

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PRODUTOS NÃO PLANOS LAMINADOS A QUENTE, ATRAVÉS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS¹

Tiago Seixas Bittencourt²
Andersan dos Santos Paula³
Carlos Sérgio da Costa Viana⁴

Resumo

A elaboração de aços via reciclagem de sucata ferrosa, rota semi integrada, apesar de representar uma solução econômica e ambientalmente mais viável que a rota integrada, i.e, via processos de redução de minério de ferro, ainda não protagoniza papel relevante na produção mundial de aço. A produção de aço via rota semi integrada enfrenta como uma das principais restrições à ampliação de seus volumes de produção, o controle efetivo e previsível da composição química dos aços nela elaborados, dado a imprevisibilidade da composição química da sucata, o que limita o atendimento, por parte das aciarias elétricas, de alguns requisitos de qualidade de aços de elevada pureza. É sabido que os elementos residuais, advindos da sucata ferrosa, principal matéria prima da rota semi integrada, afeta substancialmente os processos de endurecimento e restauração do material ao longo do seu processamento termomecânico em escala industrial, no entanto, pouco se sabe sobre como tais mecanismos ocorrem e se inter-relacionam. O presente trabalho visa avaliar, através de um modelo baseado em redes neurais artificiais, a influência da composição química e demais variáveis do processo de laminação, sobre as propriedades mecânicas finais de materiais não planos laminados a quente. Deste modo é possível prever desvios de atendimento da laminação em relação às propriedades mecânicas do produto final, antes que o mesmo seja laminado, bem como propor intervenções no laminador (velocidades e temperaturas ao longo do processo), que minimizem ou mitiguem os efeitos deletérios do endurecimento do material.

Palavras-chave: Elementos residuais; Redes neurais artificiais.

ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION INFLUENCE ON NON FLAT HOT ROLLING PRODUCTS MECHANICAL PROPERTIES THROUGH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS Abstract

The steel production by ferrous scrap recycling, semi integrated route, beside shows up like a more economy and environmental feasibly solution than the integrated route production, I mean that, by ferrous ore reduction processes, doesn't get an important space in the world steel production yet. The steel production by semi integrated route faced as one of the most important restrictions to its production volume increase up, the effective and foreseeable steel chemical composition control, according the unpredictable scrap chemical composition, fact that limit its treatment of some quality requirements, specially about high quality steels. It's known that residuals elements, from ferrous scrap, main raw material of semi integrated route, affect substantially the hardening and restoration processes that occurred at the material by its thermo mechanical processing at industrial scale, however, little is known about how this mechanisms occur and what's the relationship between them. The present work intends to evaluate, through a model based on artificial neural networks, the influence of chemical composition and others rolling mill process variables, on the final mechanical properties of non flat hot rolling products. At this way it's possible to predict the rolling mill mechanical properties attendance deviation, before the rolling, as well to suggest changes at the rolling mill parameters (speed and temperatures during the process), that reduce or exclude the bad effect of material hardening.

Key words: Residuals elements; Artificial neural networks.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP

² Mestrando em Engenharia Metalúrgica – UFF; Engenheiro de Desenvolvimento – CSN.

³ Professora/Pesquisadora D.Sc. – UFF Universidade Federal Fluminense.

⁴ Professor/Pesquisador Ph.D – UFF Universidade Federal Fluminense.

1 INTRODUÇÃO

Considera-se elementos residuais, todo e qualquer elemento que não tenha sido incorporado intencionalmente ao processo e, tão pouco se tenha controle efetivo sobre eles, seja o controle de sua entrada no processo, seja a sua retirada do processo, através de condições termodinâmicas favoráveis para tal. Na prática os elementos que se enquadram nesses critérios são: Cu, Ni, Cr, Mo, Sn, etc. Apesar de ser possível promover a retirada de alguns desses elementos ainda na sucata através de processos de separação magnética (através de correntes parasitas, processo *Eddy Current*), ainda sim, quantidades apreciáveis desses elementos estão presentes nas sucatas que abastecem os Fornos Elétricos a Arco (FEA), quer seja pelo elevado custo envolvido nos processos de separação, quer seja pelo elevado volume de residuais presentes na sucata aliado à eficiência do processo de separação.

A influência dos elementos residuais sobre as propriedades mecânicas de produtos planos e longos de aço tem sido rigorosamente estudada nas últimas décadas em todo o mundo, no entanto, poucos consensos se chegaram a respeito de como os fenômenos de endurecimento e restauração operam e interagem entre si, no processo de construção das propriedades mecânicas do material. Nilles⁽¹⁾ estudou os efeitos causados pelo Cu nas propriedades mecânicas de vergalhões na Europa ocidental.⁽¹⁾ Um ano antes, Birat⁽²⁾ já relatava os efeitos deletérios do Cu e Sn sobre a trabalhabilidade a quente de alguns materiais planos laminados a quente. Birat⁽²⁾ observou que grandes quantidades desses elementos formavam óxidos complexos de mesma natureza que, ao segregarem nos contornos de grão, geravam trincas no material. A influência de Ni, Cr, Cu, Mo, As e Sn foi ainda explorada pelo próprio BIRAT, que concluiu que o aumento de resistência causado por tais elementos, seria causado pela solubilidade dos mesmos em solução sólida na matriz da rede hospedeira.

