

APLICAÇÃO PRÁTICA DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NO DESENVOLVIMENTO E ADEQUAÇÃO DE AÇOS LAMINADOS A QUENTE NA USIMINAS CUBATÃO ¹

Willy Ank de Moraes ²
Herbert Christian Borges ³
Ronald Lesley Plaut ⁴

Resumo

A Assistência Técnica e o Controle Integrado da USIMINAS Cubatão têm estudado e analisado as características microestruturais e mecânicas dos aços que a empresa produz e criado modelos fenomenológicos para descrever suas propriedades. Recentemente, foi incorporada uma importante ferramenta: as Redes Neurais Adaptativas (RNA's). Este trabalho apresenta como as RNA's estão melhorando as atividades de desenvolvimento, adequação e aplicação de produtos laminados a quente. A composição química, temperaturas de laminação, dimensão do produto final e posição de amostragem são os parâmetros utilizados na análise das RNA's, o que torna possível selecionar de forma efetiva e prática, e não apenas teoricamente, as melhores combinações destes parâmetros para obter um produto mais adequado. **Palavras-chave:** Laminados a quente; Redes neurais; Propriedades mecânicas; Modelamento.

PRACTICAL APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN DEVELOPMENT AND ADAPTATION OF HOT ROLLED STEEL AT USIMINAS CUBATÃO ⁽¹⁾

Abstract

The Technical Assistance and Integrated Control Division have been study and analyzed microstructural and mechanical characteristics from steel products of USIMINAS Cubatão in order to create phenomenological models to describe their properties. Recently, Artificial Neural Networks (ANN's) became an important tool to aid these studies. This work show how ANN's are improving development, adaptation e application activities for hot mill products. ANN's analyze chemical composition, mill temperatures, strip dimensions e sampling position that make possible to obtain a more suitable product, not only theoretical, but effective and practical.

Key words: Hot rolled; Neural network; Mechanical properties; Modeling.

¹ *Contribuição técnica ao 64° Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Doutorando, MSc., Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia, Analista da Cosipa/Sistema UsiminaS, Professor da Faculdade de Engenharia da UNISANTA e Vice-Diretor da divisão técnica "Aplicações de Materiais" da ABM. E-mail: willyank@unisanta.br ou willy.morais@usiminas.com.*

³ *Mestrando em Eng^a Metalúrgica, Eng^o Metalurgista. Analista de Assistência Técnica da Cosipa/Sistema Usiminas. E-mail: herbert.borges@usiminas.com.*

⁴ *Doutor, Mestre e Engenheiro Metalurgista. Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: rplaut@usp.br.*

1 INTRODUÇÃO

A previsão das propriedades mecânicas dos aços é uma possibilidade muito atraente, tanto para produtores quanto para os usuários deste material. Neste sentido, diversos modelos de previsão das propriedades mecânicas dos aços têm sido apresentados na literatura ao longo do tempo:⁽¹⁻⁴⁾ alguns mais gerais e outros mais específicos. Em sua revisão, Pickering⁽⁵⁾ resume estes tipos de modelos conforme a equação:

$$\sigma_{ys} = \sigma_i + \sigma_s + \sigma_p + \sigma_d + \sigma_{ss} + \sigma_t + k_y d^{-1/2} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde os valores de cada σ consideram o efeito de um mecanismo na composição do limite de escoamento (σ_{ys}): **i** tensão de oposição à movimentação de discordâncias; **s** endurecimento por solução sólida; **p** endurecimento por precipitação; **d** endurecimento pela geração de discordâncias; **ss** é a interação entre as discordâncias, **t** é a textura cristalográfica e **d** o tamanho de grão. Cada efeito pode ser considerado de uma forma diferente e por um modelo em particular.

Na Usiminas Cubatão, ao longo do tempo, têm sido gerados dados a partir de atividades de análise e caracterização de produtos laminados a quente fabricados na Usina, resultando em uma melhor compreensão das características destes materiais⁽⁶⁻⁹⁾ de uma maneira geral e visando:

- compreender melhor a microestrutura presente e a influência do processo de fabricação na sua obtenção;
- analisar mais detalhadamente as características mecânicas obtidas nestes materiais;
- avaliar modelos matemáticos que tem potencial uso na descrição da relação entre (micro)estrutura e propriedades; e
- implementar e utilizar modelos na prática da análise de produtos.

