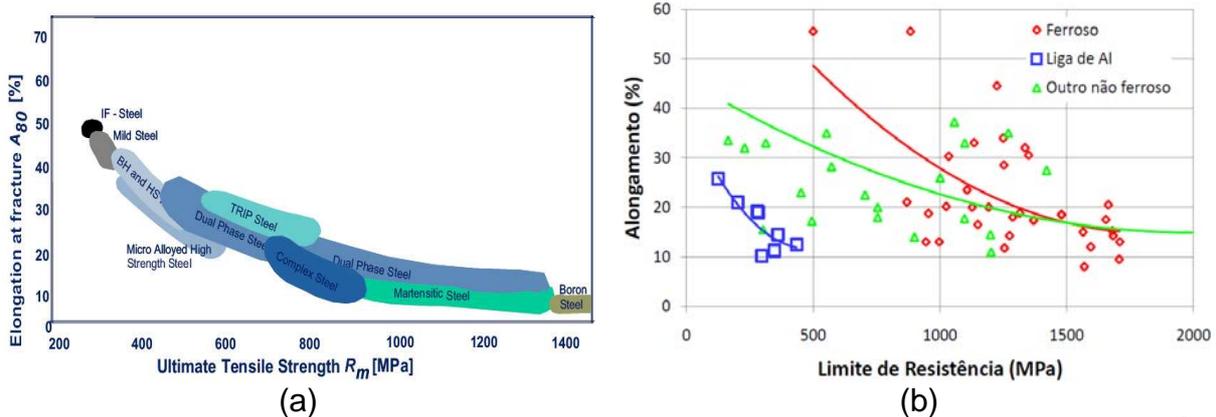


Figura 3 – Relação geral entre a ductilidade e resistência mecânica para: (a) vários tipos de aços⁽⁸⁾ e (b) comparando três diferentes categorias de metais.⁽⁹⁾

Sabe-se que a geometria do corpo de prova de tração influencia no resultado do alongamento. Por isso utilizou-se os valores de alongamento proporcional, que não possuem esta dependência e podem ser obtidos diretamente dos ensaios ou convertidos pela equação de Oliver (Eq.1), contida na ISO 2566:⁽¹⁰⁾

$$\text{Alongamento Proporcional} = \left(\frac{\text{Alongamento}_{L_0}}{2} \right) \times \left[\frac{\sqrt{\text{Área}_{CP}}}{L_0} \right]^{-0,4} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: Alongamento_{L_0} é o valor do alongamento medido em um CP com base de comparação L_0 ; Área_{CP} é o valor da área da seção reta do CP de tração utilizado para se medir o alongamento, L_0 é o valor da base de comparação.

A utilização desse parâmetro e da norma ISO 2566 já foi validada internamente na empresa e tem sido empregada em outros trabalhos, como no uso de RNA's.^(7,11)

Nas análises foram empregados dois tipos de correlações universais, cada qual melhor aplicável para uma faixa específica de características:

$$\text{Along.} = A \cdot (\text{LX})^{-B} \quad (\text{Eq.2})$$

$$\text{Along} = A \cdot e^{-B \cdot (\text{LX})} \quad (\text{Eq.3})$$

Onde: Along. é o valor do alongamento proporcional e LX significa ou o Limite de Escoamento (LE) ou o Limite de Resistência (LR) obtido nos ensaios de tração.

A Eq.2 é melhor aplicável para materiais mais dúcteis e a Eq. 3 ajusta melhor os dados de produtos mais resistentes. Os dados foram inicialmente gerados através da base de dados da empresa e foram analisados com o auxílio do *software* Origin 7.0: *Scientific Graphing and Data Analysis*®, produzido pela OriginLab.

Através de um modelo recentemente desenvolvido pela equipe da Superintendência da Garantia da Qualidade⁽¹¹⁾, foram feitas simulações para verificar o alinhamento dos resultados experimentais de resistência e ductilidade para materiais laminados a quente. Foram simuladas composições separadas em seis categorias de aços, conforme definidas em um trabalho anterior.⁽⁶⁾ Estas categorias estão listadas a seguir, em função do carbono equivalente (*International Institute of Welding* ou IIW) e da soma dos três principais elementos microligantes (Nb-Nióbio, V-Vanádio e Ti-Titânio);

- aços baixo carbono equivalente: $\text{Ce}_q \leq 0,20\%$ e $\Sigma(\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti}) \leq 0,020\%$;
- aços médio carbono equivalente: $0,20\% < \text{Ce}_q \leq 0,40\%$ e $\Sigma(\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti}) \leq 0,020\%$;
- aços alto carbono equivalente: $\text{Ce}_q > 0,40\%$ e $\Sigma(\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti}) \leq 0,020\%$;
- aços ligeiramente microligados: $\Sigma(\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti}) \leq 0,040\%$;
- aços moderadamente microligados $0,040\% < \Sigma(\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti}) \leq 0,10\%$; e
- aços com maior adição de elementos microligantes: $\Sigma(\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti}) > 0,10\%$.

