

ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DOS PARÂMETROS DE PROCESSO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BOBINAS A QUENTE¹

Antonio Augusto Gorni²
Marcos Roberto Soares da Silva³
José Herbert Dolabela da Silveira⁴

Resumo

Foram verificadas neste trabalho as influências da composição química e parâmetros de processo de laminação sobre as propriedades mecânicas de bobinas a quente de aços ao C-Mn e microligados através de análise estatística multidimensional. Verificou-se em ambos os aços que a influência da composição química foi maior do que a do processo de laminação, sendo que no caso dos aços microligados o efeito do Nb foi dominante.

Palavras-chave: Bobinas a quente; Processo; Propriedades mecânicas; Correlação

MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS OF PROCESS PARAMETERS AND MECHANICAL PROPERTIES OF HOT COILS

Abstract

The aim of this work was to identify the correlations between mechanical properties of C-Mn and microalloyed steel hot coils and its chemical composition and hot strip mill process parameters through statistical multidimensional analysis. In both cases it was verified that the influence of chemical composition was greater than the hot rolling process parameters, specially in the case of microalloyed steels, where Nb played a dominant role.

Key words: Hot coils; Process; Mechanical properties; Correlation.

¹ Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Gainhas - PE

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng., Dr. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – Cosipa, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br.

³ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.B.A., C.Q.E., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – Cosipa, Cubatão SP. E-Mail: marcosilva@cosipa.com.br.

⁴ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia, M.B.A. No momento da realização do trabalho: Gerente de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista – Cosipa, Cubatão SP. E-Mail: herbert.silveira@gerdau.com.br.

1 INTRODUÇÃO

O estabelecimento das correlações entre os parâmetros de processo da Laminação de Tiras a Quente, a microestrutura dos produtos obtidos e suas propriedades mecânicas ainda é um candente tópico de pesquisa e desenvolvimento em todo mundo. O estabelecimento dessas correlações é o fundamento dos modelos matemáticos que permitem calcular precisamente as propriedades mecânicas do laminado a quente assim que ele é processado, fato que pode viabilizar a supressão da realização de ensaios mecânicos. Dessa forma não só se elimina os custos associados a esses testes, como também fica agilizada a logística de planejamento e produção da usina, já que se saberá de antemão, com nível razoável de certeza, se uma dada bobina a quente será aprovada ou não, sem a necessidade de se esperar pelo seu resfriamento e execução posterior de amostragem e ensaios.

Modelos matemáticos desse tipo já estão sendo comercializados, como é o caso do VAIQ-Strip.⁽¹⁾ Trata-se de um programa computacional de grande complexidade, já que ele precisa considerar os fenômenos metalúrgicos que ocorrem no material ao longo da linha de laminação, como o crescimento de tamanho de grão austenítico e solubilização de precipitados no forno de reaquecimento de placas, a evolução microestrutural ao longo da laminação a quente e a cinética de transformação austenítica ao longo da mesa de resfriamento e durante o resfriamento lento da bobina. Uma vez definida a microestrutura final é necessário calcular as propriedades mecânicas em função de correlações previamente estabelecidas. Modelos mais complexos também modelam a evolução de temperatura ao longo da espessura e largura do material. Além disso, o desenvolvimento do modelo requer a realização de experiências em laboratório ou mesmo em escala industrial para se determinar parâmetros quantitativos vitais para aferição e ajuste de seus resultados. Como se pode observar, trata-se de um esforço enorme que demanda muitos recursos técnicos, humanos e financeiros ao longo de vários anos de desenvolvimento.

Por outro lado, uma análise estatística criteriosa entre os parâmetros de processo da laminação de tiras a quente e as propriedades finais das bobinas pode revelar correlações interessantes entre eles. Obviamente o nível de precisão conseguido nas previsões quantitativas será bem inferior ao de um modelo metalúrgico pleno mas, pelo menos, ficam determinadas as diretrizes semi-quantitativas para atuação no processo para se produzir materiais com menor nível de dispersão em suas propriedades mecânicas ou para corrigir eventuais desvios. Este é o objetivo desse trabalho, voltado especificamente para o laminador de tiras a quente da Cosipa.

