

ANÁLISE NUMÉRICO-ESTATÍSTICA DA TENACIDADE DE AÇOS PLANOS: EMPREGO DE CONCEITO DA MECÂNICA DE FRATURA E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL¹

Willy Ank de Moraes²
 Herbert Christian Borges³

Resumo

A tenacidade dos materiais em geral, inclusive dos aços, está relacionada a uma boa capacidade de deformação plástica (ductilidade) e alta resistência mecânica, simultaneamente. Com o intuito de estudar a tenacidade dos aços estimada através de ensaios de impacto Charpy e permitir criar critérios matemáticos para fazer previsões de controle de qualidade em produtos, foram analisados dados reais obtidos no laboratório de ensaios mecânicos da Usiminas-Cubatão. Foram verificadas relações entre estas variáveis e sua influência nos valores da tenacidade quantificada por valores de energia Charpy e K_{IC} estimados por equações empíricas. As análises foram feitas através de ferramentas de inteligência computacional, representadas pelas Redes Neurais Adaptativas (RNAs) com otimização via Algoritmos Genéticos (AGs).

Palavras-chave: Aços planos; Tenacidade; Redes neurais; Algoritmos genéticos.

NUMERICAL STATISTICAL ANALYSIS OF FLAT STEEL TOUGHNESS: USE OF FRACTURE MECHANICS AND COMPUTATIONAL INTELLIGENCE CONCEPTS

Abstract

Fracture toughness of materials, including steels, is proportional to both high plastic deformation capacity (ductility) and mechanical strength. Aiming to study steel toughness estimated by impact energy Charpy tests and allows creating mathematics criteria to do previsions for product quality control, was analyzed real data obtained from mechanical tests at Usiminas-Cubatão. The relationship between the studied parameters was verified and quantified as well as the influence of those on Charpy energy and K_{IC} fracture toughness estimated by empiric equations. The analysis was done by computational intelligence tools, represented by Adaptive Neural Networks (ANNs) optimized by Genetic Algorithms (GAs).

Key-words: Flat steel; Toughness; Neural network; Genetic algorithms.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Doutorando, MSc., Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia. Engenheiro de Produto Sênior da Usiminas-Cubatão, Prof. 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.

³ Mestrando, Eng^o Metalurgista, Engenheiro do Produto Pleno. E-mail: herbert.borges@usiminas.com

1 INTRODUÇÃO

O grande desafio da Metalurgia Física é obter o controle simultâneo da microestrutura e da textura cristalina finais de uma determinada liga metálica. Estas duas características são responsáveis pela sua conformabilidade, propriedades eletromagnéticas, de condução de calor, 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 principalmente pela tenacidade que lhe são exigidas.⁽¹⁾

A forma mais simples de se obter um metal de maior resistência mecânica é reduzindo a movimentação das suas discordâncias, que é o principal fenômeno responsável pela deformação plástica dos metais⁽¹⁾. Assim, quando a resistência mecânica é aumentada ocorre uma natural tendência da redução na capacidade de deformação plástica ou ductilidade do metal. Podem ser empregados mecanismos especiais de controle microestrutural para se minimizar os efeitos da perda de ductilidade associada com o aumento da resistência mecânica. Dentre estes mecanismos ou práticas são empregados, por exemplo: dispersão de precipitados finos, refino de grão, diminuição ou controle da forma das inclusões.^(2,3)

Esta restrição implica diretamente no controle e obtenção de diferentes níveis de tenacidade já que esta propriedade depende, simultaneamente, da resistência mecânica e da ductilidade.^(1,3) A tenacidade é uma propriedade vital para a maioria das aplicações dos materiais de engenharia, garantindo a confiabilidade das estruturas e equipamentos. Porém como esta propriedade depende de características reconhecidamente incompatíveis, ela se torna de vital importância para a evolução tecnológica dos materiais.

A forma tradicional de quantificar a tenacidade é através da medição da resposta mecânica de um material, ou seja, da obtida deformação (ϵ) em função da tensão (σ) aplicada, quando um corpo de prova (CP), adequado para a medição da tenacidade, é solicitado mecanicamente em condições que tentam induzir a fragilidade. Os testes são realizados nestas condições, pois é objetivado testar o material em situações piores do que as encontradas na prática. Assim o desempenho final do material pode ser avaliado conservadoramente. Resumidamente, existem três grupos de condições adversas (fragilizantes) que têm sido empregadas nestes ensaios:

- temperaturas (T) mais baixas (as mais comuns: -20°C , -40°C , -60°C);
- taxas de carregamento ($\dot{\epsilon}$) elevadas ($\dot{\epsilon} > 1\text{s}^{-1}$) e
- triaxialidade do estado de tensões, produzida pela introdução de entalhes e trincas de fadiga nos CPs.

Os materiais de maior tenacidade apresentam uma maior região plástica associada ao campo de tensões induzido pelo entalhe ou pela trinca de fadiga nos CPs, mesmo em temperaturas mais baixas e quando solicitados em maiores taxas de carregamento.⁽⁴⁾ Existem vários métodos desenvolvidos ao longo do século 20 para quantificar a tenacidade. Alguns destes métodos de teste são mais simples e qualitativos, como os ensaios de impacto DWTT (*Drop-Weight Tear Test*), Izod e Charpy, que já existem a aproximadamente um século.⁽⁵⁾ Atualmente, a tenacidade à fratura, conceito definido genericamente como a resistência à extensão de uma trinca,⁽⁴⁾ é quantificada através de ensaios mais elaborados e descritivos que medem, por exemplo: a intensidade de tensões crítica (K_{IC}); a abertura da ponta da trinca (CTOD – *Crack Tip Open Displacement*) ou a energia máxima absorvida pela zona plástica induzida pela trinca (integral J).

