

USO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL NO DESENVOLVIMENTO, ADEQUAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE DE AÇOS LAMINADOS A QUENTE NA USIMINAS-CUBATÃO

Willy Ank de Moraes ¹
Herbert Christian Borges ²

Resumo

A Assistência Técnica e o Controle Integrado da Usiminas-Cubatão têm estudado e analisado as características microestruturais e mecânicas dos aços produzidos pela empresa assim com criando modelos fenomenológicos para descrever as propriedades mecânicas de aços estruturais que a empresa produz. Recentemente, foi incorporada uma importante ferramenta: Redes Neurais Adaptativas (RNAs). Este trabalho apresenta como as RNAs 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 RNAs, 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. Aplicações de produtos têm sido beneficiadas pelo uso destas ferramentas, especialmente para uso nos setores petroquímico e automobilístico, assim como as atividades internas de controle de qualidade dos produtos.

Palavras-chave: Laminado a quente; Rede neural; Propriedades mecânicas; Modelagem.

USE OF COMPUTACIONAL INTELLIGENCE IN THE DEVELOPMENT, ADEQUACY AND QUALITY CONTROL OF HOT ROLLED STEEL AT THE USIMINAS-CUBATÃO PLANT

Abstract

The Technical Assistance and Integrated Control of Usiminas-Cubatão - have studied and analyzed the microstructural characteristics and mechanical properties of the structural steels the company produces as well as the phenomenological models it has created to describe their properties. An important tool that uses artificial intelligence was recently incorporated: the Adaptive Neural Networks (ANN's). This paper shows how the ANN's are improving the product development activities, as well as the adequacy and application of hot rolled products. The chemical composition, the rolling temperatures, the final product size and position of sampling are parameters used in the ANN's, making it possible to select effectively and practically, and not only theoretically, the best combinations of these parameters to obtain a more appropriate product. The application of products has been benefited by the use of these tools, especially for petrochemical and automobile uses, as well as the internal activities of product quality control.

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

I INTRODUÇÃO

A previsão das propriedades mecânicas dos aços é uma possibilidade muito atraente, tanto para produtores quanto para os usuários deste material.^(1,2) Por isso, na Superintendência da Qualidade da Usiminas-Cubatão, unidade responsável pela adequação e desenvolvimento de novos produtos dessa usina, estão sendo realizados estudos para:

- avaliar modelos matemáticos que tem potencial uso na descrição da relação entre (micro) estrutura e propriedades;
- implementar e utilizar modelos na prática da análise de produtos;
- compreender melhor a microestrutura presente e a influência do processo de fabricação na sua obtenção facilitando o projeto e/ou ajuste de produtos;

¹Doutorando, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Engenheiro Metalurgista, Técnico em Metalurgia, Engenheiro de Produto Sênior da Usiminas-Cubatão, Professor. Faculdade de Engenharia da Unisanta e Vice-Diretor da Divisão Técnica "Aplicações de Materiais" da ABM.

Rua Onze de Junho, 131, Apto 154, Itararé, Cep 11320-160, São Vicente, SP, Brasil. E-mail: willyank@unisanta.br / willy.morais@usiminas.com

²Mestrando em Engenharia Metalúrgica, Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Produto Pleno da Usiminas-Cubatão.

Av. Senador Vitorino Freire, 709, Jardim Rei, Cep 09910-550, Diadema, SP, Brasil. E-mail: herbert.borges@usiminas.com

- analisar mais detalhadamente as características mecânicas obtidas nestes materiais, permitindo tomada de decisões importantes; e
- oferecer análises e respostas para os usuários finais dos produtos da empresa (clientes) de forma mais rápida, precisa e personalizada.