A literatura mostra as diversas correlações básicas que podem ser esperadas entre as variáveis de processo da laminação a quente, parâmetros microestruturais e propriedades mecânicas para aços de baixo C.⁽²⁻⁶⁾ O tamanho de grão austenítico ao final da laminação tende a ser inversamente proporcional à redução total aplicada à placa^(4,7) e à temperaturas de acabamento.⁽⁴⁾ O tamanho de grão ferrítico na bobina depende do condicionamento microestrutural da austenita que lhe deu origem no momento da entrada do material na mesa de resfriamento forçado,^(2,4) em termos de seu tamanho de grão e eventual grau de encruamento, bem como da temperatura de bobinamento.⁽⁴⁾ Por sua vez, a fração de perlita na microestrutura está associada ao carbono equivalente do material processado e da diferença entre as temperaturas de acabamento e bobinamento aplicadas.⁽⁴⁾

No caso de aços ao C-Mn a resistência mecânica é a somatória das contribuições de diversos mecanismos de endurecimento microestruturais à resistência

básica proporcionada pelos átomos de ferro, como tamanho de grão, solução sólida de elementos de liga e fração de perlita na microestrutura.⁽⁸⁾ A consagrada lei de Hall-Petch estabelece que a resistência mecânica é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho de grão. O efeito da solução sólida é diretamente proporcional aos teores dos elementos de liga, enquanto que a influência da perlita é descrita pela lei de mistura de fases microestruturais. No caso específico dos aços microligados há um mecanismo adicional de endurecimento, a precipitação interfásica dos elementos de microliga, cuja contribuição, a princípio, pode ser calculada pelo modelo de Ashby-Orowan. Contudo, o tamanho muito pequeno desses precipitados, o qual somente pode ser determinado através de laboriosos procedimentos de microscópica eletrônica de transmissão, impede a aplicação prática dessa correlação. Já a correlação entre ductilidade e microestrutura não é tão imediata, muito embora haja uma tendência no sentido de que todo mecanismo de endurecimento contribui para reduzir essa propriedade, a qual também é afetada pela presença de inclusões não-metálicas.⁽⁸⁾

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os dados necessários para este trabalho foram obtidos a partir de materiais processados no laminador de tiras a quente da Cosipa ao longo de um período de dois anos. Os dados relativos a aços C-Mn foram selecionados impondo-se as seguintes limitações nos teores de elementos de liga: $C \leq 0,25\%$; $Mn \leq 1,25\%$; $Si \leq 0,35\%$; $Cu, Cr, Mo, Ni \leq 0,09\%$; e $Nb, Ti, V \leq 0,009\%$. Também foram selecionados dados para aços microligados dentro das seguintes limitações: $C \leq 0,25\%$; $Mn \leq 2,25\%$; $Si \leq 0,50\%$; $Cu, Cr \leq 0,99\%$; $Nb, Ti, V \geq 0,010\%$; $B \leq 0,001\%$; e $Mo \leq 0,09\%$. Essas restrições tiveram como objetivo selecionar materiais exclusivamente com microestrutura ferrítica-perlítica.

Os seguintes dados de processo foram coletados a partir do sistema supervisor do Laminador de Tiras a Quente:

- . Análise Química: no caso dos aços C-Mn, os teores de C, Mn, P, S, Si, Al e N. Já para os aços microligados foram considerados, além desses elementos, Cu, Cr, Nb, Ti e V.
- . Forno: número da fila e tempo de aquecimento da placa.
- . Espessuras: da placa, do esboço na saída da última cadeira de esboçamento (R2) e da bobina a quente.
- . Temperaturas: de entrada no trem acabador, de acabamento (TA) e de bobinamento (TB).
- . Velocidade da tira na saída do última cadeira do trem acabador (F6).

A partir desses dados de processo foram calculados os graus de deformação real total placa-tira (DefTot) e os aplicados nas fases de esboçamento e acabamento, bem como a taxa média de resfriamento entre a saída do trem acabador e o bobinamento do material (VelResf). As propriedades mecânicas de cada bobina a quente (limite de escoamento e de resistência, mais alongamento total) foram obtidos a partir da base de dados corporativa da usina. O ponto de referência para coleta dos dados de processo da laminação de tiras a quente foi o local do esboço onde seria retirada a amostra a partir da qual são usinados os corpos de prova para os ensaios mecânicos. Essa coleta do tipo *Same Point* garante a correta associação entre os valores dos parâmetros de processo e os das propriedades mecânicas determinadas experimentalmente.

Os dados assim obtidos foram analisados estatisticamente para se detectar bobinas atípicas, seja por condições de processo fora do especificado ou por problemas na instrumentação que levaram a falhas ou erros nos valores medidos. A análise dos chamados *outliers* constou de levantamento de histogramas e *boxplots*, bem como da aplicação dos critérios multidimensionais de Mahalanobis e Cook. Ao final dessa depuração foram definidos os conjuntos finais para as análises de correlação, os quais eram constituídos de 5.456 bobinas a quente para aços C-Mn e 2.847 bobinas a quente para aços microligados.