Apesar do ensaio Charpy existir desde 1905⁽⁵⁾ e de ser considerado, a tempo, apenas um método de medição relativa da tenacidade,⁽⁶⁾ ainda assim é um ensaio largamente empregado na indústria⁽⁷⁾. Isso ocorre devido à relativa simplicidade na sua execução, conforme regulamentado pelas normas ASTM A370,⁽⁸⁾ ISO 148⁽⁹⁾ e NBR 6157⁽¹⁰⁾ e ao grande histórico de dados disponíveis. Valores mínimos de energia Charpy são solicitados para inúmeras aplicações, conforme normas técnicas vigentes, tais como: tubos de grande diâmetro para gasodutos,⁽¹¹⁾ longarinas de caminhões⁽¹²⁾ e aços para construção naval.⁽¹³⁾

A Figura 1 ilustra o aspecto dimensional e a geometria de carregamento de um corpo de prova (CP) Charpy. Durante o ensaio, mede-se a energia necessária à fratura de CPs com as dimensões 10x10x55mm (Figura 1.a). Corpos de Prova de espessuras menores, ditos *subsize*, podem ser utilizados quando são retiradas amostras de chapas mais finas. Neste caso, é comum a correção dos valores de energia obtidos, multiplicando-se esses valores pela constante $10/e$, onde e é a espessura do CP *subsize* utilizado (2,5; 3,3; 5,0; 6,7 ou 7,5mm). A Figura 2 exemplifica a resposta mecânica obtida de um CP, como o esquematizado na Figura 1.b, registrada durante um ensaio Charpy instrumentado.^(5,14)

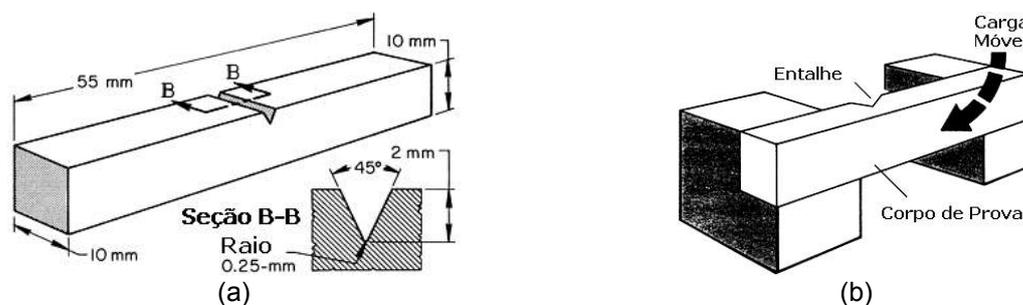


Figura 1. (a) Dimensões de um CP padrão para ensaio Charpy e (b) forma de fixação e carregamento.⁽⁵⁾

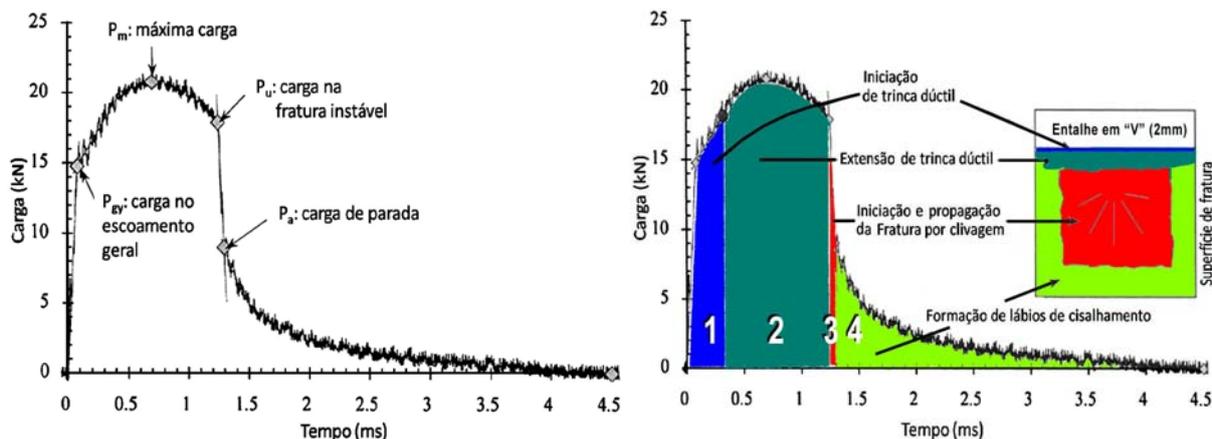


Figura 2. Resultado obtido (Força versus tempo) a partir de ensaios de impacto Charpy instrumentados para um aço estrutural⁽¹⁴⁾ e associação das regiões da curva Força versus tempo com as zonas de fratura do respectivo CP Charpy.⁽⁵⁾