Como fruto destes trabalhos foram desenvolvidos modelos⁽¹⁻⁴⁾ utilizados na prática para descrever as relações entre a composição química, parâmetros de processamento e estrutura de aços laminados a quente com suas propriedades mecânicas. Nos últimos anos, têm sido incorporadas técnicas de inteligência computacional, representadas atualmente pelas Redes Neurais Artificiais ou Adaptativas (RNAs)^(2,5) e em futuras aplicações os Algoritmos Genéticos (AG).⁽⁶⁾

As Redes Neurais (RNAs) têm se mostrado eficientes na resolução de problemas de difícil solução para a computação convencional. Ao contrário dos modelos computacionais comumente utilizados, em que um programa precisa ser escrito para resolver um dado problema, as Redes Neurais aprendem a resolver 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.^(2,5) Assim, esta ferramenta tem sido utilizada em diversas aplicações em vários campos, inclusive na indústria e extensivamente na siderurgia.⁽⁷⁾

Na análise de produtos laminados, inicialmente foram construídos modelos para aperfeiçoar e estabilizar o processo de laminação, situação que se tornou mais importante no Brasil na década de 1990.⁽⁸⁾ Em nível mundial, estes modelos foram incorporados paulatinamente aos equipamentos de produção e atualmente estes já são comercializados com estes modelos implementados.⁽⁹⁾ Porém, na última década, os avanços na automatização destes equipamentos e no poder de processamento computacional fortaleceram a tendência que estes modelos sejam utilizados para prever integralmente as propriedades mecânicas e a evolução microestrutural em tiras de aço laminadas, especialmente a quente, como mostrado por Tamminen *et al.*⁽¹⁰⁾ e como já está sendo introduzido pelo Centro de Pesquisas da Usiminas.⁽¹¹⁾

Com os modelos desenvolvidos^(1,2,5) nas duas plantas industriais da Usiminas está sendo possível selecionar de forma efetiva e prática e não só teoricamente, as melhores combinações dos parâmetros de especificação dos aços produzidos pela empresa. Assim, torna-se possível, inclusive, obter produtos mais adequados para as diversas aplicações finais requeridas. O nível de aplicabilidade destes trabalhos tem influenciado positivamente não só as atividades de especificação dos produtos, mas também o relacionamento técnico com os clientes da empresa, que podem contar com um assessoramento mais rápido e eficaz na definição dos melhores produtos para suas aplicações.⁽¹²⁾

O presente trabalho ilustra exemplos de casos de aplicação prática de técnicas de inteligência computacional na análise de produtos oriundos da Usiminas-Cubatão, utilizando modelos baseados em Redes Neurais Adaptativas (RNAs).⁽³⁾ Serão ilustrados como estes modelos também têm auxiliado 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 obtidos em ensaios de análise química e de propriedades mecânicas, realizados para a liberação dos produtos da empresa⁽¹⁾ e que permitem realizar análises estatísticas, como a ilustrada na Figura 1a. Sabendo-se que estas variáveis estão correlacionadas com os parâmetros de processamento, conforme ilustrado pela Figura 1b,⁽¹³⁾ busca-se, então, uma combinação de valores que satisfaça o desempenho desejado.

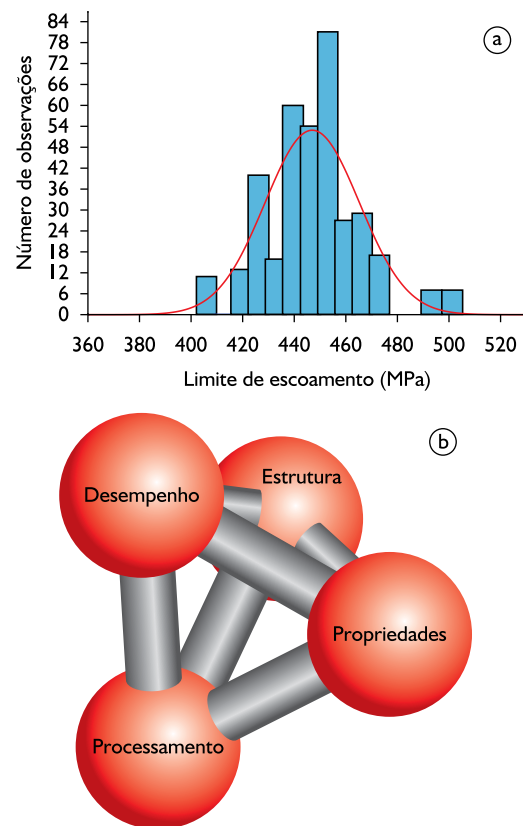


Figura 1. a) Distribuição típica dos valores de Limite de Escoamento para uma qualidade de aço produzida conforme um determinado conjunto de condições de processamento; b) Ilustração da relação genérica entre estrutura-propriedades-processamento-desempenho.⁽¹³⁾