O presente trabalho visa avaliar separadamente os mecanismos através dos quais os elementos residuais, advindo da sucata, podem afetar as propriedades finais dos produtos fabricados via rota semi-integrada, através de um modelo baseado em redes neurais artificiais.

1.1 Aspectos Termodinâmicos da Fabricação dos Aços

O processo semi integrado inicia com a seleção/classificação da sucata de acordo com suas características físico químicas. Fruehan,⁽³⁾ descreve o processo de fabricação de aço em aciarias elétricas como sendo o processo através do qual a sucata é fundida e, o banho metálico formado, é refinado inicialmente através da oxidação dos elementos de acordo com sua afinidade com o oxigênio segundo a relação proposta por Ellingham.⁽⁴⁾ Após o refino oxidante, o banho segue para uma etapa de refino secundário, onde pequenos ajustes de composição química são realizados para que, finalmente o material, possa ser solidificado sob a forma de tarugos, blocos ou placas.

A Figura 1 mostra a relação de Ellingham,⁽⁴⁾ para os principais elementos e seus óxidos, i.e, a correspondência linear entre a energia livre de Gibbs e a temperatura. Observe que, óxidos complexos de elementos como Cu, Ni, Mo e Pb, apresentam, para uma mesma temperatura, níveis de energia livre, substancialmente superiores a energia livre do óxido de ferro. Portanto, de acordo com a hierarquia termodinâmica, a reação de oxidação desses elementos só seria possível caso houvesse a oxidação de todo o conteúdo de Ferro do banho.

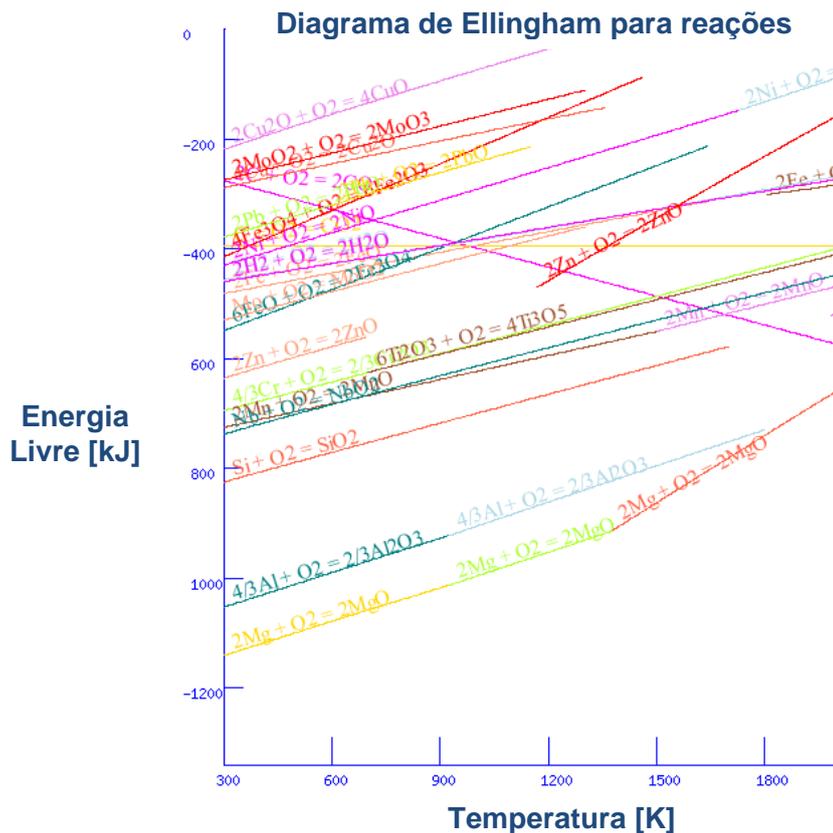


Figura 1. Diagrama de Ellingham para os principais óxidos. Energia livre de Gibbs x Temperatura.⁽⁴⁾

1.1.1 Aspectos microestruturais da fabricação dos aços

A laminação é um processo massivo de conformação mecânica, onde um tarugo, bloco ou placa, denominado esboço, é conformado através da ação rotativa de cilindros montados em uma estrutura denominada gaiola ou cadeira de laminação. Durante o processo de laminação o material toma a forma do cilindro que o conforma. Deste modo, após sucessivos passes de conformação, i.e, após passar por tantas cadeiras ou gaiolas quanto necessárias, é possível através de premissas de calibração geométrica, produzir produtos com diferentes seções transversais e com propriedades mecânicas distintas.

A quantidade e a taxa de deformação imposta ao material, associada à composição química do mesmo, determinam o comportamento mecânico do mesmo ao longo do fluxo de deformação. A evolução microestrutural e textural do material ao longo desse fluxo termomecânico é que determina as propriedades finais do material.