3 RESULTADOS E DISCUSÃO

Os dados obtidos nesta pesquisa foram utilizados para realizar algumas análises e gerar equações de correlação matemáticas. Estas correlações permitem identificar tendências e faixas de propriedades típicas visando auxiliar na análise dos produtos da Usiminas-Cubatão.

Os gráficos da Figura 4 ilustram os resultados gerais de 26 mil resultados de tração obtidos ao longo do primeiro semestre de 2009 na Usiminas-Cubatão. Os ensaios de tração foram realizados para aprovação e liberação dos materiais testados conforme os requisitos das normas de especificação aplicáveis.

3.1 Tipos de Produtos

Inicialmente foram analisados os resultados obtidos para cada família de produtos da Usiminas-Cubatão. Devem-se levar em consideração os dois principais extremos de aplicações destes produtos: para conformabilidade (usualmente para laminados a frio) e visando alta resistência mecânica (desejada especialmente para chapas grossas laminadas a quente). O resultado mostrado na Figura 4 está detalhado agora por família de produtos na Figura 5. Pelos resultados das regressões obtidas pode-se perceber como a formação microestrutural dos aços nestas três linhas afeta o comportamento geral destes produtos.

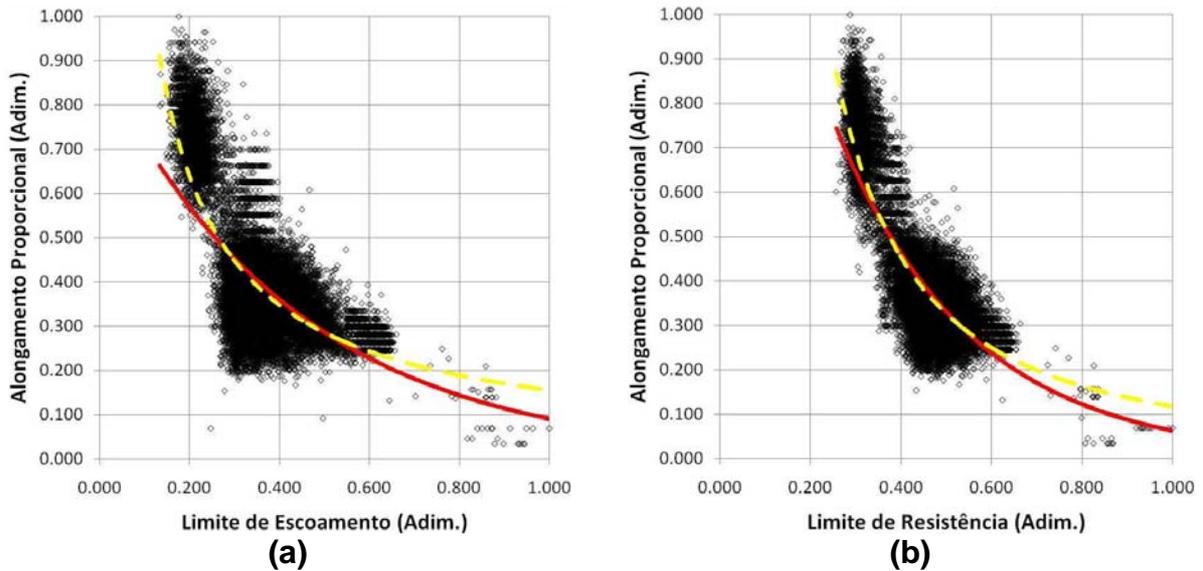


Figura 4 – Distribuição adimensional entre resistência e ductilidade de 26 mil amostras de aços planos (baixo/médio carbono e Alta Resistência Baixa Liga).