As informações disponíveis nos bancos de dados da empresa têm sido correlacionadas com resultados de ensaios realizados nos laboratórios de caracterização da Superintendência da Qualidade,^(1,3,4) conforme ilustrado na Figura 2. 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).^(1,2)

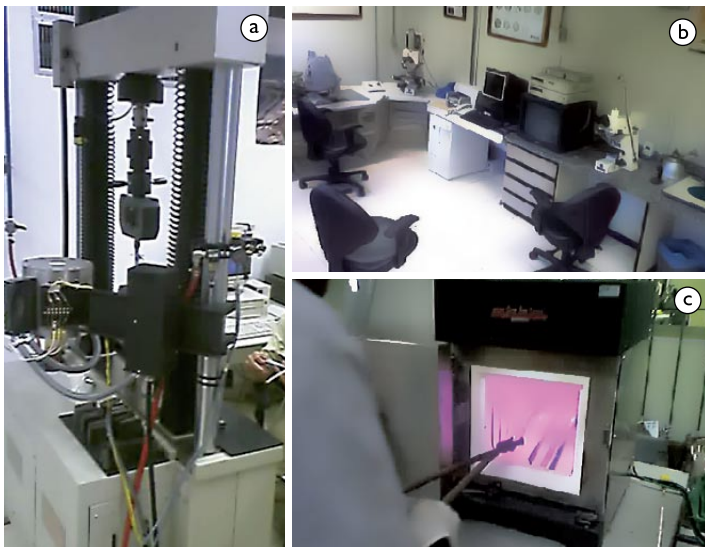


Figura 2. Equipamentos para caracterização de materiais empregados para a constituição dos modelos para análise de produtos na Usiminas-Cubatão: a) ensaios mecânicos especiais; b) metalografia, e c) tratamentos térmicos.^(1,3,4)

Estes modelos basicamente descrevem e preveem os principais parâmetros estruturais do material: limite de escoamento (LE) e limite de resistência (LR). Existe uma maior dificuldade de analisar e efetivamente modelar os valores de alongamento,^(2,5) que é um importante parâmetro diretamente relacionado à ductilidade dos materiais. Entretanto, sabe-se que o alongamento 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.^(3,13,14) Por isso, no desenvolvimento dos últimos modelos⁽¹⁴⁾ foi adotado o alongamento proporcional, que independe das dimensões dos CPs o que permite reduzir a dispersão dos resultados.^(3,13,15) Apesar de nem todos os ensaios de tração serem executados de forma a obter diretamente o alongamento proporcional, é possível obter este parâmetro a partir da Equação 1, devida a Oliver e contida na norma ISO 2566/1.⁽¹⁵⁾

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

onde: Alongamento_{L_0} é o valor do alongamento medido em um CP com base de comparação L_0 ; ÁreaCP 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.

Conforme desenvolvido por Borges⁽²⁾ utilizou-se o *software Neurosolutions 5.0*[®] produzido pela *NeuroDimension Inc.*⁽¹⁶⁾ para analisar dados industriais pela arquitetura *Multilayer Perceptron*, montada com 14 entradas, 7 nodos na primeira e segunda camada intermediária, porém com 3 saídas desejadas (14-7-7-3). Os gráficos da Figura 3 ilustram os diferentes desempenhos deste modelamento para o limite de escoamento (LE) e alongamento proporcional.⁽¹⁴⁾ Este modelo⁽²⁾ e o anteriormente desenvolvido⁽¹⁾ têm sido amplamente empregados na Usiminas-Cubatão para análise de produtos laminados a quente.