A partir desses conjuntos de dados foram determinadas as correlações existentes entre as variáveis de composição química, processo de laminação e propriedades mecânicas através da determinação da matriz de Pearson e da análise de componentes principais. A seguir foram estabelecidas equações para cálculo das propriedades mecânicas a partir da composição química e parâmetros do processo de laminação através de regressão linear múltipla *stepwise*. Os parâmetros de avaliação da precisão das equações aqui obtidas foram o coeficiente de correlação linear r e o erro padrão da estimativa (E.P.E.). A contribuição relativa β^{rel} de cada variável independente na previsão da variável dependente foi calculada a partir dos coeficientes β determinados pelo programa de regressão linear múltipla, de acordo com a seguinte fórmula:

$$\beta_i^{rel} = \frac{|\beta_i|}{\sum_{i=1}^n |\beta_i|} \quad (1)$$

onde i é a variável independente em questão e n é o número de variáveis independentes da equação em questão.

Todos os procedimentos estatísticos citados neste trabalho foram executados usando-se o *software* estatístico comercial *Statística*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Aços ao C-Mn

A matriz de Pearson relativa aos aços C-Mn revelou que diversas variáveis independentes apresentaram correlação entre si, fato que representa um desvio em relação às condições ideais para o desenvolvimento das equações de correlação estatística. No caso da composição química foram verificadas correlações entre C x Mn ($r = 0,47$), C x Si ($r = 0,56$) e Mn x Si ($r = 0,59$). Isso é inerente à carteira de aços fabricados pela Cosipa. O mesmo ocorreu para VelResf, a qual apresentou correlação com DefTot ($r = 0,88$), TA ($r = 0,51$) e TB ($r = -0,65$). Outro aspecto a ser considerado é o fato da amplitude dos valores de cada variável ser relativamente estreita e bastante específica para as condições do processo que está sendo modelado. Como será visto mais adiante, esse fato pode comprometer o significado metalúrgico de algumas correlações obtidas, bem como a generalização de seu uso.

A matriz de Pearson também identificou as seguintes correlações significativas entre as propriedades mecânicas, composição química e parâmetros de processo relativos aos aços C-Mn:

- **Limite de Escoamento:** Mn ($r = 0,43$); Si ($r = 0,21$)

- **Limite de Resistência:** Mn ($r = 0,72$); C ($r = 0,66$); Si ($r = 0,60$); N ($r = 0,34$)
- **Razão Elástica:** C ($r = -0,38$); DefTot ($r = 0,30$); VelResf ($r = 0,26$); TB ($r = -0,22$)
- **Alongamento Total:** S ($r = -0,27$) e C ($r = -0,26$)

Esses resultados já permitem a elaboração de algumas conclusões. Dentro das condições específicas da laminação de tiras a quente de aços C-Mn da Cosipa, a resistência mecânica é basicamente função da composição química do aço, uma vez que a variação na magnitude dos parâmetros de processo foi pequena demais para impor sua influência. Ou seja, o processo de laminação encontra-se sob controle. Foi verificado o efeito do endurecimento por solução sólida (Mn, Si, N) e pela presença de perlita (C). Note-se que não houve correlação significativa entre o limite de escoamento e teor de C, já que nos aços com baixo teor desse elemento a perlita não afeta o valor dessa propriedade. A razão elástica apresentou correlações negativas com fatores que aumentam a fração de perlita (C, TB) e correlações positivas com fatores que refinam o tamanho de grão (DefTot, VelResf), o que está em concordância com os efeitos microestruturais sobre esse parâmetro mecânico⁷. O alongamento total apresentou correlações negativas com fatores que sinalizam aumento da fração de perlita (C) e de inclusões não-metálicas (S) na microestrutura, o que é coerente do ponto de vista metalúrgico.

Note-se que os valores de N usados nessa análise referem-se a seu valor total, uma vez que, infelizmente, não se dispunha de seu valor em solução que efetivamente contribui para o endurecimento por solução sólida⁸. Contudo, a boa correlação verificada entre seu teor total e o limite de resistência parece indicar que há relação direta entre os dois teores de N.

A figura 1 mostra o diagrama gerado pela análise de componentes principais relativa ao aço C-Mn. Pode-se observar nesse gráfico que o ponto associado ao limite de escoamento encontra-se isolado dos demais, o que indica que não houve correlações suficientemente fortes entre essa propriedade e a composição química e parâmetros de processo. Já no caso do limite de resistência pode-se observar que a localização dessa variável no diagrama está próxima das associadas aos teores de C, Mn e Si, como já havia sido verificado na matriz de Pearson. Por sua vez, os pontos relativos à razão elástica, TA, VelResf, DefTot e Al formam um aglomerado, o que indica correlação direta entre elas; a posição da temperatura de bobinamento tendeu a ficar no quadrante oposto ao ponto relativo à razão elástica, indicando correlação negativa entre elas. O mesmo ocorreu no caso do alongamento total, cuja localização está em quadrante oposto às posições do C, Mn e Si, elementos associados com maior fração de perlita na microestrutura e grau mais elevado de endurecimento por solução sólida. Como se pode observar, as constatações apontadas na matriz de Pearson se repetiram, em maior ou menor grau, na análise de componentes principais, com exceção do caso do limite de escoamento.