Segundo Hodgson e Gibbs⁽⁵⁾ e Barbosa, Boratto e Santos,⁽⁶⁾ inúmeras alterações microestruturais ocorrem simultaneamente no material durante o processo de conformação a quente. Ao longo das últimas décadas, vários pesquisadores se dedicaram à compreensão dos fenômenos associados à conformação a quente, tais como recristalização, recuperação, crescimento de grão, precipitação, entre outros. Após intensa investigação acadêmica, experimental e industrial foram definidas três temperaturas críticas, que facilitam a compreensão da maioria dos fenômenos que ocorrem durante o processo de laminação a quente. São elas: (i) temperatura de solubilização dos carbonetos, nitretos, carbonitretos e sulfetos, também conhecida como temperatura de encharque ou temperatura de reaquecimento de placas, blocos ou tarugos; (ii) temperatura de não recristalização, que representa a temperatura acima da temperatura Ar₃ (limite físico no diagrama Ferro Carbono

entre os campos austenítico e bifásico: austenita + ferrita) do diagrama ferro carbono, no entanto, abaixo da qual não ocorre a recristalização da austenita, i.e, não são formados novos grãos, livres de deformação a partir de uma matriz de austenita encruada; e (iii) temperatura de transformação austenita → ferrita, Ar3. Portanto, quando se fala em laminação controlada, refere-se exclusivamente ao processo de conformação realizado de forma controlada em três domínios térmicos bem definidos, a saber:

- (i) domínio térmico 1: região de altas temperaturas de laminação. Nesta região, a austenita grosseira de pré-aquecimento é deformada e se recristaliza em cada passe promovendo um refino de grão por recristalizações sucessivas, dando origem a uma ferrita equiaxial relativamente grosseira;
- (ii) domínio térmico 2: região de temperaturas intermediárias, onde a austenita é deformada sem que ocorra recristalização entre passes. Dessa forma o material sendo processado apresenta um encruamento residual que se acumula em cada passe, formando bandas de deformação, logo a austenita se divide em vários sub-blocos. Os contornos de grão e as bandas de deformação fazem com que o número de sítios disponíveis para nucleação posterior da ferrita se multiplique, levando a um decréscimo no tamanho de grão final. A microestrutura é formada por ferrita equiaxial, sendo mais refinada do que na região 1; e
- (iii) domínio térmico 3: região de temperaturas abaixo do Ar3, onde existe uma mistura de ferrita e austenita. A estrutura nesta região é composta de ferrita alongada, que mostra uma subestrutura de deformação, a austenita encruada com bandas de deformação. Aqui a ferrita sofre um encruamento levando a um aumento de resistência do material. A austenita sofre um encruamento adicional aumentando ainda mais o número de locais disponíveis para nucleação da ferrita, gerando um grão de ferrita ainda mais fino do que aquele produzido na região 2. A microestrutura é formada por ferrita com subgrãos, provenientes de ferrita deformada, e por ferrita equiaxial, advinda da transformação austenita → ferrita.

Hodgson e Gibbs⁽⁵⁾ propuseram uma regressão de múltiplas variáveis para predizer as propriedades mecânicas de materiais laminados em função da composição química e das características microestruturais do material. As Equações 1 e 2 mostram respectivamente o resultado da regressão para o limite de escoamento e limite de resistência, respectivamente, ambos em MPa.

$$\sigma_Y = 62,6 + 26,1[Mn] + 60,2[Si] + 759[P] + 212,9[Cu] + 3286[N] + \sigma_p + \frac{19,7}{\sqrt{d_\alpha}} \quad (1)$$

$$\sigma_u = 164,9 + 634,7[C] + 53,6[Mn] + 99,7[Si] + 651,9[P] + 472,6[Ni] + \sigma_p + \frac{11}{\sqrt{d_\alpha}} \quad (2)$$

Onde:

- σ_Y – limite de escoamento;
- σ_u – limite de resistência;
- d_α – tamanho de grão ferrítico;
- σ_p – contribuição da precipitação;
- C, Mn, Si, P, Cu e Ni são dados em percentual em peso (%), enquanto que o N é o nitrogênio livre dissolvido no ferro em ppm.

Para aços ao Vanádio, σ_p é calculado de acordo com a Equação 3, enquanto que para aços ao Nióbio, a relação é apresentada na Equação 4.

$$\sigma_p = 57 \log [T] + 700[V] + 7800[N] + 19 \quad (3)$$

$$\sigma_p = 2500 [Nb] \quad (4)$$

Onde:

- T – temperatura de deformação do material a quente;
- V, N e Nb é o percentual em peso dos referidos elementos.

1.2 Efeito da composição química sobre as propriedades mecânicas

Todos os mecanismos de endurecimento de metais que se conhece estão direta ou indiretamente associados à composição química, que por sua vez possui considerável correlação com a matéria prima a ser utilizada no processo de fabricação, em especial no caso das aciarias elétricas. Seja no endurecimento por solução sólida, pela precipitação de compostos na matriz hospedeira, pela retenção ou favorecimento do crescimento de grão ou ainda pelo favorecimento ou não a ocorrência de fenômenos de restauração tais como recuperação e recristalização, a composição química sempre está presente e pondera substancialmente para o desenvolvimento das propriedades finais do material.

O elementos residuais, foco de estudo deste trabalho, podem estar presentes nos aços elaborados em aciarias elétricas de diferentes maneiras a saber: (i) solução sólida; (ii) precipitação; (iii) segregação intergranular; e (iv) segregação superficial.