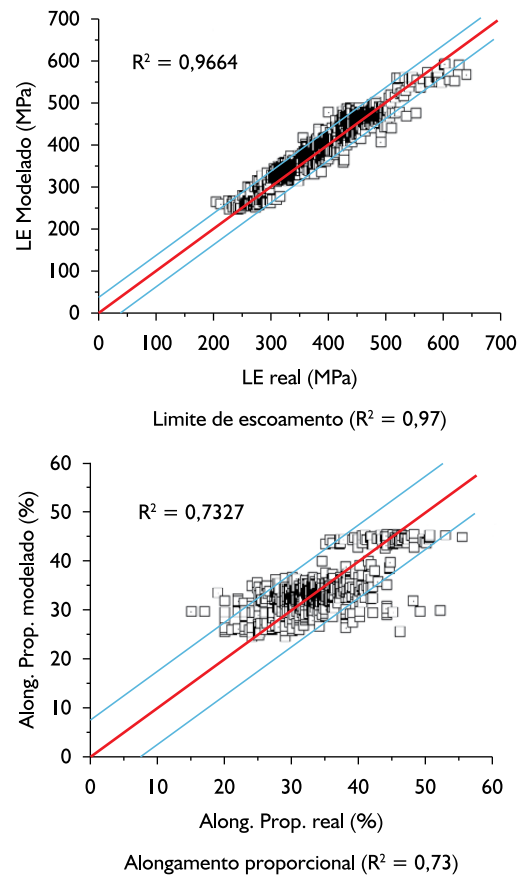


Figura 3. Ilustração da correlação entre os valores de propriedades mecânicas reais e previstas pelo modelo de RNAs desenvolvido.⁽¹⁴⁾ Está ilustrado o coeficiente de determinação (R^2) para a melhor situação de modelamento.

É possível utilizar os modelos desenvolvidos^(1,2,4) 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As grandes demandas de desenvolvimento ou adequações de aços planos têm se concentrado nestes últimos anos nos setores petroquímico (dutos de transporte de petróleo e gás) e automobilístico (autopeças, implementos rodoviários e montadoras), conforme atestado

em vários meios inclusive em eventos recentes promovidos pela ABM. ^(17,18) Assim, muitos dos trabalhos executados com o auxílio destes modelos são orientados para produtos especialmente empregados nesses setores.

3.1 Petróleo e Gás

A produção de aços para tubos API, utilizados globalmente na indústria petroquímica, é uma atividade desafiadora. É necessário um perfeito alinhamento das propriedades mecânicas do aço utilizado na produção dos tubos soldados, tanto para o atendimento aos requisitos mecânicos da norma para dutos de condução - API 5L, ⁽¹⁹⁾ quanto para os dutos empregados na produção - API 5CT. ⁽²⁰⁾ 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. ^(4,21,22)

Particularmente, os dutos de condução são constituídos por tubos de 12 m 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. ⁽²¹⁾ 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. ⁽²²⁾

Por isso, recentemente, uma produção de bobinas de 9,5 mm de espessura para tubos pela norma e grau API 5L X70 PSL2 foi baseada no modelo com RNAs. ⁽²⁾ Neste caso, além de otimizar a adição de ligas e as propriedades mecânicas que seriam obtidas nas bobinas também 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 do modelo empregado, na Figura 4 estão ilustrados os erros obtidos pela comparação dos valores reais com os valores fornecidos pelo modelo. Os erros observados foram de 2,4% e 2,5%, respectivamente para o LE e o LR (equivalentes a 14 MPa e 17 MPa respectivamente). Porém, como era de se esperar, o erro para o alongamento foi comparativamente maior: 16% (equivalente a 5p.p. no alongamento proporcional).