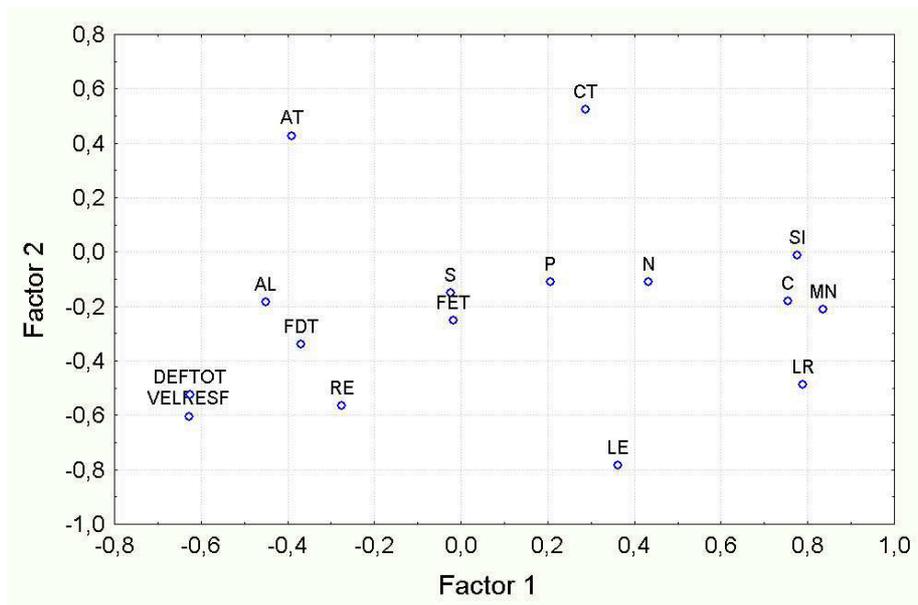


Figura 1: Diagrama gerado pela análise de componentes principais para o conjunto de dados relativo aos aços C-Mn.

A seguir foram determinadas equações para previsão das propriedades mecânicas a partir da composição química e parâmetros da laminação de tiras a quente através de regressão linear múltipla *stepwise*. Esse procedimento estatístico seleciona automaticamente as variáveis independentes mais relevantes, minimizando os efeitos da multicolinearidade decorrentes das correlações que existem entre elas. Contudo, sempre que possível, foram selecionadas as equações mais simples possíveis e que contivessem variáveis relevantes do ponto de vista metalúrgico, ainda que com ligeira perda da precisão estatística. A seguir são mostradas as variáveis mais relevantes incluídas nos modelos de regressão linear múltipla para cada propriedade mecânica, seu efeito qualitativo e contribuição relativa β^{rel} , bem como a precisão conseguida para a equação:

- **Limite de Escoamento:** Mn (\uparrow , 54%), DefTot (\uparrow , 32%), TB (\downarrow , 8%), N (\uparrow , 6%); $r = 0,61$; EPE = 30 MPa;
- **Limite de Resistência:** Mn (\uparrow , 37%), C (\uparrow , 22%), DefTot (\uparrow , 15%), Si (\uparrow , 10%), TB (\downarrow , 9%), N (\uparrow , 7%); $r = 0,82$; EPE = 17 MPa;
- **Razão Elástica:** C (\downarrow , 43%), DefTot (\uparrow , 27%), Mn (\uparrow , 18%), TB (\downarrow , 12%); $r = 0,47$; EPE = 0,05;
- **Alongamento Total:** C (\downarrow , 37%), S (\downarrow , 27%), Mn (\downarrow , 18%), DefTot (\downarrow , 12%); $r = 0,50$; EPE = 5%;

É interessante notar que as variáveis independentes selecionadas pela regressão linear múltipla *stepwise* não refletiram necessariamente as correlações previstas pela matriz de Pearson. Isso se deve ao fato da regressão linear *stepwise* fazer uma análise levando-se em conta, de forma simultânea, as correlações entre todas as variáveis envolvidas, enquanto que a matriz de Pearson reflete apenas a correlação isolada entre pares de variáveis. Dessa forma pode-se observar que algumas variáveis de processo foram incluídas nas equações para cálculo de todas as propriedades mecânicas consideradas, ainda que o efeito da composição química tenha sido majoritário em todos os casos, como indicam os valores de contribuição relativa β^{rel} .