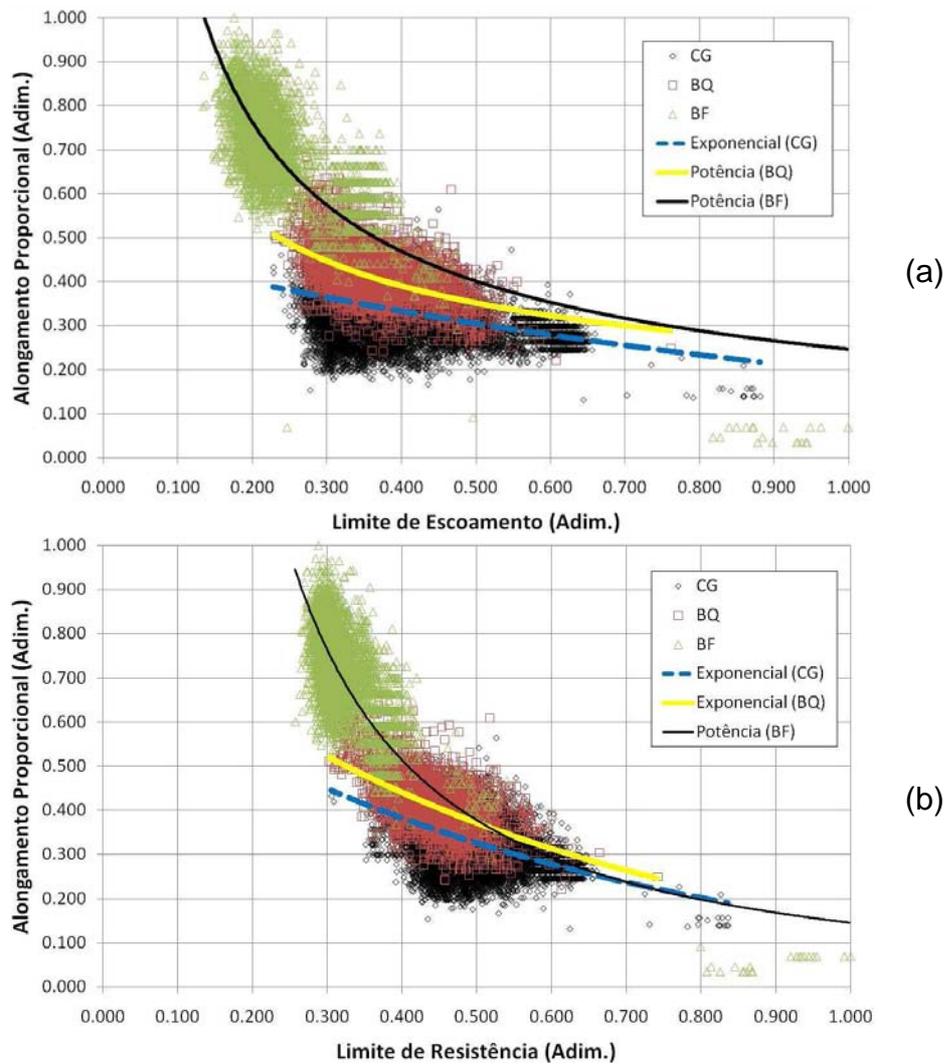


Figura 5. Distribuição adimensional entre resistência versus ductilidade ilustrando as diferenças entre as linhas de produtos.

Os gráficos da Figura 6 ilustram os resultados de resistência e ductilidade simulados por um modelo baseado em Redes Neurais (RNA's), desenvolvido pela equipe da Superintendência da Garantia da Qualidade.^(7,11) Os gráficos correlacionam os valores de resistência e ductilidade adimensionais obtidos a partir desta simulação: limite de escoamento versus ductilidade na Figura 6.a e limite de resistência versus ductilidade na Figura 6.b. Também estão apresentadas as regressões obtidas para os produtos laminados a quente (bobinas), conforme apresentadas nos gráficos da Figura 5.