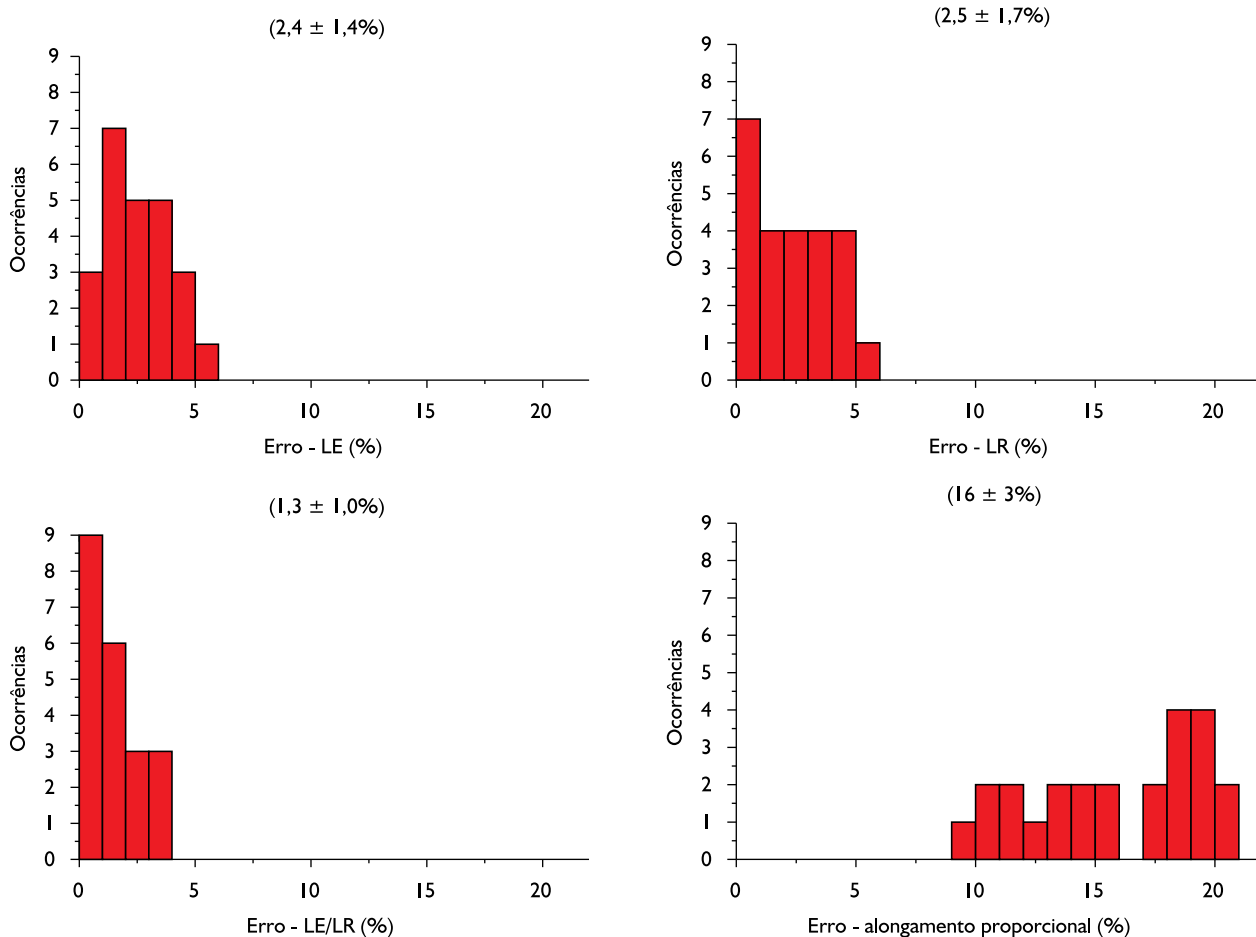


Figura 4. Erros obtidos pelas RNAs na estimativa de propriedades mecânicas para um aço utilizado para produzir tubos API 5L X70 PLS2, de grande diâmetro (18 pol.).

3.2 Autopeças

O mercado de autopeças é muito dinâmico⁽¹⁸⁾ e requer grande adaptabilidade de sua principal matéria-prima, o aço. Conforme a percepção e experiência dos presentes autores,⁽¹²⁾ 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 tensão residual, facilidade de conformação.

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.⁽¹²⁾

Dois características para obter uma chapa de aço que pode ser melhor desempenhada podem ser otimizadas pelo auxílio dos modelos desenvolvidos:

- 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 com segurança à norma de classificação do aço.

Os gráficos da Figura 5 ilustram um exemplo de adequação feita com o auxílio de modelos baseados em RNAs para 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 à mostrada na Figura 1. A adequação do aço levou a propriedades mais adequadas para toda a faixa dimensional abrangida.