Assim sendo, a somatória das contribuições relativas do Mn e N na definição do valor do limite de escoamento, muito provavelmente através de endurecimento por solução sólida, foi igual a 58%, ficando o restante em função de duas variáveis de processo, ou seja, DefTot e TB, que devem ter influenciado o tamanho de grão obtido. Fato similar ocorreu para o limite de resistência, onde o efeito conjunto do Mn, C, Si e N apresentou contribuição relativa de 76%, ficando DefTot e TB com os 24% restantes. Os mecanismos metalúrgicos envolvidos devem ser os mesmos verificados no limite de escoamento, mas o efeito de C e parte do Mn devem decorrer de seu efeito na elevação da fração de perlita na microestrutura^{4,8}.

A razão elástica, que nada mais é do que a razão entre o limite de escoamento e o de resistência, foi definida, como já era esperado, por uma equação que apresenta características híbridas em relação às duas anteriores. O efeito dos elementos de liga foi preponderante, com contribuição relativa de 61%, restando 39% à DefTot e à TB. A contribuição negativa do C pode ser atribuída à maior formação de perlita na microestrutura, que eleva mais o limite de resistência do que o de escoamento⁷, enquanto que a da TB está associada ao maior tamanho de grão que ela promove. O Mn eleva a razão elástica através de solução sólida e também pela redução no tamanho de grão, uma vez que ele abaixa a temperatura A_{r3} ; o efeito de DefTot também deve decorrer do maior refino de grão proporcionado por ele. Todos esses efeitos são coerentes com a literatura⁷.

A contribuição relativa dos elementos de liga no valor previsto de alongamento total foi de 88%, restando apenas 12% para DefTot. A contribuição de todas as variáveis independentes foi negativa e coerente com os princípios metalúrgicos, já que a ductilidade do material tende a ser prejudicada pela maior presença de perlita na microestrutura (associada com maior teor de C) ou de inclusões de sulfeto (associada ao teor de S), bem como pelo endurecimento por solução sólida (associada ao teor de Mn). Aqui o refino de tamanho de grão (associado ao teor de Mn e DefTot) também exerceu efeito negativo sobre o alongamento total, muito embora essa constatação não é unanimidade na literatura. As equações propostas por Pickering⁸ consideram positivo o efeito do tamanho de grão sobre a ductilidade do material, ao contrário de Morrison.⁽⁹⁾

É curioso notar que algumas variáveis de processo consideradas muito importantes, tais como TA e VelResf, não foram selecionadas pela regressão linear múltipla *stepwise*. Isso pode ser justificado pela alta correlação estatística existente entre as variáveis do processo de laminação a quente, bem como pelo fato de que suas amplitudes apresentarem valor restrito e, dessa forma, não provocarem alterações metalúrgicas significativas no material.

De toda forma, a capacidade preditiva dessas equações é limitada, seja em função das restrições impostas por seu caráter linear, seja pela dispersão inerente aos dados disponíveis para a análise. Os erros padrão da estimativa aqui obtidos para os limites de escoamento e resistência foram iguais a, respectivamente, 30 MPa e 17 MPa. Pode-se adotar como valores de *benchmarking* os resultados correspondentes obtidos pelo programa VAIQ-Strip que, no caso dos aços C-Mn, são iguais a, respectivamente, 17 MPa e 9 MPa.⁽¹⁾ Note-se, contudo, que a complexidade do VAIQ-Strip é imensa em comparação com equações desenvolvidas através de simples regressões lineares. É interessante notar que, para as duas abordagens de modelamento, a precisão dos resultados calculados diminuiu na seguinte ordem: limite de resistência, limite de escoamento e alongamento total.⁽¹⁰⁾ Provavelmente isso está diretamente associado aos erros de medida desses parâmetros durante os ensaios mecânicos.

3.2 Aços Microligados

Também os aços microligados apresentaram correlações significativas entre variáveis independentes: C x Mn ($r = 0,62$), C x Si ($r = 0,55$), Mn x Si ($r = 0,70$), Mn x Ti ($r = 0,54$), Si x Ti ($r = 0,46$) e Cu x Cr ($r = 0,99$). Mais uma vez isso é função da carteira de aços produzidos pela Cosipa, particularmente no último caso, onde todos os aços ao Cu incluem obrigatoriamente Cr. Também neste caso foi verificada correlações de VelResf com DefTot ($r = 0,84$), TB ($r = -0,52$) e TA ($r = 0,39$).