A Figura 2 mostra a relação entre a resistência mecânica, representada pela dureza Brinell e a composição química, onde fica evidente que o P é o maior endurecedor por solução sólida que se conhece, seguido pelo Si, Mn e Ni. Segundo Bain e Paxton,⁽⁷⁾ o campo de tensões (de ordem química e/ou elétrica) criado pela distorção em torno dos solutos dificulta a movimentação das discordâncias que, por conseqüência aumenta a resistência mecânica do material.

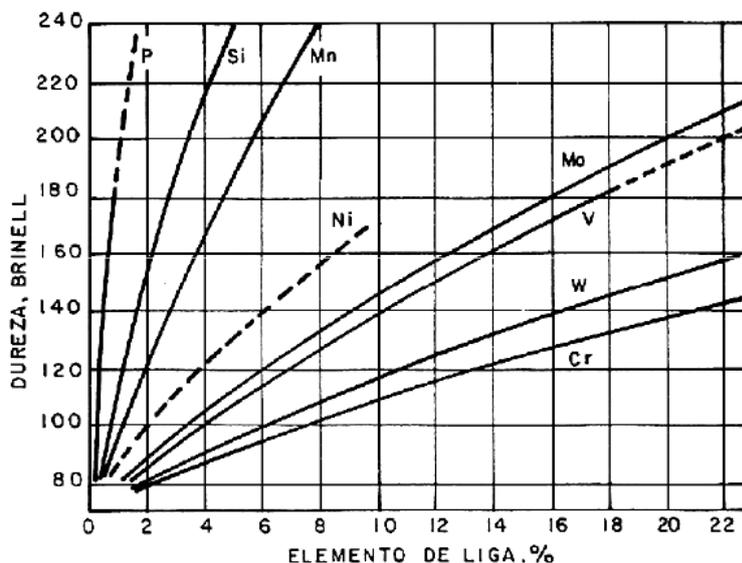


Figura 2. Correlação entre a composição química e a dureza do material. Caso do aço.⁽⁷⁾

Praticamente todos os elementos residuais contribuem para o aumento de resistência por solução sólida, no entanto, alguns elementos afetam de modo peculiar a tenacidade do material. Segundo Houpert et al.,⁽⁸⁾ a tenacidade é levemente afetada pelo Cr, Mo e Cu em solução sólida, enquanto que o Ni promove efeito benéfico em relação a temperatura de transição dúctil frágil do material.

Houpert et al.,⁽⁸⁾ observaram ainda que o efeito do Cr é ambivalente em relação ao aumento de resistência, dependendo da concentração de C do aço, i.e, pode aumentar ou reduzir a resistência do material.

Elementos residuais, podem também modificar a microestrutura de algumas fases. Para aços eutetóides, Marique⁽⁹⁾ observou que o Cr e o Mo reduz o espaçamento lamelar da perlita. Seus experimentos mostraram ainda que o Cu reduz o grau de regularidade lamelar da perlita, enquanto que o Ni causa efeito oposto.

Os elementos residuais também podem ainda precipitar na forma de inclusões na matriz dos aços, como carbeto, sulfeto, nitreto, carbonitreto, carbosulfeto, etc. V, Nb, Zr, W, Mo e Cr, por possuírem grande afinidade com o C, são tipicamente formadores de carbeto, enquanto que, Mn e Ti, são mais estáveis quando ligados ao N, formando nitreto, ou ainda uma formação complexa com C e N, formando os carbonitretos. A quantidade, distribuição e tamanho dos precipitados depende da composição química global do material, devido a interação entre solutos, e do tratamento termomecânico que o material sofre ao longo de seu processamento. De acordo com Hawkins,⁽¹⁰⁾ as inclusões, quando finas, aumentam substancialmente a dureza e resistência a tração de aços ao C, no entanto, inclusões grosseiras, podem resultar em uma queda considerável na tenacidade do material, podendo inclusive, causar problemas operacionais durante a fabricação, i.e, podendo gerar arrebitamentos durante a laminação ou trefilação do material.

No final da década de 1990 e início do século XXI, os japoneses se dedicaram exaustivamente à avaliação do efeito de um determinado elemento sobre as propriedades de perfis estruturais, o Cobre. Othani, Sua e Ishida,⁽¹¹⁾ e Nagasaki et al.,⁽¹²⁾ descobriram que o Cobre pode formar compostos relativamente ricos em Cobre (>0,5%p), o que serviu como base para o desenvolvimento de aços ao Cobre para o segmento de Petróleo e Gás, onde resistência mecânica, tenacidade e resistência corrosão são requeridos. O grau de supersaturação do Cobre na estrutura do Ferro, aliado a temperatura de envelhecimento, promove um aumento substancial na tenacidade do material.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

As composições químicas típicas dos aços avaliados neste trabalho (Tabela 1), estão de acordo com aquelas prescritas nas normas SAE 1012⁽¹³⁾, SAE 1020⁽¹⁴⁾, e SAE 1030⁽¹⁵⁾ em relação a C, Mn, Si, S e P. Quanto aos elementos residuais (Cu, Ni, Cr, Mo etc), buscou-se simular um domínio químico de modo que fosse possível isolar faixas onde o somatório dos elementos residuais se concentrasse em faixas classificadas como alta e baixa para cada um dos aços, seguindo metodologia de planejamento de experimentos (DOE – *Design Of Experiments*). Os materiais analisados no presente trabalho são materiais não planos laminados a quente, partindo de um tarugo quadrado de seção constante e objetivando seções circulares comerciais.