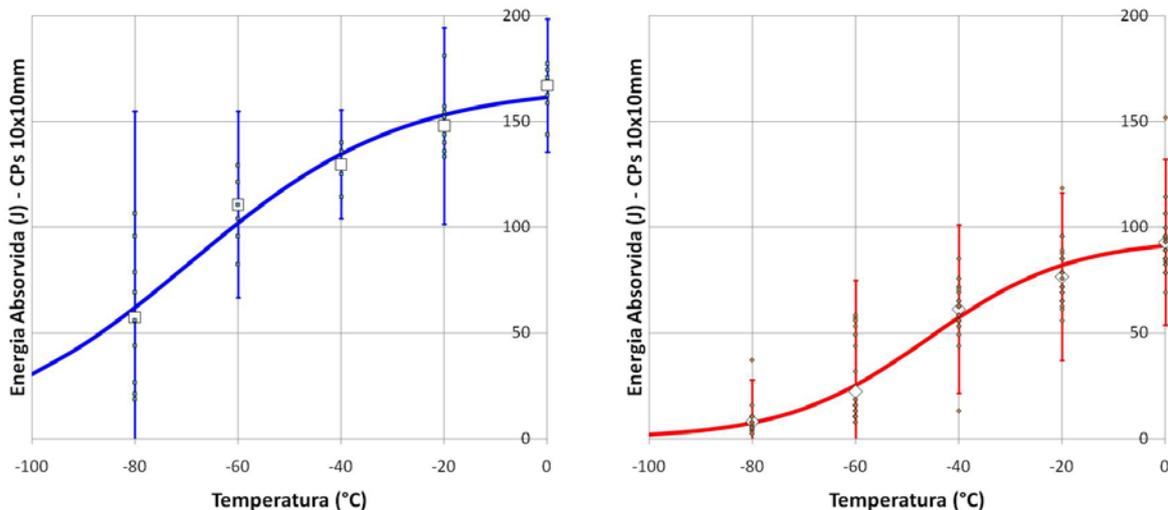
Uma característica que é avaliada com os ensaios de impacto Charpy é a transição dúctil-frágil, fenômeno que ocorre especialmente nos materiais de estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC), como o aço. É grande o interesse na determinação das temperaturas acima das quais o material pode ser utilizado, em certas aplicações, com um mínimo de resistência à fratura^(3,4,11,13). Neste sentido, dependendo do tipo de material e da temperatura de teste, pode-se obter:

- valores de energia mais elevados, quando o ensaio é realizado acima da faixa de temperaturas correspondente à região de transição dúctil-frágil;
- valores intermediários obtidos dentro da região de transição a qual pode ser mais suave ou abrupta com a temperatura, e
- valores muito baixos, perto de zero, quando solicitados em temperaturas abaixo da região de transição.

Existem algumas equações que modelam a transição dúctil-frágil, uma destas, do tipo Boltzman, vêm sendo utilizada pelo Controle Integrado da Usiminas-Cubatão:

$$E = \left[\frac{(E_{Máx} - E_{Mín})}{1 + e^{(T_0 - T)/d_T}} \right] + E_{Mín}. \quad (\text{Eq.1})$$

Onde: **E** é a energia Charpy (J) para CPs 10x10mm; **T** é a temperatura (°C); **E_{Máx}** e **E_{Mín}** são os respectivos valores de energia máxima e mínima na faixa do modelamento (J); **T₀** é a temperatura de inflexão da curva (°C) e **1/d_T** é um parâmetro adimensional da taxa de inflexão (mudança) nos valores de energia. A Figura 3 ilustra resultados reais que foram analisados conforme a Eq.1.



$$E_{Máx} = 167\text{J} / T_0 = -69^\circ\text{C} / 1/d_T = 0,045$$

$$E_{Máx} = 95\text{J} / T_0 = -46^\circ\text{C} / 1/d_T = 0,072$$

Figura 3. Exemplo de uso da Eq.1 na análise da transição dúctil-frágil a partir de resultados de impacto Charpy em aços baixa liga alta resistência. Em ambos os casos por definição, a energia mínima foi considerada igual a zero ($E_{Mín} = 0$).

Devido ao grande emprego do ensaio Charpy⁽⁷⁾, surgiram várias tentativas de se correlacionar os valores de energia, obtidos com os resultados de medição de tenacidade à fratura, especialmente K_{IC} . As Equações de (2) a (7) são exemplos de equações disponíveis na literatura⁽⁵⁾ que visam fazer essa correlação:

$$K_{IC} = LE \times \sqrt{0,646 \cdot \left(\frac{E_C}{LE} - 0,01 \right)} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$K_{IC} = LE \times \sqrt{\left[0,177 \cdot \left(\frac{E_C}{LE}\right)\right] - 0,0011} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$K_{IC} = 0,390 \times \sqrt{E \cdot (E_C)^{1,5}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$K_{IC} = 0,842 \times \sqrt{E \cdot (E_C)} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$K_{IC} = 19 \times \sqrt{E_C} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$K_{IC} = 0,625 \times \sqrt{LE \times E_C} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde: E_C é a Energia Charpy (J); LE é o Limite de Escoamento (MPa); E é o módulo de rigidez (GPa) e K_{IC} é a tenacidade à fratura ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$).