A matriz de Pearson identificou as seguintes correlações significativas entre as propriedades mecânicas e a composição química/parâmetros de processo para os aços microligados:

- **Limite de Escoamento:** Nb ($r = 0,71$); Ti ($r = 0,38$); Mn ($r = 0,36$)
- **Limite de Resistência:** Nb ($r = 0,74$); Si ($r = 0,68$); Ti ($r = 0,52$); C ($r = 0,47$)
- **Razão Elástica:** C ($r = -0,69$); Nb ($r = 0,57$); Si ($r = -0,40$); Mn ($r = 0,34$)
- **Alongamento Total:** S ($r = -0,42$) e VelResf ($r = 0,26$)

Este primeiro levantamento das correlações mostra que o efeito da composição química sobre as propriedades mecânicas foi muito maior do que o das variáveis de processo em relação ao que foi observado nos aços ao C-Mn. Particularmente o efeito do Nb foi avassalador, seguido com menor intensidade pelo Ti, provavelmente em decorrência do endurecimento que promovem por refino de tamanho de grão e por precipitação interfásica. O efeito do V não pôde ser constatado pois ele se encontrava presente em apenas 42 bobinas a quente, ou seja, insignificantes 1,5% da massa de dados. Também foi verificado o efeito de endurecimento por solução sólida (Mn, Si) e pelo aumento na fração de perlita (C). É interessante notar que o efeito do N não foi significativo para os aços microligados, fato que sinaliza que, neste caso, ele aparentemente se encontra totalmente precipitado, ao contrário do que parece ter ocorrido nos aços ao C-Mn.

No caso da razão elástica, o efeito de algumas variáveis foi metalurgicamente coerente: efeito negativo do C, decorrente da formação de maior fração de perlita; efeito positivo do Nb, por refino de tamanho de grão e precipitação, e do Mn, por refino do tamanho de grão e solução sólida⁸. Contudo, o efeito do Si sobre a razão elástica foi negativo, quando se esperava exatamente o contrário, em função de sua apreciável ação de endurecimento por solução sólida⁷. Uma possível explicação para esse fato é a forte correlação positiva entre Si e C, ou seja, os teores desses dois elementos tendem a ser diretamente proporcionais entre si no conjunto de dados analisado. Mas os efeitos do C e Si sobre a razão elástica são antagônicos. Portanto, essa reversão de expectativas pode ser justificada assumindo-se a premissa de que o efeito negativo do C sobre a razão elástica é superior ao efeito do Si. O efeito líquido negativo observado neste caso específico acaba sendo “emprestado” ao Si no momento de se calcular a correlação, um fato que é matematicamente legítimo mas metalurgicamente incoerente. Armadilhas desse tipo não são raras quando as variáveis independentes apresentam correlações entre si.

Também no caso do alongamento total os resultados obtidos possuem aspectos polêmicos. A influência negativa do S já era esperada, a exemplo do que ocorreu para os aços C-Mn. Contudo, o efeito positivo de VelResf é um aspecto a ser confirmado, já que a elevação desse parâmetro leva a tamanho de grão mais refinado, cujo efeito sobre a ductilidade apresenta alguma controvérsia.^(8,9) A explicação desse fenômeno requer investigações experimentais adicionais para verificar eventuais alterações na morfologia da microestrutura que podem ter ocorrido neste caso.

Infelizmente o sistema supervisor do laminador de tiras a quente não coleta dados de temperatura associados ao processo de reaquecimento de placas, um parâmetro muito importante no caso dos aços microligados, pois define o grau de solubilização de Nb. Por outro lado, deve-se notar que o tempo de reaquecimento da placa não apresentou correlações significativas com as propriedades mecânicas analisadas neste trabalho.

O gráfico gerado a partir da análise de componentes principais relativa aos aços microligados está mostrado na Figura 2. Pode-se observar nessa figura que os pontos associados ao limite de escoamento e o nióbio estão próximos, indicando a forte correlação positiva entre eles. No caso do limite de resistência observa-se que os pontos associados ao Mn, Ti, Si e C encontram-se próximos do limite de resistência, indicando o efeito positivo desses elementos de liga sobre essa propriedade. O ponto relativo ao Nb está próximo do associado à razão elástica, indicando seu efeito positivo sobre essa propriedade; por outro lado, os pontos associados ao C e Si encontram-se no quadrante oposto, indicando que possuem efeito negativo. Contudo, já se discutiu a pouco, o mais provável aqui é que o efeito negativo do Si sobre a razão elástica seja artificial, sendo decorrência da correlação estatística significativa entre seu teor e o do C. Já o ponto associado ao alongamento total está próximo dos relativos à velocidade de resfriamento e grau de deformação total, indicando seu efeito positivo sobre essa propriedade; por sua vez, os pontos associados ao S e Nb encontram-se em quadrantes opostos a dessa propriedade, sinalizando seu efeito negativo. Também no caso dos aços microligados houve relativa concordância entre as correlações propostas pela análise de componentes principais e a matriz de Pearson.