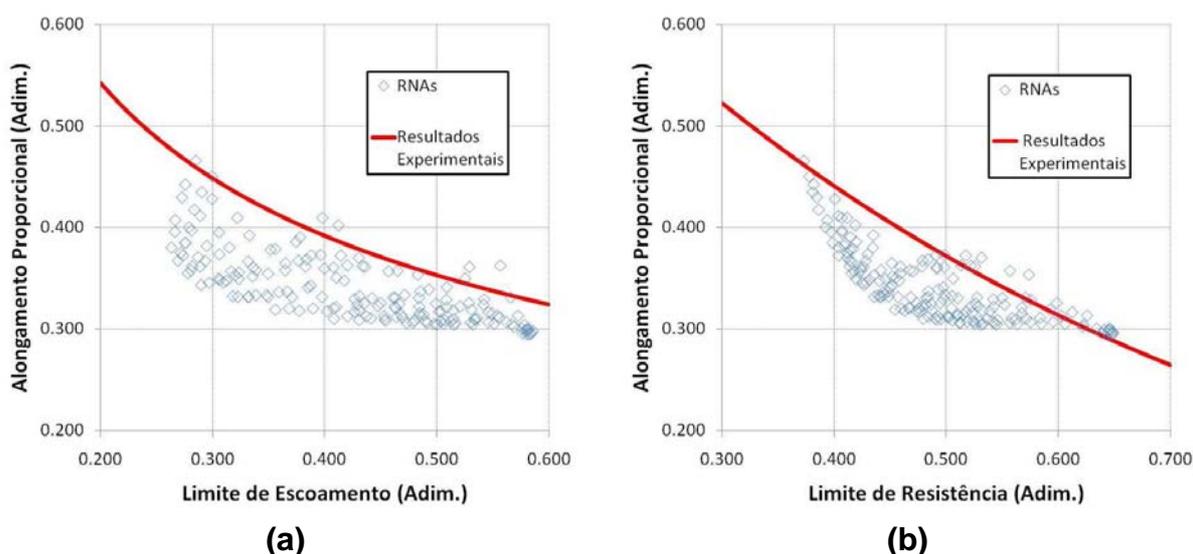


Figura 6 – Distribuição adimensional entre resistência versus ductilidade com dados simulados para aços laminados a quente conforme modelo baseado em RNA's.⁽⁷⁾ As curvas representam as regressões obtidas de dados industriais (Eq.2 e Eq. 3).

Nos gráficos da Figura 6, percebe-se uma menor dispersão dos dados, reflexo de uma maior pureza analítica do modelo. Porém, é perceptível que os resultados do modelamento são menores do que a curva de regressão média obtida a partir dos dados industriais. Este é um resultado interessante, pois o modelamento utilizado^(7,11) foi validado anteriormente pela comparação dos resultados de resistência e ductilidade de forma isolada e não em conjunto. Assim, por esta nova abordagem, conclui-se que o modelo gerado é conservativo em termos da combinação resistência e ductilidade abordada neste trabalho. Assim, abre-se a oportunidade de aperfeiçoar o modelo já existente através desta nova metodologia de análise.

3.2 Efeitos das Inclusões

Algumas características reconhecidamente influenciadoras da tenacidade dos materiais também foram estudadas. A Figura 7a ilustra a influência do elemento enxofre na distribuição dos valores de alongamento e limite de resistência. Neste caso, considerando um maior interesse em aços de alta resistência, foram utilizados apenas dados dos produtos com limite de escoamento superior à 300 MPa, o que leva a um mínimo de aproximadamente 0,40 para o LR adimensional.

A compensação da perda de ductilidade nos materiais de maior resistência mecânica pode ser feita através de um tratamento de controle de morfologia de inclusões. Nesta operação as inclusões normalmente alongadas são transformadas em inclusões esféricas ou globulizadas, que produz um resultado mostrado

genericamente no gráfico da Figura 7b. Neste gráfico está ilustrado o efeito do controle de morfologia sobre a relação resistência versus ductilidade dos aços estudados. Nota-se uma perceptível melhoria de desempenho quando o material tem controle de morfologia de inclusões, pela posição superior da curva de correlação. O detalhamento destas relações para cada categoria e produto de aço permite definir os reais limites esperados em aços similares aos analisados.