As duas primeiras equações (Eqs. 2 e 3) modelam valores obtidos no patamar superior da curva de transição dúctil-frágil equivalente a temperaturas acima de T_0 , segundo a Eq.1. As demais equações (Eqs. 4 a 7) fazem a conversão de valores de energia Charpy obtidos na região de transição, em temperaturas próximas à T_0 . Estas equações visam transformar as diferentes parcelas das áreas mostradas no gráfico da Figura 2 (regiões 1, 2, 3 e 4) na respectiva energia (ou concentração de tensão ou abertura crítica) necessária para a propagação de uma trinca, energia esta que está diretamente correlacionada com o conceito da tenacidade à fratura.

Incentivaram o desenvolvimento deste trabalho: a disponibilidade de dados de energia obtidos de ensaios de impacto Charpy; a necessidade crescente da indústria no desenvolvimento ou adequação de materiais com garantias de energia Charpy mais restritivos;⁽¹¹⁻¹³⁾ e a eminente necessidade de caracterizar e garantir valores de tenacidade à fratura.⁽⁴⁾ Assim, milhares de conjuntos de propriedades de aços produzidos na Usiminas-Cubatão foram analisados para verificar as correlações mais relevantes entre as variáveis de especificação com os resultados obtidos de energia Charpy. A avaliação destes resultados foi feita com o auxílio de ferramentas de inteligência computacional baseadas em Redes Neurais Adaptativas (RNAs) otimizadas através de Algoritmos Genéticos (AGs).

As Redes Neurais Adaptativas (RNAs) são eficientes na resolução de problemas de difícil solução pela computação convencional. Ao contrário dos modelos computacionais comumente utilizados, em que um programa precisa ser escrito para resolver um dado problema, as RNAs aprendem a resolver diversos problemas através da sua interação com o meio externo. Após um treinamento, utilizando um conjunto representativo de dados já obtidos, as Redes Neurais se adaptam e passam a ser capazes de reconhecer padrões.^(15,16) Assim, esta ferramenta tem sido utilizada em diversas aplicações e em vários campos, inclusive na indústria e extensivamente na siderurgia.⁽¹⁷⁾

Neste trabalho, um modelo por RNAs mais preciso foi gerado pelo uso de algoritmos genéticos (AGs). Os AGs são utilizados na ciência da computação para achar soluções em problemas de otimização e busca. Estes são uma classe particular de algoritmos auto evolutivos que usam técnicas inspiradas pela evolução biológica natural, tais como: hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação.⁽¹⁸⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Usiminas-Cubatão possui uma imensa quantidade de dados obtidos em ensaios mecânicos e de análise química, realizados para a liberação de seus produtos. Os resultados destes ensaios são pesquisados e analisados diariamente pela equipe do Controle Integrado por meios de inúmeras ferramentas de análise, inclusive RNAs e AGs. Os dados empregados neste estudo já foram utilizados em outro trabalho recente,⁽³⁾ porém no caso deste trabalho os dados serão restritos somente aos materiais espessos, chapas ou bobinas grossas laminadas a quente, dos quais é possível obter CPs para testes em ensaios de impacto Charpy e em espessuras preferencialmente iguais ou próximas à espessura padrão de 10 mm.

Inúmeras variáveis de composição química, propriedades mecânicas e características de produção foram empregadas para alimentar o modelamento e verificar a influência dessas variáveis na formação dos valores de resistência à fratura. Neste trabalho serão apresentados apenas os resultados da influência da análise da composição química e das propriedades obtidas em tração, visando ilustrar a técnica utilizada. A Tabela 1 lista as faixas de composições analisadas neste trabalho. Características de processamento, tais como tipo de refino secundário, forma de lingotamento, esquema de passes de laminação a quente e pós tratamentos também foram analisados neste modelamento, mas não serão abordados nesta contribuição técnica.

Tabela 1. Faixas de alguns elementos químicos dos aços analisados neste trabalho

Elemento	%C	%Mn	%Si	%S	%Nb	%Ti	%V	%Ca
Mínimo	0,05	0,50	0,20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000
Máximo	0,20	1,80	0,40	0,015	0,070	0,040	0,070	0,0060

Os valores de energia Charpy (em J), para CPs 10x10mm, foram utilizados na sua forma convencional, mas também após convertidos para K_{IC} (em $\text{Mpa}\cdot\sqrt{\text{m}}$), conforme as equações apresentadas neste trabalho (Eq. 2 a 7). Neste caso, o objetivo foi verificar se o uso dos valores convertidos para K_{IC} realmente agregou mais informação aos valores a serem modelados e se essa operação realmente facilitou o trabalho de análise pelas Redes Neurais, acelerou a otimização realizada pelos Algoritmos Genéticos e melhorou a precisão dos resultados obtidos.

A Tabela 2 apresenta as faixas das propriedades mecânicas, obtidas em tração e em ensaios de impacto Charpy, empregadas neste modelamento. Como os dados de Charpy obtidos para liberação de produtos são oriundos de materiais projetados para se comportarem na região superior da transição, então as melhores equações de ajuste foram as equações 2 e 3. As demais equações (4 a 7) não ofereceram dados representativos que poderiam ser utilizados no modelamento proposto.