Assim, estes resultados têm sido utilizados, conjuntamente com dados de desempenho registrados nos bancos de dados da empresa, para realizar desenvolvimentos e adequações de produtos,⁽⁷⁾ intensificados nestes últimos anos especialmente para aços para tubos API, usados na indústria petrolífera.^(8,9)

A análise destes dados permitiu desenvolver modelos fenomenológicos para descrição de aços estruturais não microligados que têm sido utilizados na prática industrial.^(10,11) Porém, existe uma limitação na aplicabilidade destes modelos para materiais microligados ao titânio, ao vanádio e, principalmente, ao nióbio. Nestes aços, é utilizado o mecanismo de endurecimento por precipitação e há uma intensificação do mecanismo por refino de grão,⁽¹²⁾ que não são previstos nos modelos desenvolvidos anteriormente.^(10,11)

Em trabalhos recentes,^(13,14) buscou-se desenvolver uma metodologia para aplicação de Redes Neurais Adaptativas (RNA's) para a predição de Limite de Escoamento (LE) e Limite de Resistência (LR) para aços carbono, laminados a quente, microligados e não microligados, partindo de informações básicas como: composição química, esquema de resfriamento, espessura e temperaturas de laminação. Valores de alongamento e de propriedades de chapas oriundas de bobinas não foram contemplados nestes trabalhos, porém estes assuntos foram objeto em um estudo feito em paralelo e os primeiros resultados estão descritos no presente trabalho.

Graças a estes modelos, é possível selecionar, não só teoricamente, mas de forma efetiva e prática, as melhores combinações dos parâmetros de especificação de produto para obter um aço mais adequado para as aplicações finais a serem atendidas por este material.

O presente trabalho ilustra exemplos de casos de aplicação prática das RNA's na análise de produtos oriundos da Usiminas Cubatão e diretamente em trabalhos de Assistência Técnica a clientes, especialmente nos setores automotivo, rodoviário e para indústria do petróleo e gás.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A empresa possui uma imensa quantidade de dados, obtida em ensaios de análise química e de propriedades mecânicas, realizados para a liberação dos aços produzidos pela empresa.⁽¹¹⁾ Estes dados permitem realizar análises estatísticas, visando verificar as faixas de valores de propriedades mecânicas obtidas para circunstâncias conhecidas de produção, conforme exemplificado pela Figura 1a. Sabe-se que estas variáveis estão correlacionadas conforme apresentado pela Figura 1b.⁽¹⁵⁾ Neste caso, utilizando o valor médio, o desvio padrão, o número de variáveis e um modelo de distribuição estatística adequado, é possível prever as faixas de propriedades mecânicas prováveis para um produto fabricado nas condições analisadas e utilizá-las em projeto, visando o melhor desempenho em uma determinada aplicação final.

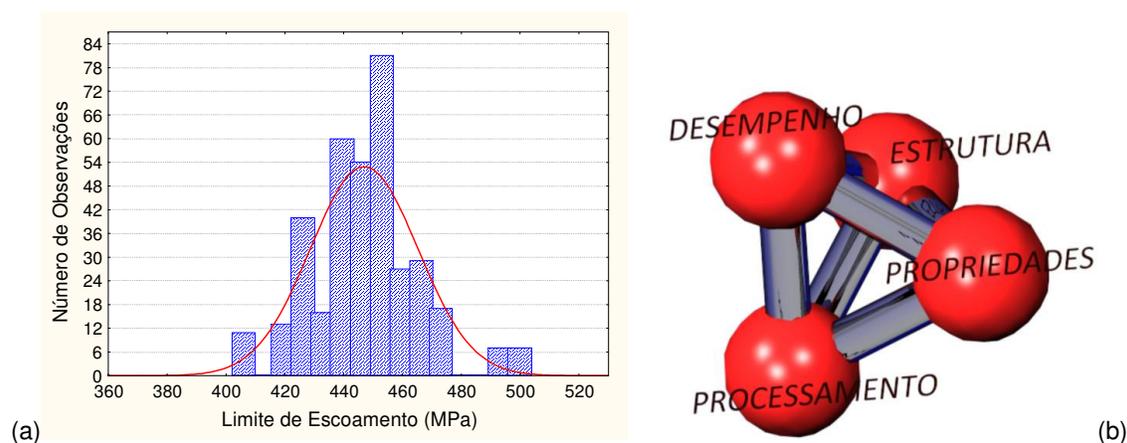


Figura 1 – (a) Exemplo de uma distribuição dos valores de Limite de Escoamento para uma qualidade de aço produzida conforme um determinado conjunto de condições de processamento ($C_{pk}=1,5$). (b) Relação genérica entre estrutura-propriedades-processamento-desempenho.⁽¹⁵⁾

Com o tempo, as informações disponíveis nos bancos de dados da empresa foram correlacionadas com resultados de ensaios de caracterização, realizados nos laboratórios especializados da Usina de Cubatão, conforme ilustrado na Figura 2. Estes ensaios foram executados sob várias circunstâncias,⁽⁶⁻¹⁰⁾ porém todos visaram descrever melhor as características metalúrgicas dos produtos da Usina e ampliar a compreensão da relação entre a estrutura do aço e suas propriedades mecânicas, conforme ilustrado pela Figura 1b. Com a integração das informações dos bancos de dados e dos ensaios de caracterização foi possível o desenvolvimento de modelos atualmente utilizados na análise e projeto de produtos laminados a quente (bobinas e chapas oriundas de bobinas).^(10,11,13,14)



Figura 2 – Exemplificação das atividades de caracterização de materiais empregadas para a constituição dos modelos fenomenológicos^(10,11) e por redes neurais,^(13,14) utilizados para a análise de produtos na Cosipa.