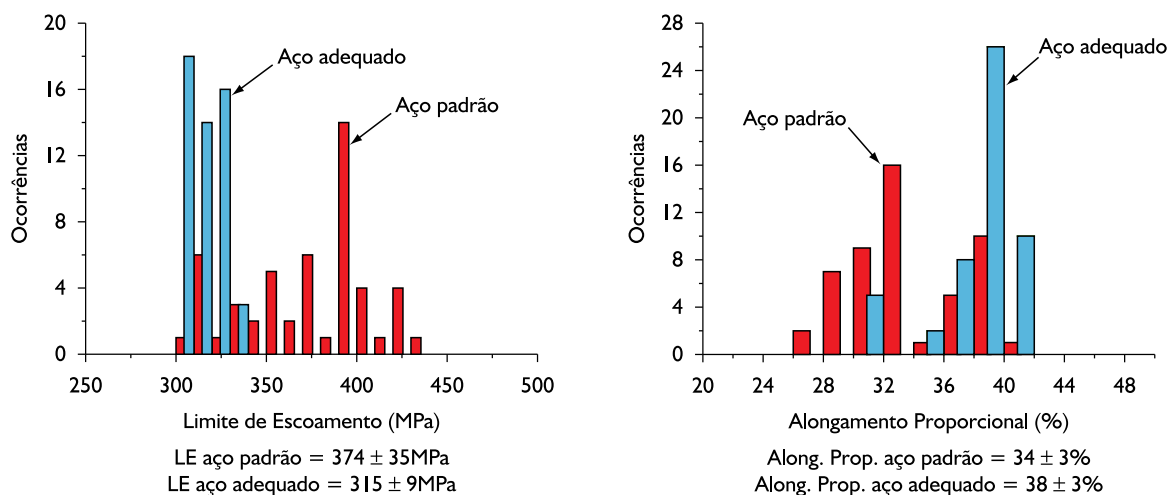


Figura 5. Distribuições de propriedades de um aço estrutural utilizado para o setor de autopeças na condição padrão e após sua adequação à aplicação.

3.3 Outras Aplicações

O tipo de trabalho exemplificado para produtos planos de aço voltados para a indústria petroquímica e automobilística também é realizado para setores ou clientes que possuem aplicações específicas. Nessas aplicações é de praxe adotar uma faixa de propriedades mais restrita ou diferenciada, dentro da norma de aço empregada, e/ou mecanismos mais adequados para a obtenção destas características. Eventualmente, pode-se até mesmo desenvolver uma nova norma de aço, para substituir com melhor desempenho a norma de aço utilizada anteriormente.⁽¹²⁾

Além do desenvolvimento ou adequação de produtos, os modelos desenvolvidos^(1,2) estão sendo empregados na aplicação de semi-produtos e na elaboração de respostas a consultas de produtos não padronizados.

3.3.1 Aplicação de semi-produtos

As corridas de aço líquido na Usina de Cubatão geram um peso nominal de 150 t de placas em corridas sequenciadas 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 dos modelos desenvolvidos,^(1,2) especialmente os baseados em RNAs⁽²⁾, é possível não só orientar a aplicação 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 frequente este uso das redes neurais, este é importante, pois aumenta o aproveitamento de material e o rendimento integrado de produto dentro da Usina.

3.3.2 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 dessas consultas dependem da análise 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 RNAs⁽²⁾, especialmente para os materiais destinados à produção de tubos, conforme as normas API 5L⁽¹⁹⁾ e API 5CT.⁽²⁰⁾

Como discutido anteriormente, é possível utilizar modelos baseados em inteligência computacional 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 (capabilidade) e para os produtos modelados pelas RNAs.

3.4 Análises para o Novo Laminador de Tiras a Quente da Usiminas-Cubatão

A partir do ano de 2011, um novo laminador iniciará a produção de bobinas a quente na Usina de Cubatão. Esse 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.

Antes mesmo desse equipamento ser posto em operação, as RNAs 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. Esses estudos estão em andamento e as RNAs estão permitindo antever qual será a intensidade de redução das variantes de composição nas placas a serem laminadas no novo equipamento.

4 CONCLUSÕES

Conforme apresentado neste trabalho, pode-se concluir que:

- modelos fenomenológicos e inteligência computacional, representada pelas RNAs, podem ser utilizados como importante ferramenta no projeto e controle de qualidade dos produtos de uma Siderúrgica;
- os modelos têm apresentado eficiência prática para prever propriedades mecânicas, com base no projeto de liga de aços laminados a quente;
- atividades cotidianas de controle de qualidade e desenvolvimento/adequação de produtos estão sendo beneficiadas por essas ferramentas;
- 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, oferecendo maior segurança e confiança técnica dos clientes para com a empresa.