Tabela 2. Faixas de propriedades mecânicas empregadas no modelamento

Faixas	Propriedades obtidas por ensaios de tração			Propriedades relacionadas à tenacidade	
	LE (MPa)	LR (MPa)	%Along. Prop. ^(*)	Energia Charpy (J)	K_{IC} ($\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$) – Eq.2
Mín.:	250	300	10	50	100
Máx.:	700	1000	70	400	300

(*) – Medidas diretamente na base proporcional ou convertidas pela ISO 2566.⁽¹⁹⁾

Utilizou-se o *software Neurosolutions 5.0*[®] produzido pela *NeuroDimension Inc.*⁽²⁰⁾ para análise dos dados através da arquitetura *Multilayer Perceptron*, montada com 26 entradas, 14 nodos na primeira camada intermediária, 7 na segunda camada intermediária e 3 saídas desejadas (26-14-7-3), como representado na Figura 4. Os primeiros testes de construção das RNAs otimizadas pelos AGs foram feitas em microcomputadores comuns, porém o modelamento final foi realizado com microcomputador um pouco mais sofisticado, equipado com processador de quadro núcleos (*Quad Core*) para melhorar o desempenho final durante o processamento. Como os resultados na análise de K_{IC} , utilizando as Equações 2 e 3, foram muito similares, já que as equações 2 e 3 também são muito parecidas, optou-se por utilizar somente os resultados relativos aos valores de K_{IC} obtidos pela equação 2, devida à Rolfe e Novak.^(5,21) Utilizando a arquitetura ilustrada pela Figura 4, foram analisados mais de 5500 dados de ensaios Charpy obtidos de materiais descritos pelos seus respectivos parâmetros de produção, composição química e propriedades mecânicas obtidas por ensaios de tração.

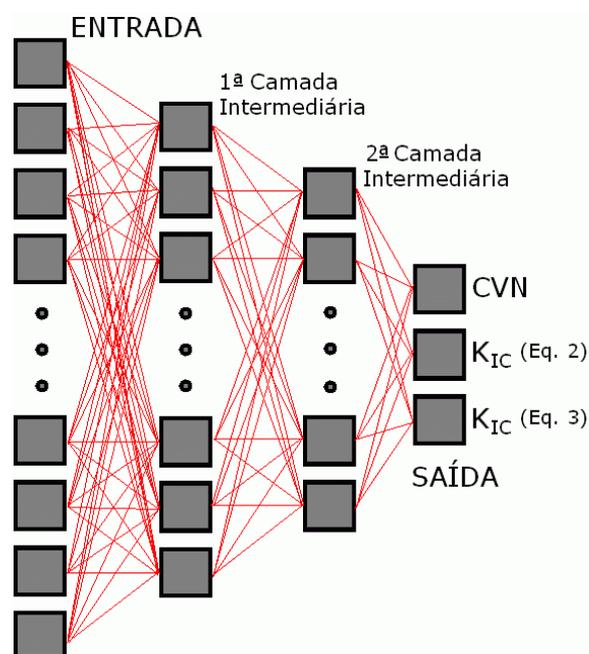


Figura 4. Arquitetura (26-14-7-3) das Redes Neurais Artificiais utilizada na análise de 5.500 conjuntos de dados de composição química, parâmetros de produção e propriedades mecânicas.

3 RESULTADOS

Como primeiro resultado, a Figura 5 ilustra a relação entre cerca de 1100 dados de energia Charpy e K_{IC} reais com os respectivos valores que foram simulados após o treino da rede. Deve-se salientar que os valores do coeficiente de determinação (R^2) demonstram a aproximação dos dados em relação à curva de ajuste perfeito mostrada nos gráficos. Esta é uma forma de representação dos resultados normalmente utilizada neste tipo de estudo.^(15,16)

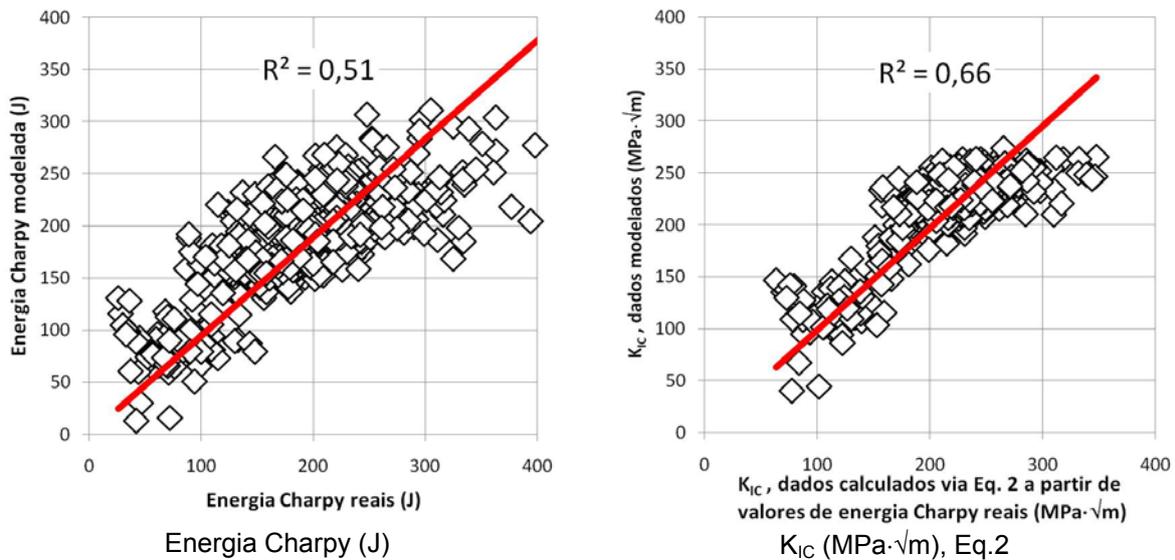


Figura 5. Correlação entre os valores de tenacidade reais e modelados.