Estes modelos basicamente descrevem e prevêem os principais parâmetros estruturais do material (LE e LR). Existe uma maior dificuldade de analisar e efetivamente modelar os valores de alongamento, que é um importante parâmetro e que está diretamente relacionado à ductilidade dos materiais. Neste trabalho, assim com em outros,^(14,16) os valores de alongamento foram analisados pelas RNA's, porém com uma precisão obtida menor do que aquela obtida para o LE e LR.

Para reduzir a dispersão dos modelos, foi adotado o alongamento proporcional, pois se sabe que o alongamento aparente é um parâmetro que depende das dimensões do corpo de prova (CP) e da base de medida (L_0), utilizada como medida de referência para quantificar o alongamento.⁽¹⁷⁾ O alongamento proporcional é medido em CP's de seção reta proporcional e desta forma torna-se independente das dimensões do material ou do L_0 . O alongamento obtido a partir de um CP de dimensões não proporcionais, por outro lado, é tanto maior quanto: maior for a área da seção do corpo de prova de tração e menor o valor de L_0 .

Nem todos os ensaios de tração são executados de forma a obter diretamente o alongamento proporcional. Felizmente, este parâmetro pode ser obtido a partir dos valores de alongamento normais e vice-versa, que podem ser convertidos através da fórmula devida a Oliver e citada na norma ISO 2566/1:⁽¹⁷⁾

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

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 Tabela 1 ilustra um exemplo de aplicação da Eq.2 em uma situação real na qual dois materiais de espessuras diferentes testados em tração, com CP's de tamanhos diferentes e apresentando alongamentos diferentes, têm a mesma ductilidade, conforme traduzida pelo alongamento proporcional. Esta correspondência pela aplicação da Eq.2 já foi verificada pelos autores em testes comparativos feitos na Usiminas Cubatão.

Tabela 1 – Exemplo de variação nos valores de alongamento com base nas dimensões do corpo de prova de tração conforme a ISO 2566/1.⁽¹⁷⁾

| Espessura (mm) | Largura (mm) | L ₀ (mm) | Alongamento aparente | Alongamento proporcional |
|----------------|----------------|---------------------|----------------------|--------------------------|
| 9,50 | 38,1 (1 ½ pol) | 50,8 (2 pol) | 45% | 33% |
| 2,00 | 20 | 80 | 24% | 33% |

Conforme apresentado em outro trabalho,⁽¹⁴⁾ utilizou-se o *software Neurosolutions 5.0*[®] produzido pela NeuroDimension Inc.⁽¹⁸⁾ para analisar e interpretar dados industriais através de redes *Multilayer Perceptron*, montadas em uma arquitetura com 14 entradas, 7 nodos na primeira e segunda camadas intermediárias e 3 saídas desejadas.⁽¹³⁾ Os gráficos da Figura 3 ilustram os diferentes desempenhos neste modelamento para o limite de escoamento (LE) e para o alongamento proporcional. Este modelo tem sido utilizado em diversas aplicações, ilustradas no próximo item.

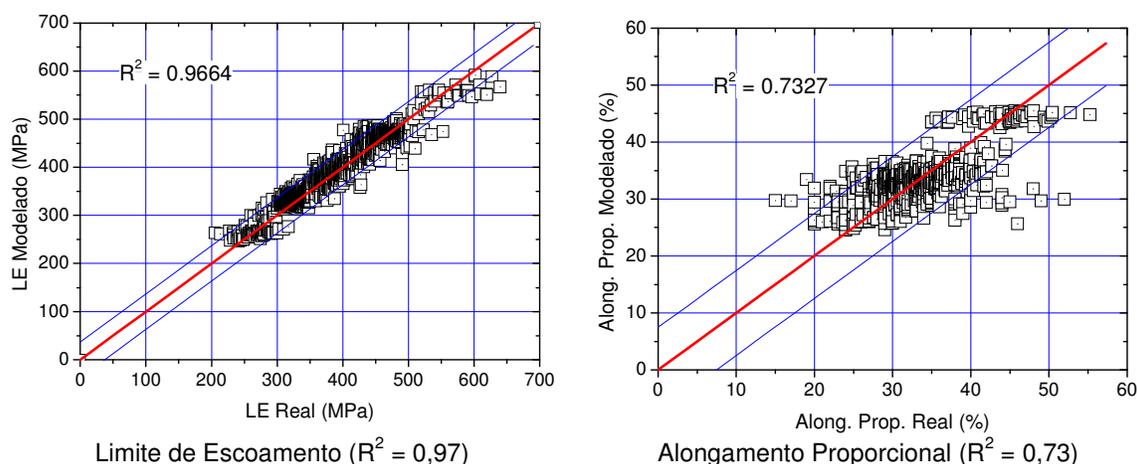


Figura 3 – Correlação entre os valores de propriedades mecânicas reais e modeladas pelo modelo de RNA's desenvolvido.^(13,14) Está ilustrado o coeficiente de correlação para a melhor situação de modelamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

É possível utilizar os modelos que foram desenvolvidos, especialmente os baseados em RNA's, tanto em análises internas cotidianas na empresa, quanto em desenvolvimentos ou adequações de produtos para clientes visando:

- testar faixas de parâmetros de produção no desenvolvimento e/ou adequação de produtos, ao se prever as propriedades a serem obtidas nestes casos; e
- fazer o controle de qualidade dos produtos, ao verificar se as propriedades obtidas são aquelas esperadas para o conjunto de parâmetros empregados.