Tabela 1. Composições Químicas típicas de aços produzidos via aciarias elétricas para o segmento de construção civil

Aço	C	Mn	Si	S	P
SAE 1012	0,13	0,65	0,20	0,04	0,04
SAE 1020	0,20	0,70	0,21	0,04	0,04
SAE 1030	0,31	0,76	0,22	0,05	0,04

2.2 Modelos Determinísticos – Termodinâmicos

Com a finalidade de otimizar as variáveis de entrada da rede neural, bem como criar fatores de compensação para correção dos modelos neurais, foram construídos três modelos termodinâmicos, responsáveis por determinar: (i) o limite de solubilidade das principais espécies químicas residuais na rede cristalina do Ferro; (ii) a temperatura de precipitação dos principais compostos observados em aços com composição química semelhante; e (iii) as temperaturas críticas de transformação austenita → ferrita (Ar_3) e ferrita → austenita (Ar_1).

O limite de solubilidade de cada espécie química na rede cristalina do Ferro pode ser calculado de acordo com o critério de minimização da energia livre de Gibbs envolvida no processo de solubilização da espécie em questão, de acordo com a Equação 5. Para o cálculo da solubilidade de uma determinada espécie química, assume-se uma condição de equilíbrio termodinâmico.

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \left(\frac{a_{\text{produto}}}{a_{\text{reagentes}}} \right) \quad (5)$$

Onde:

- ΔG : é a energia livre de Gibbs;
- ΔG^0 : é a energia livre padrão de Gibbs;
- R: é a constante universal dos gases;
- T: é a temperatura;

a_{produto}

- $a_{\text{reagentes}}$: é a razão entre a atividade dos produtos e a atividade dos reagentes.

Adicionalmente, foi considerada ainda a interação que cada soluto tem com os demais, i.e, como cada espécie química interage uma com as outras impactando mutuamente em suas solubilidades. Para tal pode-se empregar o Formalismo de Wagner, largamente empregado em siderurgia para análise de solubilidade de sistemas multicomponentes moderadamente diluídos. Wagner,⁽¹⁶⁾ propôs uma expansão em séries do logaritmo do coeficiente de atividade de um soluto qualquer, i , em função da concentração dos demais solutos.

Em 1974⁽¹⁶⁾ foi publicado um compêndio *The thermodynamics of liquid dilute iron alloys*, até hoje considerado o melhor e mais empregado compêndio termodinâmico para a siderurgia. Os diversos coeficientes da expansão logarítma que calcula o coeficiente de interação entre solutos, podem ser extraídos diretamente do referido trabalho.

Analogamente ao cálculo do limite de solubilidade, também através da minimização da energia livre de Gibbs, pode-se calcular a temperatura na qual, devem-se formar os precipitados de interesse. Também conhecido como produto de solubilidade, o produto entre duas espécies químicas ávidas uma pela outra, encontra seu equilíbrio termodinâmico quando, em uma condição única, o produto da reação possa assumir atividade unitária, i.e, condição de elevada pureza do composto formado. Nesta condição, uma certa temperatura minimiza sua energia de formação. As equações 6 e 7 descrevem como pode ser calculado o produto de solubilidade para quaisquer espécies químicas, representadas esquematicamente pela reação química $i + j \rightarrow ij$. Assumindo ij um composto (produto da reação) puro, logo, $a_{ij} = 1$. Considerando uma condição de equilíbrio termodinâmico, tem-se que $\Delta G = 0$. Portanto, aplicando-se as propriedades logarítmicas adequadas, tem-se que:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \left(\frac{a_{ij}}{a_i a_j} \right) \quad (6)$$

$$a_i a_j = \exp \left(\frac{\Delta G^0}{RT} \right) \quad (7)$$

Onde:

- ΔG : é a energia livre de Gibbs;
- ΔG^0 : é a energia livre padrão de Gibbs;
- R: é a constante universal dos gases;
- T: é a temperatura;
- a_{ij} : atividade do produto da reação ij ;
- a_i : atividade ou concentração do reagente i ;
- a_j : atividade ou concentração do reagente j .

As temperaturas de transformação de fases Ar_1 (transformação ferrita \rightarrow austenita) e Ar_3 (transformação austenita \rightarrow ferrita) podem ser calculadas diretamente via *Thermocalc*, onde o campo bifásico é mapeado através da determinação do mapa de fases (austenita e ferrita) em função da temperatura, para cada composição química de interesse. Tais temperaturas ainda podem ser calculadas através de modelos semi empíricos, disponíveis na literatura.

2.3 Modelos Neurais

A correlação entre a composição química e demais variáveis de processo, tais como temperatura, quantidade e taxa de deformação com as propriedades mecânicas foi realizada através de redes neurais artificiais. Através de suas interconexões, é possível modelar adequadamente a não linearidade advinda dos fenômenos de endurecimento e restauração, os quais o material sofre ao longo de seu processamento. A construção, treinamento, teste e validação das redes neurais foram feitas através do *software* comercial *Neuro Solutions*.