Em todas as simulações feitas obteve-se uma correlação 15% melhor com os valores de K_{IC} estimados pela Eq.2 do que com os valores de energia Charpy. A comparação do desempenho foi feita conforme quantificada pelo coeficiente de determinação (R^2), obtido em variadas simulações com diferentes estruturas de Redes Neurais (quantidade de camadas ocultas e número de nodos) e as formas de otimização por Algoritmos Genéticos (quantidade de cromossomos e gerações). Uma das grandes vantagens no uso deste tipo de modelamento é a possibilidade de gerar uma análise de sensibilidade das variáveis de entrada com os resultados de saída. Na análise de sensibilidade, a RNA mostra quais as variáveis de entrada têm maior influência sobre as saídas, atribuindo um “peso” às variáveis. A Figura 6 mostra o resultado desta análise na avaliação do efeito das variáveis empregadas nos resultados da tenacidade Charpy e K_{IC} . Neste caso, foram analisados os resultados dos parâmetros de processamento, composição química e propriedades mecânicas obtidas a partir de ensaios de tração sobre os resultados de tenacidade. O gráfico da Figura 6 ilustra os resultados obtidos em função das variáveis de saída.

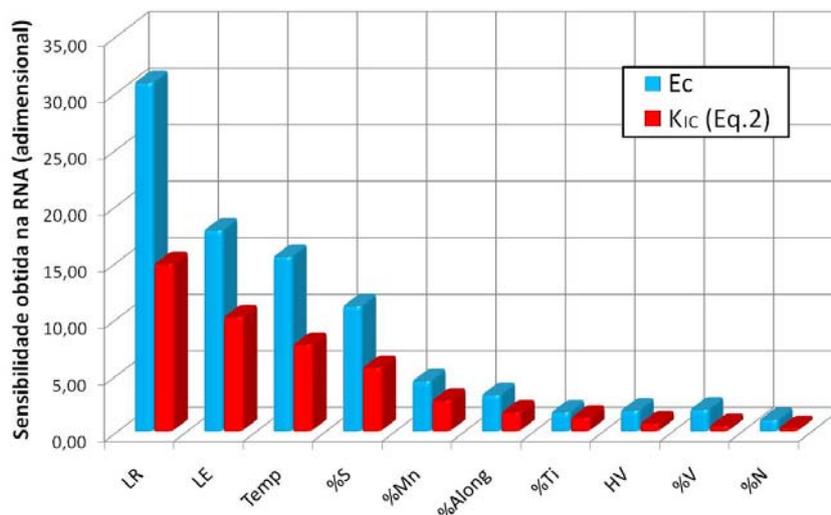


Figura 6. Análise de sensibilidade realizada nas variáveis utilizadas a partir dos dados de treinamento da RNA.

4 DISCUSSÃO

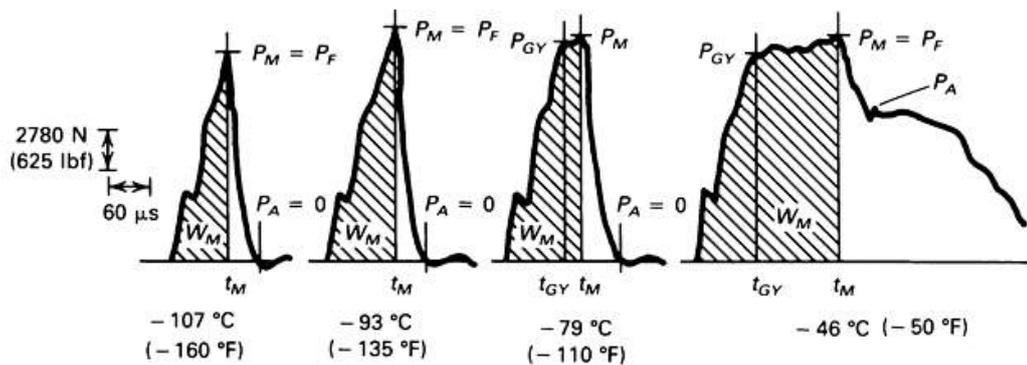
Os resultados obtidos nos ensaios que estimam a tenacidade (no caso, Charpy) não são necessariamente proporcionais àqueles que a quantificam (no caso, K_{IC}). Isto pode ocorrer, pois a condição da sollicitação mecânica empregada nos ensaios Charpy é diferente da utilizada nos ensaios padrão de K_{IC} já que:

- A taxa de carregamento empregada nos ensaios de Charpy é maior do que nos ensaios de K_{IC} . O tempo total de carregamento é de aproximadamente 5×10^{-3} s para o Charpy e 5×10^1 s nos demais, o que implica em uma grande diferença na taxa de carregamento ($\dot{\epsilon} > 1 \text{ s}^{-1}$ para 10^{-3} s^{-1}).
- O volume deformado na ponta do entalhe dos corpos de prova Charpy tende a ser maior do que as regiões equivalentes na ponta da trinca nos ensaios de K_{IC} .⁽²²⁾