As grandes demandas nestes últimos anos têm se concentrado nos setores da indústria petroquímica⁽¹⁹⁾ e automobilística/autopeças/rodoviária.⁽²⁰⁾ Nos itens a seguir serão ilustrados alguns casos representativos de uso das RNA's.

3.1 Petróleo e Gás

A produção de aços para tubos API, utilizado globalmente na indústria petroquímica, é uma atividade desafiadora,^(8,19) pois tanto a norma para dutos de condução (API 5L), quanto para dutos de produção (API 5CT), traz requisitos sobre as características mecânicas dos tubos. Neste caso, o processo de fabricação dos tubos com costura altera as características das chapas de aço que as constituem, de acordo com as condições da própria chapa e do tubo a ser produzido.⁽⁸⁻¹⁰⁾ Adicionalmente, os dutos de condução são constituídos por tubos de 12m de comprimento (em média), que são unidos por solda. Daí, a composição química destes tubos deve ser bem controlada e homogênea, especialmente considerando-se que os dutos podem ter dezenas, centenas ou milhares de quilômetros de comprimento.⁽⁸⁾ Ademais, os tubos podem sofrer um processo de dobramento a frio ou a quente, para ajustar o duto ao relevo do terreno no qual será instalado, dificultando o controle sobre suas propriedades mecânicas.⁽²¹⁾

O uso das RNA's permite uma análise mais precisa e segura das propriedades que podem ser esperadas a partir de um determinado projeto de liga. Recentemente, uma produção de bobinas de 9,5 mm de espessura para tubos API 5L X70 PSL2 foi baseada neste modelamento. Neste caso, o modelo permitiu otimizar a adição de ligas e as propriedades mecânicas obtidas nas bobinas. Desta forma foi possível oferecer informações prévias ao cliente quanto ao desempenho do material a ser produzido e melhor assegurar o seu desempenho neste uso final.

Para ilustrar a eficácia das RNA's, os parâmetros efetivamente utilizados para produzir as bobinas foram carregados no modelo e foram calculados o LE, o LR, a Relação Elástica (LE/LR) e o Alongamento Proporcional. A comparação dos valores destas propriedades calculadas pelas RNA's com os obtidos nos ensaios de tração do material efetivamente produzido está mostrada na Figura 4. Os erros observados quando se compara os valores de LE e LR previstos pelo modelo e os valores medidos foram de 2,4% e 2,5%, respectivamente (equivalentes a 14 MPa para o LE e 17 MPa para o LR). Porém, como era de se esperar, o erro para o alongamento foi comparativamente maior: 16% (equivalente a 5% no alongamento proporcional).

3.2 Autopeças

O mercado de autopeças é muito dinâmico⁽²⁰⁾ e requer grande adaptabilidade de sua principal matéria-prima, o aço. Conforme a percepção dos autores,⁽²²⁾ alguns dos requisitos técnicos que este setor exige atualmente são:

- flexibilidade - maior abrangência de aplicações para os aços empregados;
- economia - redução de peso pela substituição de materiais de menor resistência por outros de maior resistência e com menor espessura; e
- qualidade - superfície com menor número de defeitos, chapas sem tensionamento, facilidade de conformação.