Para o modelamento do fenômeno foram construídas duas redes neurais: a primeira para o cálculo da dureza global em função da composição química e da taxa de resfriamento do material, e uma segunda rede, a qual utiliza como variável de entrada o resultado da dureza global fornecido pela primeira rede, associado à quantidade e taxa de deformação, além da temperatura de processamento,

fornecendo como saída, as propriedades mecânicas de interesse: Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência (LR) e alongamento (AL).

Para a construção de ambas as redes, um banco de dados foi dividido na relação 60%, 20% e 20% para o treinamento, teste e validação das redes respectivamente.

Para o cálculo da dureza global foi construída uma rede com as seguintes características:

- estrutura 2:5:1 (dois neurônios na camada de entrada, cinco neurônios na camada oculta e um neurônio na camada de saída);
- topologia MLP (*Multi Layer Perceptron*);
- função de ativação do tipo sigmoidal;
- regra de aprendizagem do tipo gradiente descendente.

O índice de composição química foi definido como sendo a razão entre o somatório de todos os elementos estabilizadores de ferrita e o somatório de todos os elementos estabilizadores de austenita. Tal índice foi criado para facilitar a normalização dos dados de entrada da rede, além de fornecer significado físico direto para análise dos resultados.

Vale ressaltar que, para ambas as redes neurais construídas no presente trabalho, a topografia, regra de aprendizado, neurônios na camada oculta e função de ativação, foram escolhidas baseado no histórico de emprego da técnica em outras aplicações similares. Gorni,⁽¹⁷⁾ aplicou redes neurais artificiais em inúmeros problemas de laminação a quente de produtos planos de aço com estrutura similar.

De posse dos resultados de dureza global gerados pela primeira RNA, uma segunda RNA foi construída com as seguintes características:

- estrutura 4:9:3 (quatro neurônios na camada de entrada, nove neurônios na camada oculta e três neurônios na camada de saída);
- topologia MLP (*Multi Layer Perceptron*), a mais empregada em problemas de regressões multivariáveis não lineares;
- funções de ativação do tipo passa não passa em um neurônio (para o fenômeno de precipitação/solubilização) e sigmoidal para os demais neurônios;
- regra de aprendizagem do tipo gradiente descendente.

A Figura 3 mostra a topologia global das redes desenvolvidas para o modelamento das propriedades mecânicas.

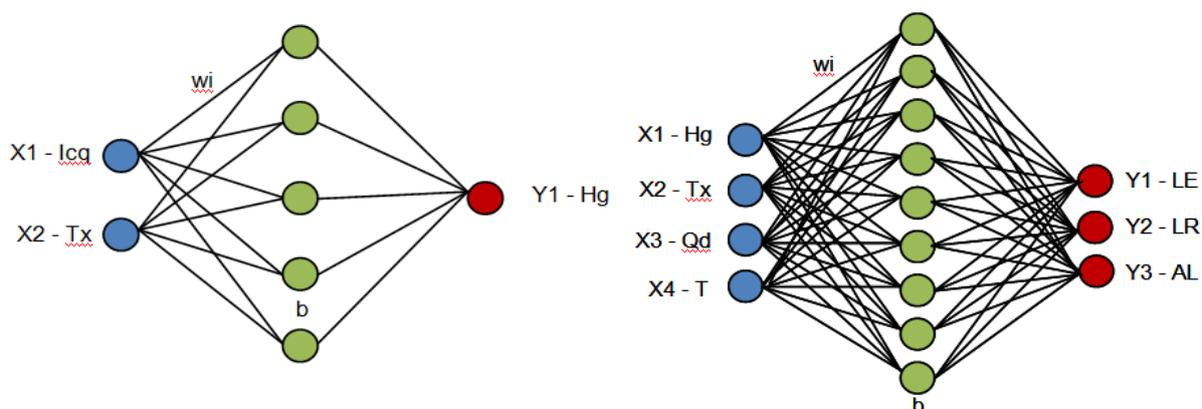


Figura 3. Topologia das redes neurais construídas para o modelamento das propriedades mecânicas.

3 RESULTADOS

As Figuras 4, 5 e 6 mostram a aderência do modelo neural desenvolvido para a predição das propriedades mecânicas do material (limite de escoamento, limite de resistência e alongamento, respectivamente). Os resultados apresentados nas Figuras 4, 5 e 6 são relativos ao aço SAE 1024, bitola 12,0 mm, cuja temperatura Ar_3 calculada via *Thermocalc* é de 832°C e laminado em uma temperatura acima de Ar_3 .