A aplicação de regressão linear múltipla *stepwise* ao caso dos aços microligados, aplicando-se a mesma abordagem já usada nos aços ao C-Mn, permitiu selecionar quais variáveis deveriam ser incluídas nas equações lineares para cálculo de cada propriedade mecânica. Os resultados obtidos são mostrados a seguir:

- **Limite de Escoamento:** Nb (↑, 45%), Mn (↑, 25%), Cu (↑, 14%), DefTot (↑, 13%), TB (↓, 3%); $r = 0,86$; EPE = 28 MPa;
- **Limite de Resistência:** Nb (↑, 27%), Mn (↑, 23%), C (↑, 19%), Cu (↑, 11%), DefTot (↑, 10%), Si (↑, 6%), TB (↓, 4%); $r = 0,93$; EPE = 21 MPa;
- **Razão Elástica:** Nb (↑, 45%), C (↓, 39%), DefTot (↑, 10%), Cu (↑, 6%); $r = 0,78$; EPE = 0,04;
- **Alongamento Total:** S (↓, 40%), Cu (↓, 23%), DefTot (↑, 17%), Nb (↓, 12%), C (↓, 8%); $r = 0,54$; EPE = 5%;

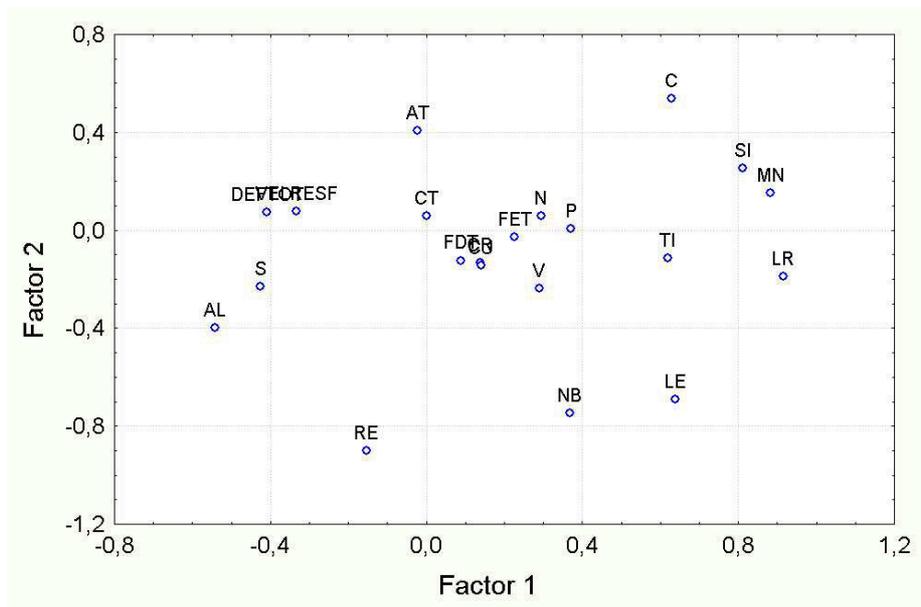


Figura 2: Diagrama gerado pela análise de componentes principais para o conjunto de dados relativo aos aços microligados.

Observa-se aqui, a exemplo do que já havia sido constatado na matriz de Pearson, o efeito preponderante do Nb na definição da resistência mecânica e, em menor grau, do alongamento total. Foi algo surpreendente observar o papel significativo do Cu na definição de todas as propriedades mecânicas aqui consideradas, uma vez que, a princípio, esse elemento é acrescentado aos aços da Cosipa apenas em virtude de seu efeito no aumento à corrosão atmosférica. Contudo, uma vez que todos os aços ao Cu aqui considerados também contêm Cr, é necessário cautela quanto a essa constatação. Note-se que o efeito de endurecimento sólido proporcionado pelo Cu na ferrita é da ordem de 39 MPa/%, enquanto que o do Cr é virtualmente nulo ou mesmo negativo; além disso, aços ao Cu também podem sofrer endurecimento por precipitação⁸. Portanto, seria necessária uma análise microestrutural comparativa entre aços com e sem Cu-Cr para se identificar com clareza as razões reais por trás do maior endurecimento observado nos aços contendo essa dupla de elementos de liga.

A exemplo do que se observou nos aços ao C-Mn, o Mn possui efeito significativo na resistência mecânica, ainda que com menor contribuição relativa; por outro lado, sua participação foi descartada no cálculo da razão elástica e do alongamento total. O Si também encontra-se presente na equação do limite de resistência, embora sua contribuição relativa seja bem menor. E, ao contrário do verificado para os aços ao C-Mn, o N deixou de ser um fator de influência para a definição do limite de resistência, conforme já havia sido revelado pela matriz de Pearson.

Já a contribuição relativa dos parâmetros de processo foi ainda menor nos aços microligados em relação ao que já havia sido observado nas ligas ao C-Mn. As variáveis DefTot e TB possuem efeito significativo na definição dos limites de escoamento e resistência, mas a segunda variável não foi incluída no cálculo da razão elástica de aços microligados, ao contrário do que havia ocorrido para os aços ao C-Mn.