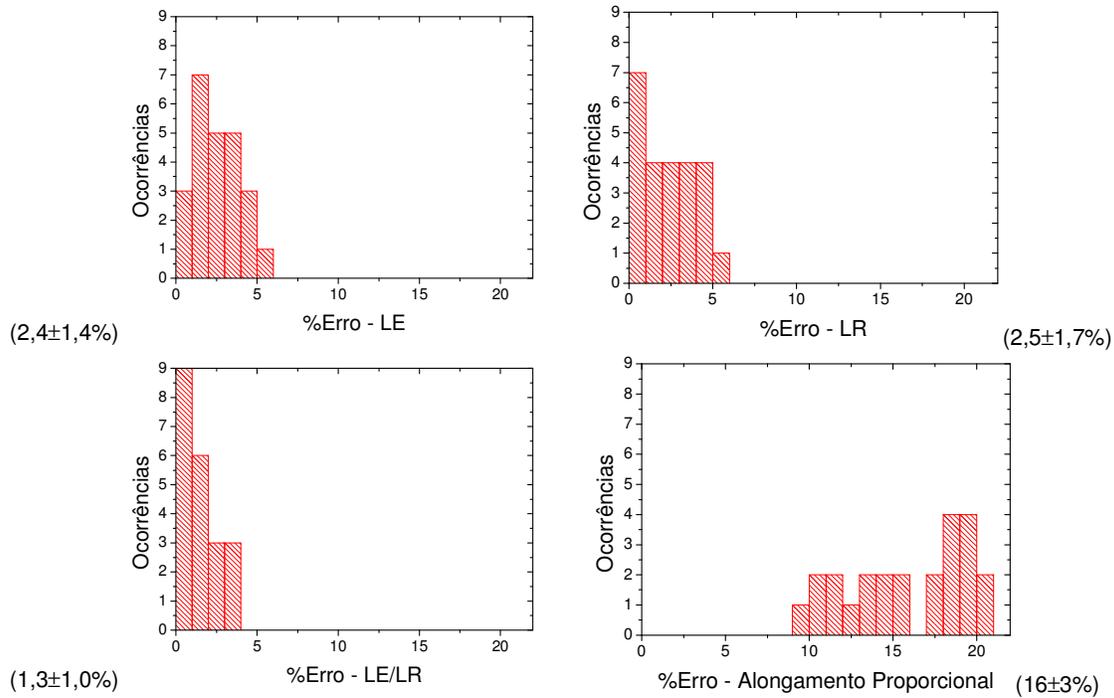


Figura 4 – Erros obtidos pelas RNA's na estimativa de propriedades mecânicas para um aço para tubos API 5L X70 PLS2, de grande diâmetro (18 pol.).

O emprego de máquinas de corte a Laser para usinagem dos *blanks* a serem transformados em peças é uma das justificativas para estes requisitos. O corte a Laser e também a Plasma oferece grande flexibilidade de obtenção de diferentes geometrias de corte, nas mesmas chapas de aço processadas, sem a necessidade de ferramental, montagem e regulagem específicos para realizar o mesmo tipo de corte por estampo. Mas esta operação necessita de chapas com boa planicidade, menor tensão residual, condições superficiais adequadas e, preferencialmente, isenção de silício para que a operação tenha um bom desempenho.⁽²²⁾ A Figura 5 ilustra uma chapa de aço que foi cortada por um equipamento automático a plasma, que é um processo que apresenta um resultado final muito similar ao corte a Laser.



Figura 5 – Ilustração de uma chapa de aço cortada automaticamente.⁽²²⁾

As chapas processadas por estes equipamentos são normalmente oriundas de bobinas laminadas a quente ou a frio. Existem circunstâncias de processamento e características do material que corroboram para um bom desempenho deste material nas operações de corte. Uma chapa que possa ser desempenada mais facilmente irá conseqüentemente apresentar menor nível de tensão residual, para uma dada situação de planicidade. Duas características para uma chapa para ser melhor desempenada podem ser otimizadas pelo auxílio das RNA's:

- mecanismos de endurecimento que reduzam a tensão residual e favoreçam a planicidade e as operações de desempenho para um determinado nível de resistência mecânica; e
- o menor grau de resistência mecânica possível, que ainda atenda à norma de classificação do aço.

Os gráficos da Figura 6 ilustram um exemplo de adequação de uma determinada qualidade de aço, para aplicações para conformação mecânica de partes cortadas a Laser/Plasma. Nestes gráficos, estão mostradas as distribuições dos valores de LE e alongamento proporcional, similares a mostrada na Figura 1. A adequação do aço foi feita com o auxílio das RNA's, permitindo propriedades mais adequadas e mais homogêneas para a norma do aço empregada, em toda a faixa dimensional abrangida.

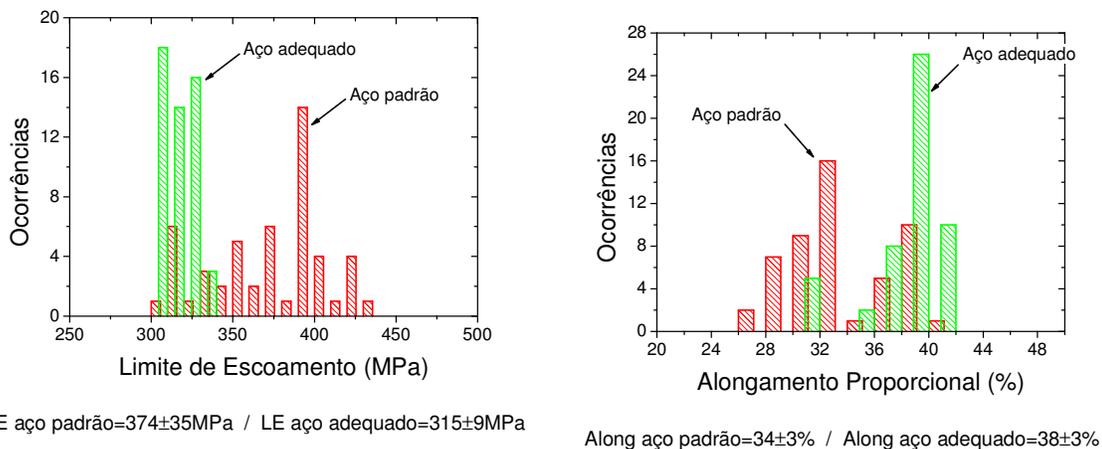


Figura 6 – Distribuições de propriedades de um aço estrutural utilizado para o setor de autopeças na condição padrão e após sua adequação à aplicação.