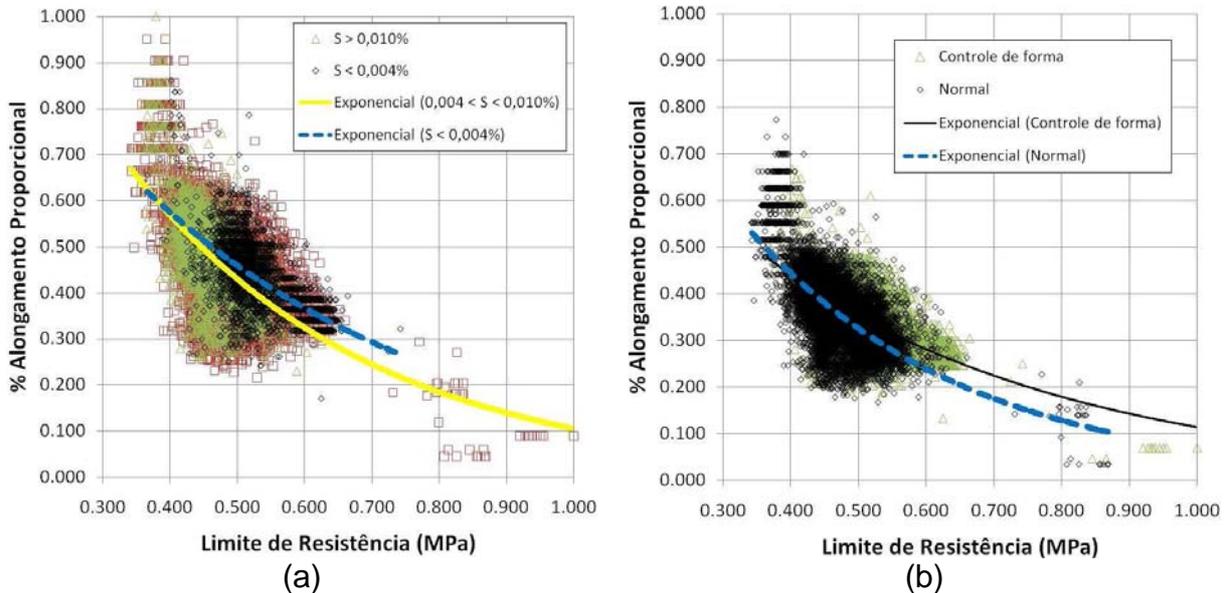


Figura 7 – Distribuição adimensional da resistência versus ductilidade ilustrando o efeito do conteúdo em enxofre (a) e do controle de morfologia de inclusões (b).

3.3 Tamanho de Grão

Em um trabalho anterior⁽⁶⁾ foi determinada a relação entre a espessura do produto e o tamanho de grão médio de aços tipicamente estruturais, de média resistência e não microligados, conforme ilustrado pelo gráfico da Figura 8. O modelo mostrado no gráfico é representado por uma equação polinomial simples (Eq.4), que calcula o tamanho de grão ferrítico (TGF, em μm) em função da espessura (em mm).

$$\text{TGF} = A + B \times \text{espessura} + C \times (\text{espessura})^2 \quad (\text{Eq.4})$$

Este modelo simples é diretamente aplicável para aços com mais de 4mm de espessura sendo que este é corrigido por outra equação para espessuras menores que esta, conforme apresentado no trabalho citado.⁽⁶⁾ Para exemplificar o tipo de análise que foi realizada, serão tomados apenas resultados de materiais com espessuras maiores do que 4mm. As características mecânicas destes aços foram analisadas em função do tamanho de grão ferrítico (TGF). Um resultado geral desta análise está mostrado na Figura 8. Pode-se notar que o TGF realmente influencia as características médias do material, porém de maneira muito dispersa.

Uma possível aplicação para este tipo de previsão está na análise de materiais nos quais o tamanho de grão seja importante mecanismo de endurecimento. Este é o caso de aços baixo carbono ligeiramente microligados ($\Sigma(\text{Nb}+\text{V}+\text{Ti}) \leq 0,040\%$). Com o modelamento atualmente empregando Redes Neurais Adaptativas,⁽¹¹⁾ esta linha de análise perdeu um pouco a importância, porém ainda pode ser utilizada em aplicações futuras como critério de comparação de desempenho.

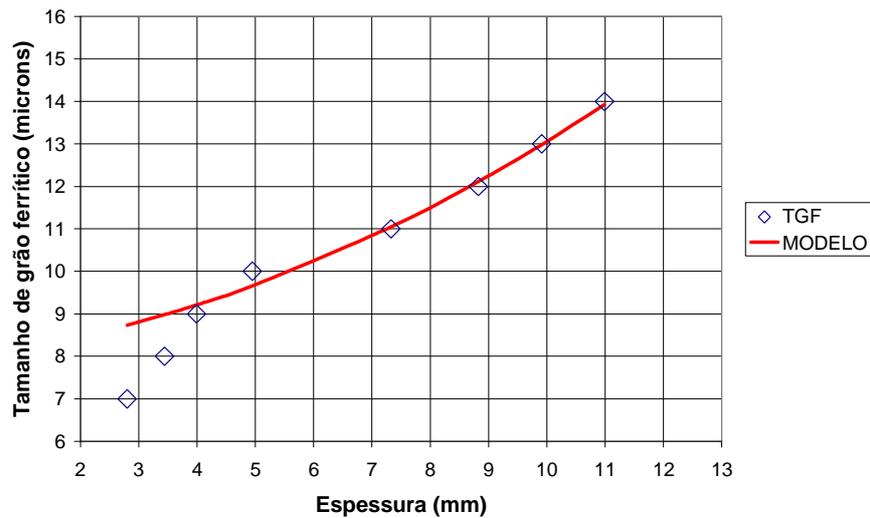


Figura 8 – Valores do tamanho de grão ferrítico médio (TGF) em função da espessura, obtido por Morais et.al.⁽⁶⁾ em modelamentos para aços estruturais comuns não microligados ($0,10 \leq C_{eq} \leq 0,40\%$ e $\Sigma(Nb+Ti+V) < 0,02\%$).