É interessante notar que, no caso da equação para cálculo do alongamento total, o efeito de DefTot sobre o alongamento total foi positivo, ao contrário do que se verificou nos aços C-Mn. O aumento do grau de redução total geralmente implica no

refino do tamanho de grão do material, o que nem sempre se traduz em aumento de sua ductilidade.^(8,9) Esse fato já havia sido previsto na matriz de Pearson relativa aos aços microligados, onde o alongamento total havia apresentado correlação positiva significativa com VelResf, outro parâmetro de processo cujo aumento também leva ao refino do tamanho de grão. Relembre-se, por sinal, que DefTot e VelResf apresentam significativa correlação positiva entre si. A confirmação dessa constatação requer uma investigação experimental complementar.

Os erros padrão da estimativa obtidos para as equações de limite de escoamento e de resistência dos aços microligados foram iguais a, respectivamente, 28 e 21 MPa. É curioso notar que, em relação às equações aqui obtidas para os aços C-Mn, esse erro foi menor para o caso do limite de escoamento e maior para o limite de resistência. Os correspondentes valores de *benchmarking* para a precisão de cálculo dos limites de escoamento e de resistência, determinados pelo programa VAIQ-Strip,⁽¹⁾ foram respectivamente iguais a 18 e 13 MPa. Os motivos para essa discrepância entre os desempenhos do modelo deste trabalho e o do VAIQ-Strip já foram explicados no caso dos aços C-Mn.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo estabelecer correlações qualitativas e quantitativas entre as propriedades mecânicas de bobinas a quente, sua composição química e parâmetros de processo da laminação de tiras a quente para aços ao C-Mn e microligados, considerando-se as condições industriais da Cosipa. Essa meta foi conseguida através do uso de análise estatística multidimensional. No caso dos aços ao C-Mn foi verificado que os efeitos da composição química sobre tais propriedades tendem a ser mais significativos do que os dos parâmetros de laminação a quente. Neste caso as variáveis relevantes para a resistência mecânica foram os teores de Mn, C, Si e N, bem como o grau de deformação total placa-tira e a temperatura de bobinamento; no caso da ductilidade também o S teve papel significativo. Essas relações também foram observadas no caso dos aços microligados, ainda que neste caso o efeito do Nb tenha sido dominante, reduzindo ainda mais a influência dos parâmetros de processo de laminação a quente. O efeito do grau de redução total sobre a ductilidade foi diferente conforme o tipo de aço analisado, tendo sido negativo no caso dos aços ao C-Mn e positivo para os aços microligados.

REFERÊNCIAS

- 1 ANDORFER, J. et al. VAIQ-Strip, un Nouveau Système de Contrôle de Qualité pour les Bandes Laminées à Chaud. **La Revue de Metallurgie – CIT**, v. 95, n. 7, p. 883-882, Juillet-Août 1998.
- 2 CHOQUET, P. et al. Modelling of Forces, Structure and Final Properties During the Hot Rolling Process on the Hot Strip Mill. In: *Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel. Proceedings...* The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Hamilton, August 1990, p. 34-43.
- 3 PIETTE, M. & PERDRIX, Ch. An Integrated Model for Microstructural Evolution in the Hot Strip Mill and Tensile Properties Prediction of Plain and Microalloyed C-Mn Hot Strip. **Materials Science Forum**, v. 284-286, p. 361-368, 1998.
- 4 ARTIGAS, A. et al. Predicción de Propiedades Mecánicas y Microestructurales en Aceros Laminados en Caliente. **Revista de Metalurgia – CENIM**, v. 38, p. 339-347, 2002.

- 5 SHA, X.C. et al. Modelling Effect of Hot Rolling Process Variables on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Strip Steels. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 31, n. 2, p. 169-175, 2004.
- 6 YONGJUN, L.; DIANZHONG, L. & YIYI, L. Prediction of Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Steel Strip: Part I – Description of Models. **Steel Research International**, v. 75, n. 7, p. 462-467, July 2004.
- 7 GORNI, A.A. et al. Fatores que Afetam a Razão Elástica de Chapas Grossas de Aço Microligado. In: 39º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos. **Anais...** Associação Brasileira de Metais, Ouro Preto, Outubro de 2002, p. 207-216.
- 8 PICKERING, F.B. **Physical Metallurgy and the Design of Steels**. Applied Science Publishers, London, 1978, 275 p.
- 9 MORRISON, W. The Effect of Grain Size on the Stress-Strain-Relationship in Low-Carbon Steel. **Transactions of the ASM**, v. 59, 1966, p. 824-845.
- 10 JONES, D.M.; WATTON, J. & BROWN, K.J. Comparison of Hot Rolled Steel Mechanical Property Prediction Models Using Linear Multiple Regression, Non-Linear Multiple Regression and Non-Linear Artificial Neural Networks. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 32, n. 5, 2005, p. 435-442.