Este tipo de trabalho também é realizado para clientes ou aplicações específicas para os quais é recomendável uma faixa de propriedades mais restrita dentro da norma de aço utilizada e mecanismos mais adequados para a obtenção desta propriedade. Eventualmente, pode-se até mesmo desenvolver uma nova norma de aço, para substituir com melhor desempenho o aço utilizado anteriormente.⁽²²⁾

3.3 Aplicação de Semi-Produtos

As corridas de aço líquido na Usina de Cubatão geram um peso nominal de 150 ton de placas em corridas seqüenciadas na máquina de lingotamento, ou seja, de composição química compatível. As bobinas laminadas a quente são produzidas apenas com um pequeno ajuste na largura da placa que é laminada para gerar a respectiva bobina. Portanto pedidos de aços iguais, mas de larguras diferentes são

atendidos com placas oriundas de corridas diferentes. Esta situação, adicionada à incompatibilidade entre o peso dos pedidos ao peso total das corridas produzidas geram placas “livres” não associadas a pedidos. Estas placas devem ser aproveitadas em outros pedidos, atendendo-os plenamente em seus requisitos.

Com o auxílio das RNA's, é possível não só orientar estas placas com maior rapidez, como também determinar com maior exatidão os parâmetros de laminação mais adequados para cada caso. Apesar de não ser tão freqüente este uso das redes neurais, este é importante, pois aumenta o aproveitamento de material e o rendimento integrado de produto dentro da Usina.

3.4 Consultas de Produtos Não Padronizados

Ao longo do ano de 2008, a Usina de Cubatão recebeu cerca de 800 consultas de aço especiais, que não estavam disponíveis no seu portfólio padrão de produtos. As respostas destas consultas dependem da leitura e correta interpretação dos dados ou normas repassadas na consulta e o julgamento do atendimento ou não dos requisitos de composição química, resistência mecânica e características dimensionais. Mais recentemente, as consultas de bobinas laminadas a quente estão tendo a sua análise e parecer auxiliados pelo uso das RNA's, especialmente para os materiais destinados à produção de tubos API.

Conforme demonstrado anteriormente, é possível utilizar as redes neurais para formular as melhores combinações de parâmetros de especificação do projeto de liga. Desta forma, pode-se conceber o material mais adequado para a aplicação, dentro das limitações técnicas dos equipamentos envolvidos na fabricação (capacidade) e para os produtos modelados pelas RNA's.

3.5 Análises para o Novo Laminador

A partir do 1º semestre do ano de 2011, um novo laminador iniciará a produção de bobinas a quente na Usina de Cubatão. Este novo equipamento terá muitos recursos novos, de modo a oferecer um melhor controle de processo. Além disso, será disponibilizada uma maior gama de alternativas de parâmetros de laminação, criando flexibilidade e oportunidades de melhoria da qualidade e redução de custo.

Antes mesmo deste equipamento estar disponível, as RNA's estão sendo utilizadas para prever os devidos ajustes no projeto de liga dos aços a serem produzidos neste novo equipamento. É possível analisar a flexibilidade de uma determinada composição química pela abrangência das propriedades obtíveis, fazendo variar as condições de processamento no modelo, conforme poderão ser seguidas no novo laminador. Estes estudos estão em andamento e as RNA's estão permitindo antever qual será a intensidade de redução das variantes de composição nas placas a serem laminadas no novo equipamento.

Os gráficos da Figura 7 ilustram um possível cenário de ampliação das propriedades mecânicas que poderão ser obtidas, a partir de uma mesma composição química e espessura, pelo respectivo alargamento na amplitude de temperaturas de laminação que poderão ser obtidas no novo laminador.