Graças aos bons resultados obtidos, novos rumos estão sendo tomados. Em breve será incorporada mais uma ferramenta: os Algoritmos Genéticos⁽⁶⁾ como forma para aprofundar as análises que já estão sendo feitas com as RNAs na Usiminas-Cubatão.

REFERÊNCIAS

- 1 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: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., 2007, Vitória. *Anais...* São Paulo: ABM, 2007. p. 3285-96.
- 2 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.
- 3 MORAIS, W. A. et al. Estudo das variáveis de deformação plástica em aços através de ensaios de tração instrumentados. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 59., 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2004. p. 343-52.
- 4 MORAIS, W. A. et al. Análise da variação das propriedades mecânicas durante a conformação de tubos de pequenos diâmetros visando desempenho de projeto. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: ABM, 2006. p. 966-74.

- 5 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. p. 161-72.
- 6 HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. *Practical genetic algorithms*. 2. ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004.
- 7 BIELSKIS, C. T. et al. Aplicação industrial das redes neurais adaptativas: laminação a frio de chapas. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 44., 2007, Campos do Jordão. *Anais...* São Paulo: ABM, 2007. p. 30-42.
- 8 BARDY, P. B.; CACCIOPPOLI, J. M. R. Utilização de redes neurais artificiais no processo de laminação a frio de aços inoxidáveis. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 40., 2003, Vitória. *Anais...* São Paulo: ABM, 2003. p. 723-32.
- 9 HATTORI, S.; NAKAJIMA, M.; KATAYAMA, Y. Fuzzy control algorithm and neural networks for flatness control of a cold rolling process. *Hitachi Review*, v. 41, n. 1, p. 31-8, Feb. 1992.
- 10 TAMMINEN, P. et al. System for on/offline prediction of mechanical properties and microstructural evolution in hot rolled steel strip. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 34, n. 2, p. 157-65, Mar. 2007.
- 11 SANTOS, A. A.; MELO, T. M. F.; RODRIGUES, C. F. Desenvolvimento de modelos para previsão da microestrutura de aços C-Mn após resfriamento contínuo. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 42., 2005, Santos. *Anais...* São Paulo: ABM, 2005. p. 335-44.
- 12 MORAIS, W. A.; BORGES, H. C. Condições técnico-economônicas para viabilizar o emprego de aços planos de elevada resistência mecânica em aplicações práticas. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 6, n. 1, p. 1-6, jul.-set. 2009.
- 13 MORAIS, W. A.; MAGNABOSCO, A. S.; NETTO, E. B. M. *Metalurgia física e mecânica aplicada*. 2. ed. São Paulo: ABM, 2009.
- 14 MORAIS, W. A.; BORGES, H. C. Otimizando processos e produtos. *Tube & Companhia*, v. 5, n. 26, p. 20-39, set.-out. 2009.
- 15 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2566-1: Steel - Conversion of elongation values - Part 1: Carbon and low alloy steels*. Geneva, 1984.
- 16 *Neurodimension, Inc. NeuroSolutions - Premier Neural Network Development Environment*. Disponível em: <<http://www.neurosolutions.com>>. Acesso em: 19 fev. 2009.
- 17 WORKSHOP: inovações para desenvolvimento de aços de elevado valor agregado, 2007, Vitória. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., 2007, Vitória, ES. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/congresso/2007/workshop.asp>>. Acesso em: 19 fev. 2009.
- 18 WORKSHOP: inovações para desenvolvimento de aços de elevado valor agregado, 2. 2008, Santos. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 63., 2008, Santos. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/congresso/2008/workshop.asp>>. Acesso em: 19 fev. 2009.
- 19 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API 5L: Specification for line pipe*. 43. ed. New York, 2004.
- 20 _____. *API 5CT: Specification for line pipe*. 7. ed. New York, 2001.
- 21 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. São Paulo: ABM, 2003. p. 159-68.
- 22 ZACCA, B. G. et al. 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, mai.-jun. 2007.

Recebido em: 03/11/2009

Aceito em: 01/07/2010