3.3 Correlações com a Tenacidade

A distância entre o par de dados resistência versus deformação da regressão foi comparado com os valores reais dos resultados obtidos em ensaios de impacto Charpy. Cada amostra testada em tração gera um parâmetro de resistência (LE e LR) e um parâmetro de ductilidade (alongamento, que é proporcional ou convertido segundo a ISO 2566⁽¹⁰⁾). Os dados foram divididos em 5 subgrupos de dados em relação à sua posição relativa ao longo de uma primeira regressão. Posteriormente foram tomadas quantidades iguais de dados em cada um dos subgrupos até obter uma nova regressão satisfatoriamente significativa dos dados reduzidos, cuja definição é feita por um fator de correlação (R^2) acima de 0,90.

A distância entre um par de dados resistência e ductilidade da regressão estabelecida por uma distribuição uniformemente distribuída destes valores forneceu um parâmetro de desempenho deste material, definido como T_W . A definição deste parâmetro foi baseada nas seguintes premissas:

- o material terá melhor desempenho quando:
 - maior for a resistência mecânica para um valor fixo de ductilidade ou
 - maior for a ductilidade para um determinado valor de resistência;
- da mesma forma, para um determinado nível de ductilidade, quando maior o nível de resistência, maior o desempenho do material;
- T_W recebe o valor do afastamento do ponto em relação à regressão; e
- T_W negativo equivale a um desempenho abaixo da média (pior) e valores positivos equivalem a um desempenho acima da média (melhor).

O gráfico da Figura 9a ilustra uma distribuição de valores obtidos de Energia Charpy (E_C) em função do teor de enxofre para várias temperaturas para uma categoria de produtos da Usiminas-Cubatão. Neste gráfico, está ilustrado um modelo logarítmico (do tipo $Y = A \cdot \ln(x) + B$) para o ajuste dos dados. Na Figura 9b está ilustrado a mesma relação, porém com os valores do parâmetro de desempenho do material T_W e uma regressão do tipo linear ($Y = A \cdot x + B$). Neste caso, é interessante notar como

se comporta os valores do parâmetro de desempenho T_W em relação aos valores de energia Charpy.

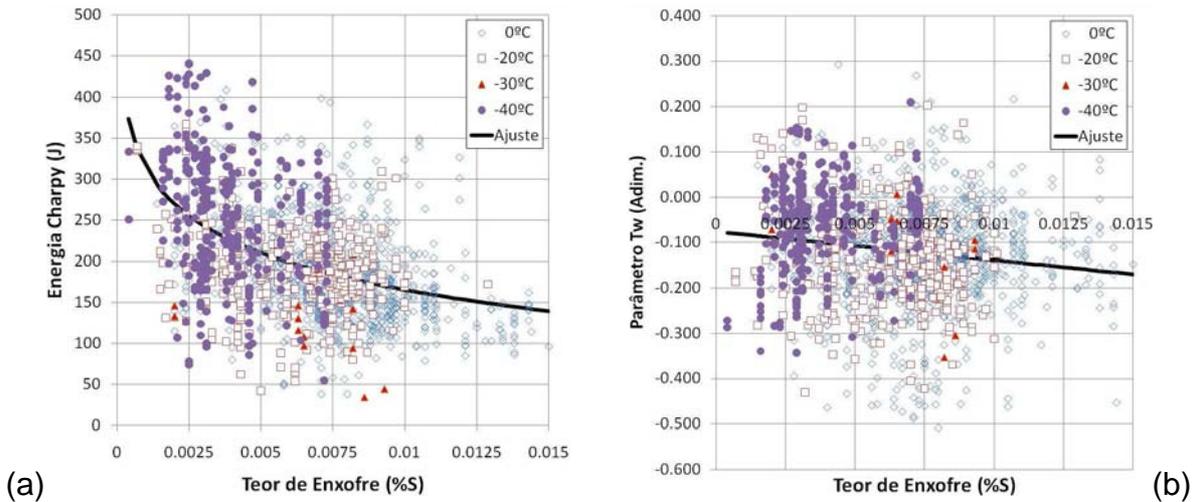


Figura 9 – Relação geral entre a energia Charpy e o parâmetro T_W em função do teor de enxofre das amostras analisadas.