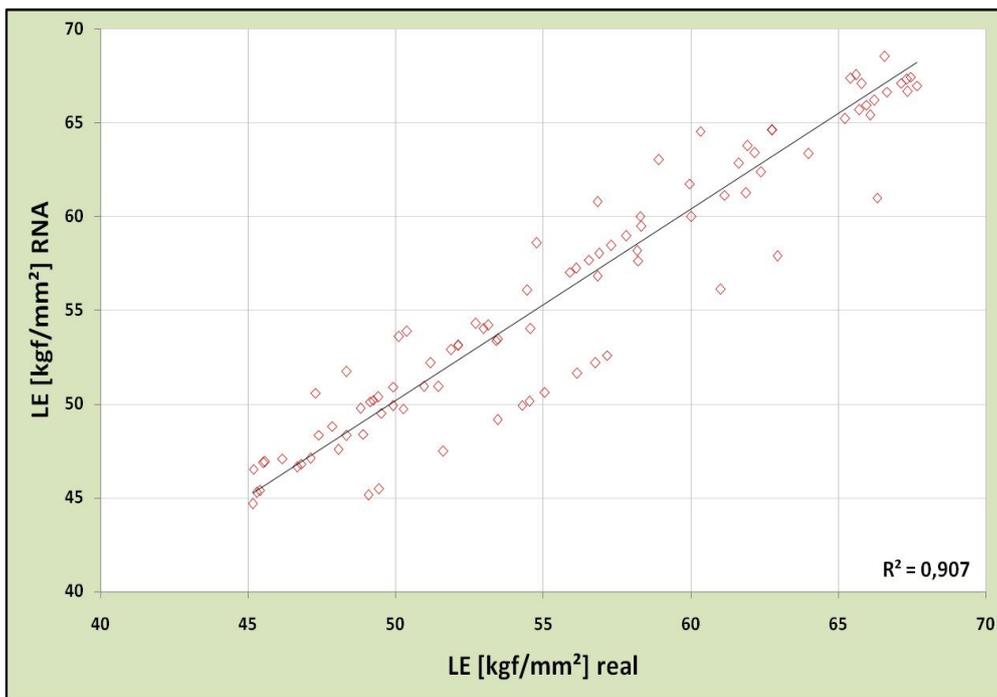


Figura 4. Previsão do modelo neural o limite de escoamento.

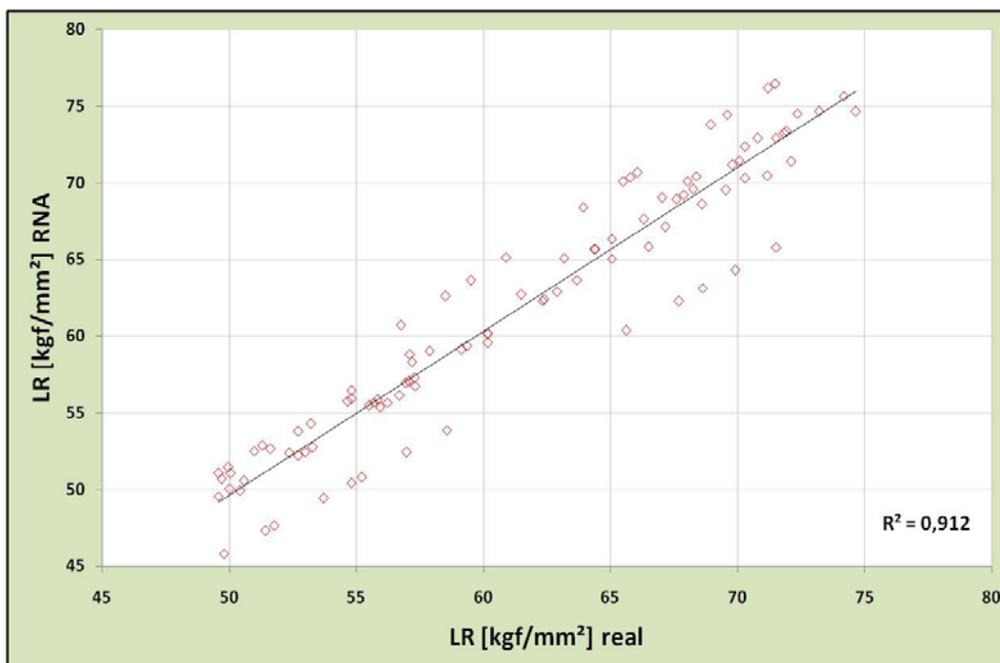


Figura 5. Previsão do modelo neural o limite de resistência.