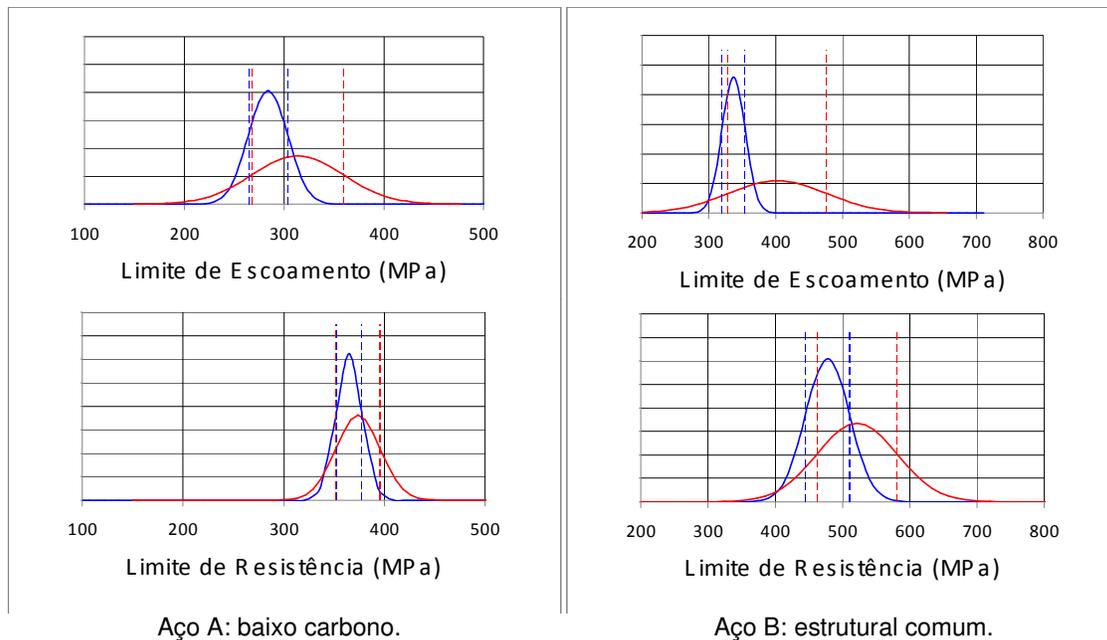


Figura 7 – Possíveis cenários de faixas de obtenção de propriedades mecânicas para duas diferentes composições de aços laminados a quente na forma de bobinas.

Para cada variável analisada, as curvas indicam a amplitude desta propriedade que bobinas com as composições químicas analisadas apresentarão, conforme as RNA's. As curvas de cada gráfico ilustram as propriedades que podem ser obtidas somente com a variação dos parâmetros de resfriamento do laminador antigo (curva mais estreita) e do novo laminador (curva mais larga e abrangente). Pode-se antever que o emprego do novo laminador em placas com estas duas composições químicas irá permitir um aumento em 200MPa na faixa do LE atualmente obtível com estas duas composições.

3.6 Outras Aplicações

O aprimoramento no uso dos aços planos é um processo contínuo e assim também o são as necessidades de ajuste, adequação ou desenvolvimento de produtos. O conhecimento metalúrgico⁽¹⁵⁾ deve ser empregado nestas circunstâncias para obter um aço com a estrutura adequada, oferecida pelo processo produtivo, para que o material apresente as propriedades necessárias para uma dada aplicação.⁽²²⁾ Nesta linha o uso de modelamentos (inclusive com uso das RNA's) e o entendimento das necessidades finais de aplicação do aço nos clientes podem ser utilizados para auxiliar a especificação e adequação de produtos de aço para as mais variadas aplicações. Dois exemplos de aplicações, nas quais foram empregados aços otimizados, estão ilustrados na Figura 8.

4 CONCLUSÕES

Conforme apresentado neste trabalho, pode-se concluir que:

- Redes Neurais Adaptativas (RNA's) podem ser utilizadas como ferramenta de auxílio na resolução de problemas práticos na empresa;
- Os modelos têm apresentado eficiência prática para prever propriedades mecânicas, com base no projeto de liga de aços laminados a quente;

- Atividades de controle de qualidade e desenvolvimento/adequação de produtos são as mais beneficiadas por esta ferramenta;
- As RNA's, em conjunto com outros modelos práticos desenvolvidos na Usina, têm auxiliado não só a gestão dos produtos na empresa, mas também o relacionamento com seus clientes.

Além disso, no que diz respeito ao relacionamento técnico com os clientes, os modelos têm permitido uma resposta mais rápida, na sugestão e análise de produtos já existentes ou a serem adequados e mesmo desenvolvidos. Esta agilidade nas respostas e personalização do atendimento reforça a cadeia de valor do produto.



Figura 8 – Exemplos de trabalhos de aplicação dos produtos da Usina de Cubatão.