A tenacidade é uma característica que depende de vários parâmetros e condições de processamento. Por isso, não é suficiente o uso direto dos dados de Charpy e da relação resistência versus ductilidade para descrever a tenacidade. Para isso, é necessário aplicar dois modelamentos em conjunto para obter uma melhor correlação entre os dados, como mostrado na Figura 10a, onde pode ser observado uma correlação mais nítida entre a Energia Charpy e o parâmetro T_W quando se usa o modelamento prévio dos dados de Charpy, como mostrado na curva da Figura 9a. Além disso, também é possível utilizar os valores de impacto Charpy para aproximar os resultados de tenacidade à fratura (K_{Ic} ou CTOD) conforme as seguintes equações:⁽¹²⁾

$$K_{Ic} = LE \times \sqrt{\left(\frac{0,646 \cdot E_c}{LE}\right) - 0,00635} \quad (\text{Eq.5})$$

$$G_{Ic} = \frac{(K_{Ic})^2}{E} \quad (\text{Eq.6})$$

$$CTOD = \frac{G_{Ic}}{(1 - \nu^2) \cdot LE} \times 1000 \quad (\text{Eq.7})$$

Onde: E_c (J) é a energia Charpy em CP's 10x10mm; LE (MPa) é o limite de escoamento; K_{Ic} (MPa·√m) é um parâmetro de tenacidade a fratura da Mecânica de Fratura Linear Elástica; E (MPa) é o módulo de rigidez; G_{Ic} (MJ/m²) é a energia associada à fratura e CTOD (mm) é a tenacidade a fratura definida para materiais de comportamento elasto-plástico.

O tipo de material estudado limita a utilização do parâmetro K_{Ic} , oriundo da Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE), devido à sua maior plasticidade. Daí emprega-se normalmente parâmetros da Mecânica de Fratura Elasto-Plástica (MFEP), dos quais se destaca o CTOD (*Crack Tip Open Displacement*) pelas suas aplicações práticas e crescentes na indústria do petróleo e gás. A Figura 10b ilustra a dependência geral entre os valores de CTOD e T_W . Apesar da dispersão, nota-se o potencial de uso

desta metodologia no uso deste parâmetro na seleção dos melhores tipos de aço e/ou rotas de produção.

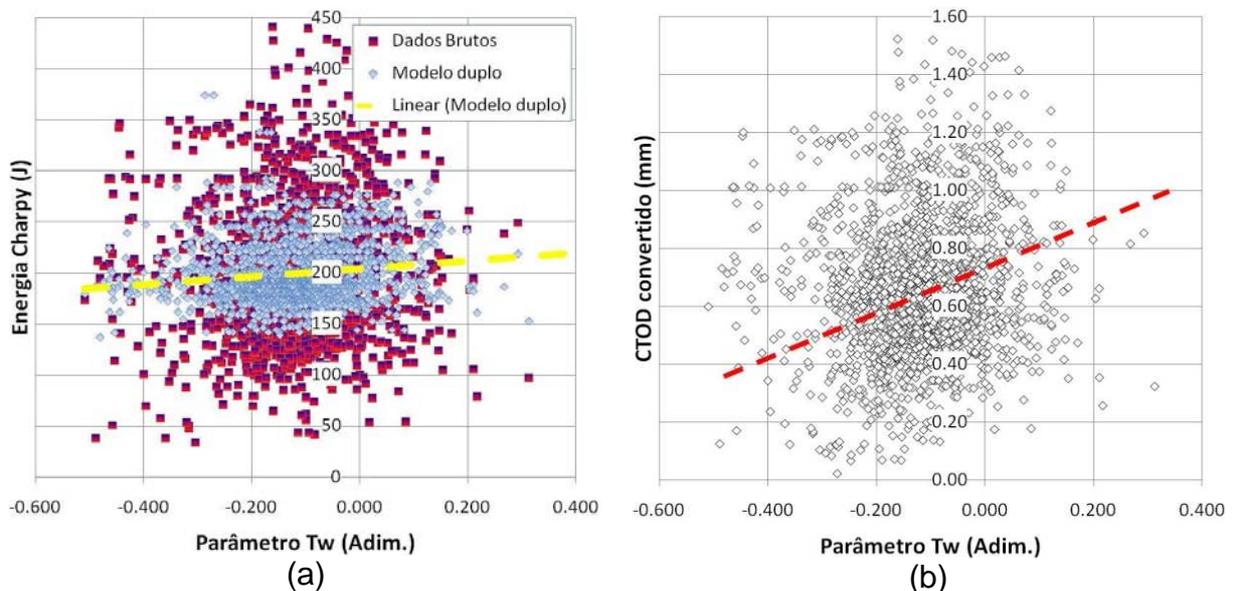


Figura 10 – Relação geral entre a energia Charpy e a tenacidade CTOD (convertida a partir dos valores de Charpy) e o parâmetro de desempenho T_w .