A diferença no volume deformado faz com que os resultados obtidos nos ensaios Charpy sejam pouco dependentes de condições microestruturais, como o espaçamento de precipitados que podem estar presentes na estrutura do metal. Este tipo de cenário gera situações onde amostras que ofereçam valores de energia Charpy mais elevados apresentem, contrariamente, valores mais baixos do que os obtidos por um método de quantificação da tenacidade à fratura, como o de K_{IC} , por exemplo. No caso em particular das taxas de deformação mais elevadas, também existem equações que correlacionam a Charpy com o parâmetro K_{Id} , tenacidade à fratura em carregamentos dinâmicos.^(4,5)

Por outro lado, variáveis que estão mais correlacionadas com a deformação plástica do material também são mais relevantes nos resultados de energia Charpy. Acredita-se que isto ocorra porque valores elevados de energia Charpy são correlacionados com a maior plasticidade do CP, representada pelas áreas 1, 2 e 4 mostradas na Figura 2 e cuja evolução com a temperatura está ilustrada na Figura 7. Nesta Figura, pode-se observar como a região dúctil está diretamente relacionada com os valores de energia Charpy e como esta ductilidade é importante para esta característica. Assim, dentre os parâmetros de maior influência na tenacidade estão o teor de enxofre nos aços, a temperatura de ensaio e a relação elástica. Este resultado é previsível, já que:

- A relação entre os valores do Limite de escoamento (LE) e do Limite de Resistência (LR) está correlacionada com a capacidade de deformação plástica.⁽¹⁾ Quanto menores forem os valores de relação elástica (LE/LR), maior tenderá ser a capacidade de deformação plástica do metal.
- A presença de enxofre nos aços formam inclusões que prejudicam a conformabilidade e resistência à fratura, exigindo-se que estas possam ser estabilizadas, para minimizar seus efeitos por meio de tratamentos de globulização de inclusões.⁽²⁾
- A temperatura de teste é fator primordial para a resposta mecânica do material. Quanto menor a temperatura, também menor será a capacidade de movimentação das discordâncias e de outros defeitos responsáveis pela deformação plástica dos metais e, conseqüentemente, na parcela na formação da tenacidade.



P_M - carga máxima	t_M - tempo para carga máxima
P_{GY} - carga de escoamento geral	t_{GY} - tempo para escoamento geral
P_F - carga de fratura rápida	W_M - energia absorvida até a carga máxima
P_A - carga de retardo dúctil da trinca após propagação rápida	

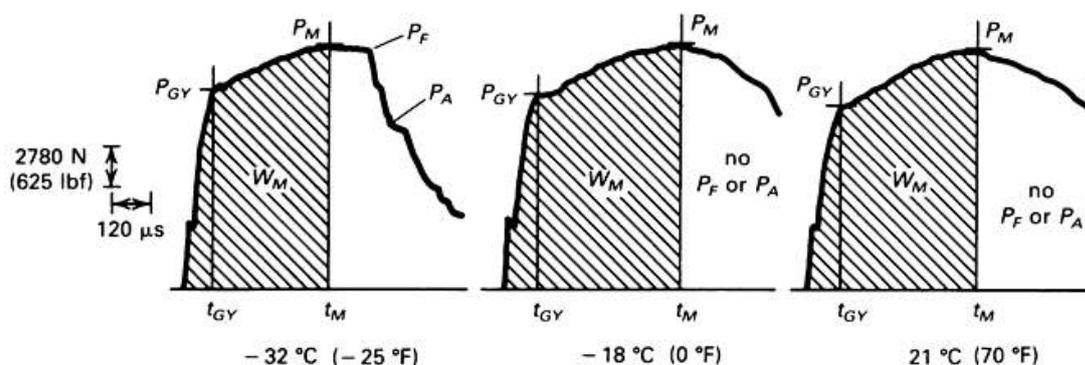


Figura 7. Resultados obtidos a partir de ensaios de impacto Charpy instrumentados para um aço estrutural.

A dispersão dos resultados obtidos, conforme quantificado pelos valores do coeficiente de determinação; $R^2=0,66$; foi ligeiramente menor do que a obtida em trabalhos anteriores.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ Isso pode ser atribuído à natural limitação na determinação de resultados de ductilidade, traduzidos pelos valores do alongamento. Esta dificuldade foi verificada em vários trabalhos e foi apresentada pelos autores em um trabalho recente,⁽²³⁾ no qual os valores de R^2 foram aproximadamente 0,74; enquanto que para a resistência foram obtidos um R^2 de 0,97. Como a tenacidade é, na realidade, uma combinação de resistência mecânica e ductilidade, acredita-se que a limitação na obtenção de valores mais precisos para a previsão da tenacidade está vinculada a uma maior precisão nos valores modelados de ductilidade.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises feitas e nas regressões obtidas, é possível oferecer algumas previsões e diretrizes no que diz respeito ao projeto de materiais de maior tenacidade. Internamente, na Usiminas-Cubatão, os dados apresentados ilustram como as relações entre os parâmetros de produção e, principalmente, as propriedades mecânicas e composição química na tenacidade do material, estimada por ensaios de impacto Charpy.