REFERÊNCIAS

- 1 IRVINE, K. J., and PICKERING, F. B., Low-Carbon Steels With Ferrite-Pearlite Structures, Journal of the Iron and Steel Institute, Vol. 201, Nov., 1963, pp 944-960. In: BAIN, E. and PAXTON, H.W.; Alloying elements in steel. American Society for Metals: Metals Park, 3th printing, 1966.
- 2 F. B. PICKERING. Towards Improved Toughness and Ductility. Climax Molybdenum Co. Symp., Kyoto, p.9, 1973. In: PICKERING, F.B.; Chapter 3 - Low-carbon mild steels. Physical metallurgy and the design of steels. Applied Science Publishers: London, reprinted 1983.
- 3 THELNIG, K.E. Chapter 5 - Heat treatment - General. Steel and Its Heat Treatment - Second Edition; Butterworths: London, p. 207-318,1984. In: TOTTEN, G.E.; FUNATANI, K.; XIE, L., Handbook of Metallurgical Process Design, Marcel Dekker, Inc. New York, 2004.
- 4 BODNAR, R. L.; FLETCHER, F. B.; MANOHAR, M.; The Physical Metallurgy of Normalized Plate Steels. MS&T Conference Proceedings, New Orleans, p. 89-109, 2004.
- 5 PICKERING, F.B.; Chapter 2 - Structure-property relationships in steels, pp.50-94. In: CAHN, R.W.; HAASEN, P.; KRAMER, E.J. Materials Science and Technology-Vol.7 Constitution and Properties of Steels, Wiley-VCH, Weinheim Germany, 2005.
- 6 MORAIS, W. A.; MAGNABOSCO, A. S.; ISHARA, E.; DEMARIA, C. A. S. Estudo das variáveis de deformação plástica em aços através de ensaios de tração instrumentados. In: 59º Congresso Anual da ABM – Internacional, São Paulo. Anais. 2004. 1 CD.
- 7 MORAIS, W. A.; BORGES, H. C. Desenvolvimento de um aço refosforado e renitrogenado para esmaltagem. In: 60º Congresso Anual da ABM. São Paulo. Anais. 2005. 1 CD.
- 8 MORAIS, W. A.; MELO, R. M.; BORGES, H. C.; RET, L. C. P.; SILVA, M. R. S.; ALMEIDA FILHO, C. Desenvolvimento de aços laminados a quente na COSIPA destinados à produção de tubos API pelo processo ERW. In: 40º Seminário de Laminação da ABM, Vitória. Anais, p. 159-168, 2003.

- 9 _____ . Desenvolvimento na Cosipa do aço API 5CT J55 para tubos de pequeno e grande diâmetros. In: 40^o Seminário de Laminação - Processos e Produtos laminados e revestidos, 2004, Joinville. Anais. 2004. 1 CD.
- 10 MORAIS, W. A.; MELO, R. M.; CAMPOS JUNIOR, M. D.; DEMARIA, C. A. S. Análise da variação das propriedades mecânicas durante a conformação de tubos de pequenos diâmetros visando desempenho de projeto. In: 61^o Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro. Anais, p. 966-974, 2006. 1 CD.
- 11 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: 62^o Congresso Anual da ABM, Vitória. Anais, p. 3285-3296, 2007.
- 12 [GINZBURG, V.B.; Microalloyed Steels. In: _____. Metallurgical Design of Flat Rolled Steels. New York, 2005. Cap.21, p.545-580.
- 13 BORGES, H.C.; Predição de propriedades mecânicas em aços laminados a quente utilizando redes neurais adaptativas. 87p. Monografia (MBA em Siderurgia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 14 MORAIS, W.A.; BORGES, H.C.; PLAUT, R.L. Predição de propriedades mecânicas em aços laminados a quente utilizando redes neurais adaptativas. In: 64^o Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte. Anais, 2009.
- 15 MORAIS, W.A.; MAGNABOSCO, A.S.; NETTO, E.B.M.; Metalurgia física e mecânica aplicada. v.1 e v.2 (795 págs). São Paulo: ABM, 2008.
- 16 TAKAHASHI, 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: ABM. SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS, 11, 2007, Porto Alegre. Anais. São Paulo: Tec. Art. p. 162-171, 2007.
- 17 ISO 2566/1; Steels – Conversion of elongation values – Part 1: Carbon and low alloy steels. International Organization for Standardization, 1984.
- 18 NeuroSolutions: Premier Neural Network Development Environment. NeuroDimension, Inc. (<http://www.neurosolutions.com>). Acesso em: 19 fev. 2009.
- 19 ABM, WORKSHOP: Inovações para Desenvolvimento de Aços de Elevado Valor Agregado. Vitória, 2007. Apresentações. (<http://www.abmbrasil.com.br/cim/downloads.asp> - buscar pelo título do evento). ABM. Acesso em: 19 fev. 2009.
- 20 ABM, 2^o Workshop sobre inovações para o desenvolvimento de aços de elevado valor agregado. Santos, 2008. Apresentações. (<http://www.abmbrasil.com.br/cim/downloads.asp> - buscar pelo título do evento). ABM. Acesso em: 19 fev. 2009.
- 21 ZACCA, B. G.; SOUZA, L. F. G.; BOTT, I.S.; RANGEL, P.R. Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas de tubo API 5L X80 submetido a curvamento por indução. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.3, n.4, p.16-22, maio-jun. 2007.
- 22 MORAIS, W.A.; BORGES, H.C.; Utilização de aços de elevada resistência mecânica em aplicações de engenharia: implicações técnicas e econômicas práticas. In: 63^o Congresso Anual da ABM, Santos. Anais, p. 1027-1039, 2008. 1 CD.