4 CONCLUSÕES

Com base nas análises feitas e nas regressões obtidas é possível oferecer algumas previsões no que diz respeito ao desempenho do material (aço) em uso. Por exemplo, tendo-se o nível de resistência necessário do material, é possível prever faixas de valores de alongamento em função do tipo de tratamento que pode ser realizado. Com base nestes valores, é possível, por exemplo, determinar se certo tipo de aço poderá ser produzido ou não e qual tipo de rota de processamento metalúrgico será necessária.

Este trabalho apresentou formas de análise nas propriedades de produtos planos de aço com o objetivo de conhecer melhor o material e realizar projetos e aplicações mais precisos e em menor tempo. Os resultados mostrados neste artigo ilustram como um trabalho mais profundo de análise de dados pode gerar informações necessárias para auxiliar no critério de julgamento da qualidade dos produtos da Usiminas-Cubatão. Também foi identificado que o uso desta metodologia de análise tem uma potencial aplicação no aperfeiçoamento de modelos de previsão de propriedades mecânicas, desenvolvidos e em uso na Superintendência de Garantia da Qualidade da Usiminas-Cubatão.

Os dados apresentados ilustram como as relações entre tensão e deformação, ou melhor, entre resistência mecânica e ductilidade podem ser influenciadas pelo tipo de material, produto e condições de fabricação deste produto.

REFERÊNCIAS

- 1 MAGNABOSCO, A.S.. Resistência Mecânica x Conformabilidade. In: MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S; NETTO, E.B.M.; Metalurgia física e mecânica aplicada. 2a Edição. São Paulo: ABM, 2009.
- 2 DAVIES, R.G. High Strength Steels in Automobiles. Automotive Steels Seminar, TSNIIVHM & CBMM (org.), Moscow, 1988.

- 3 PICKERING, F.B. High-Strength Low-alloy Structural Steels. In: _____. Physical Metallurgy and the Design of Steels. Great Yarmouth (UK): Applied Science Pub., 1983. cap. 4, p. 81-85.
- 4 MORAIS, W.A.; MELLO, R.M.; BORGES, H.C.; RET, L.C.P.; SILVA, M.R.S.; ALMEIDA FILHO, C.A. 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. São Paulo: ABM, 2003. p. 159-168.
- 5 ASHBY, M.F. Materials Selection in Mechanical Design. Exeter (UK): Pergamon Press, 1992.
- 6 MORAIS, W.A.; BORGES, H.C.; PEREZ, F.A. Modelamento e quantificação da relação propriedades x microestrutura nos aços estruturais laminados a quente da COSIPA. In: 62º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2007, Vitória. Anais... São Paulo: ABM, 2007. 1 CD.
- 7 BORGES, H.C.; MORAIS, W.A.; PLAUT, R.L. Predição de propriedades mecânicas em aços laminados a quente utilizando redes neurais adaptativas. In: 64º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2009, Belo Horizonte. Anais... São Paulo: ABM, 2009. 1 CD.
- 8 MILITITSKY, M.; Advanced Steel Products for Lightweighting at Daimlerchrysler. In: In: The International Symposium on Niobium Microalloyed Sheet Steels for Automotive Applications, 2005, Araxá. Proceedings, Araxá: CBMM, 2005. 1 CD.
- 9 MATWEB – Material Property Data. Disponível em <http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx> Acesso em: 11 nov. 2009.
- 10 ISO 2566/1: Steels – Conversion of elongation values – Part 1: Carbon and low alloy steels. International Organization for Standardization, 1984.
- 11 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: 64º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2009, Belo Horizonte. Anais... São Paulo: ABM, 2009. 1 CD.
- 12 LANCASTER, J. Handbook of Structural Welding, Processes, materials and methods used in the welding of major structures, pipelines and process plants. Abington, Cambridge(UK): Noyes Data Corporation/Noyes Publications, 1997.