Os resultados demonstram que há uma natural dispersão nos resultados obtidos, em parte esperada pela natural dificuldade no modelamento dos valores de ductilidade (alongamento), conforme visto em trabalhos anteriores.^(15,16,23) Outra característica



importante é a grande dependência dos valores de energia Charpy com a capacidade de deformação plástica do material a nível macroscópico, traduzida pela importância relativa da relação elástica (LE/LR). Medições de tenacidade à fratura são mais sensíveis às condições microestruturais dos materiais⁽²²⁾ e, portanto, diferem da energia Charpy nesta questão e refletem uma relação mais complexa com as propriedades do material.

A adoção da conversão dos valores de energia Charpy para valores de tenacidade à fratura K_{IC} foi relevante para o modelamento, melhorando o desempenho obtido e sendo recomendável para o seu aprimoramento.

REFERÊNCIAS

- 1 MAGNABOSCO, A.S.; Resistência Mecânica × Conformabilidade. Módulo 5, Cap.3 p. 481-500. In: MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S; NETTO, E.B.M.; **Metalurgia física e mecânica aplicada**. 2^a Edição. São Paulo: ABM, 2009.
- 2 Davies, R.G. **High Strength Steels in Automobiles**. Automotive Steels Seminar, TSNIIVHM & CBMM (org.), Moscow, 1988.
- 3 MORAIS, W.A.; **Análise das relações entre as características dos aços e sua tenacidade**. 65^o Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, jul. 2010.
- 4 GODEFROID, L.. **Fracture mechanics: applications and challenges**. In: Conferencia de Laminación, 18, 2010, Santa Fé - Argentina. Conferencia sobre usos del acero, 5. Jornada de Analisis de falha y prevención. Jornada de Soldadura, p.574-592. Buenos Aires: IAS, 2010.
- 5 Fracture Toughness and Fracture Mechanics. **ASM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation**. ASM International. Materials Park, v.8, p. 1270-1570, 2000.
- 6 KASAMATSU, Y.; MATSUOKA, M.. A consideration of the usefulness of charpy V - notch test in evaluating brittle fracture initiation characteristics. In: **Kobelco Technical Bulletin**, n.1024, p.1-6. 1981.
- 7 MÜLLER, K.; PUSCH, G.. Use of Charpy impact testing to evaluate crack arrest fracture toughness. In: FRANÇOIS, D.; PINEAU, A. **Charpy to present impact testing**. Elsevier Science Ltd. p. 263-270, 2002.
- 8 ASTM. ASTM A 370. **Test methods and definitions for mechanical testing of steel products**. ASTM International. 2010.
- 9 ISO. ISO 148-1. **Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 1: Test method**. International Organization for Standardization. 2009.
- 10 ABNT. NBR 6157. **Materiais metálicos - Determinação da resistência ao impacto em corpos-de-prova entalhados simplesmente apoiados**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1980.
- 11 Specification for Line Pipe, **API Specification 5L**. American Petroleum Institute (API), 44th edition, March, 2007.
- 12 ABNT. NBR 6656. **Chapas e bobinas de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2008.
- 13 BV. NR 216. **Rules on materials and welding for the classification of marine units**. Bureau Veritas. 2011.
- 14 QUINAN, M.A.D., **Análise de ensaio instrumentado de impacto tipo charpy**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.
- 15 BORGES, H.C.; **Predição de propriedades mecânicas em aços laminados a quente utilizando redes neurais adaptativas**. 2008. 91 f Monografia (MBA em Siderurgia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.



- 16 TAKASHI, H.J.; RABELO, G.B.C.; TEIXEIRA, R.A. **Predição de propriedades mecânicas de aços de alta resistência microligados utilizando técnicas de inteligência computacional.** In: Seminário de Automação de Processos, 11., 2007, Porto Alegre. Anais... São Paulo: ABM, 2007. 1 CD.
- 17 BIELSKIS, C.T et. AL.; **Aplicação industrial das redes neurais adaptativas: laminação a frio de chapas.** In: ABM. Seminário de Laminação, 44, 2007, Campos do Jordão. Anais... São Paulo: Tec Art Editora Ltda., 2007. 1 CD.
- 18 MITCHELL, M.; **An Introduction to Genetic Algorithms.** 3rd Printing. Cambridge: The MIT Press. 1998.
- 19 ISO. ISO 2566/1: **Steels – Conversion of elongation values – Part 1: Carbon and low alloy steels,** International Organization for Standardization. 1984.
- 20 NeuroDimension, Inc. NeuroSolutions - Premier Neural Network Development Environment. <<http://www.neurosolutions.com>>. Acesso em: 19 fev. 2009.
- 21 S.T. Rolfe and S.R. Novak, **Slow-Bend K_{1c} Testing of Medium-Strength High-Toughness Steels, Review of Developments in Plane-Strain Fracture Toughness Testing,** ASTM: STP 463, p 124–159. 1970.
- 22 Fracture and Structure. **ASM Handbook: Fatigue and Fracture.** ASM International. Materials Park, v.19, p. 13-36, 1996.
- 23 MORAIS, W.A.; BORGES, H.C.; **Uso de inteligência computacional no desenvolvimento, adequação e controle de qualidade de aços laminados a quente na Usiminas-Cubatão. Tecnologia em Metalurgia e Materiais,** v. 6, n. 4, p. 230-236, abr.-jun. 2010.