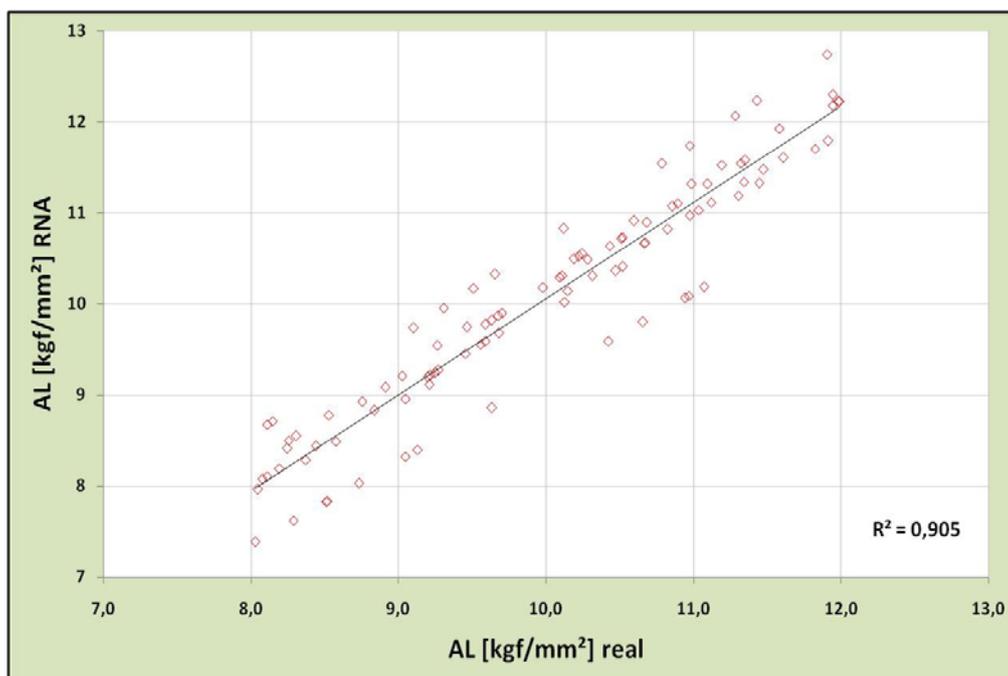


Figura 6. Previsão do modelo neural o alongamento.

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no referido trabalho estão de acordo com aqueles previstos por Hodgson e Gibbs,⁽⁵⁾ quando através de regressões múltiplas, determinou os limites de escoamento e resistência de materiais planos laminados a quente, em função da composição química, tamanho de grão ferrítico e parcela de contribuição da precipitação. Todavia, o presente modelo, considera ainda a influência direta da temperatura de laminação, os efeitos de solubilidade das espécies químicas (em especiais elementos residuais) na rede hospedeira no Fe, além da quantidade e taxa de deformação empregada no processamento do material. Observou-se ainda que, alguns elementos residuais, tais como Cu, Ni, Cr e Mo, podem ter seus efeitos atenuados ou catalisados sobre o endurecimento do material, quando combinado com outros elementos ditos controlados, tais como Mn, Si e C.

5 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos, somos levados a crer que o modelo neural prediz com razoável concordância os valores de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento para a bitola avaliada, devido a dois fatores fundamentais, são eles: (i) à própria robustez da própria RNA; e (ii) aos filtros determinísticos imputados ao modelo que, são capazes de compensar possíveis erros do modelamento através de regras estatísticas bem definidas. O cálculo das temperaturas críticas e dos produtos de solubilidade via termodinâmica computacional permitiram ainda, auxiliar na normalização das variáveis de entrada, bem como auxiliar na compensação dos erros cometidos pelo modelo.

REFERÊNCIAS

- 1 NILLES, P.E. Recycling and virgin materials in the changing European steel industry. *Iron and Steelmaker*, vol. 24, nº04, pp. 33-40, 1997.
- 2 BIRAT, J.P.L. Residuals and tramp elements in scrap and steel. 15th PTD conference proceedings, pp. 53-65, 1996.
- 3 FRUEHAN, R.J. The making, shaping and treating of steel. 11th edition steelmaking and refining volume, Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998.
- 4 ELLINGHAM, H. J. T. (1944), *J. Soc. Chem. Ind. (London)* 63: 125.
- 5 HODGSON, P. D., GIBBS, R. K. A Mathematical Model to Predict the Mechanical Properties of Hot Rolled C-Mn and Microalloyed Steels. *ISIJ International*, vol. 32, nº 12, pp. 1329-1338, set. 1992.
- 6 BARBOSA, R. A. N. M., BORATTO, F.J. M., SANTOS, D. B., *Fundamentos da Laminação Controlada*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1989. 325p.
- 7 BAIN, E. C., PAXTON, H. M., *Alloying Elements in Steel*. 2ed., ASM, Metals Park, p. 62, 1966.
- 8 HOUPERT C, JALLON M, CONFENTE M, LANTERI V, JOLIVET JM, GUTTMANN M, BIRAT JP, "Production of high quality steels using the scrap/electric arc furnace route", 15 PTD conference proceedings, pp. 67-77, 1996.
- 9 MARIQUE C., "Tramp elements and steel properties: a progress state of the European project on scrap recycling", *La revue de Metallurgie-CIT* pp. 433-441, 1998.
- 10 HAWKINS RJ, "Problem of residuals in Steel- current situation in the ECSC", vol. 12, no. 6, pp. 286-287, 1985.
- 11 OTHANI H, SUDA H, ISHIDA K, "Solid/Liquid equilibria in Fe-Cu based ternary systems", *ISIJ International*, vol. 37, no. 3, pp.207-216, 1997.
- 12 NAGASAKI C, KAGA M, SHIBATA K, Asakura K, and HATANO M. Effect of Boron on Copper Induced Surface Hot Shortness of 0.1% Carbon Steel" *ISIJ International*, vol. 42(2002), Supplement, pp. S57-S61.
- 13 SAE - Society of Automotive Engineers. SAE - AS1012, 1960 (REAP. 2007).
- 14 SAE - Society of Automotive Engineers. SAE - AS1020, 1972.
- 15 SAE - Society of Automotive Engineers. SAE - AS1030, 1965.
- 16 SIGWORTH, ELLIOT, WAGNER. *The Thermodynamics of Liquid Dilute Iron Alloy*, *Metal Science*, vol 8, p 298, 1974.
- 17 GORNI, A. A. *Aplicação de Redes Neurais Artificiais no Modelamento de Processos da Laminação de Chapas Grossas*. Congresso Anual da ABM, 1997.