

# FATORES QUE AFETAM A RAZÃO ELÁSTICA DE CHAPAS GROSSAS DE AÇO MICROLIGADO <sup>1</sup>

Antonio Augusto Gorni <sup>2</sup>  
Flávio Viana de Freitas <sup>3</sup>  
Jackson Soares de Souza Reis <sup>4</sup>  
José Herbert Dolabela da Silveira <sup>5</sup>  
Celso Gomes Cavalcanti <sup>6</sup>

## RESUMO

As chapas grossas de aço microligado grau API com razão elástica muito alta, acima de 0,90, tendem a apresentar efeito mola (*springback*) durante a conformação do tubo, prejudicando a produtividade do processo. O objetivo deste trabalho foi identificar as principais causas que elevam o valor de razão elástica desses materiais, incluindo o efeito do projeto de liga, microestrutura e processo de laminação. Foi constatado que microestruturas ferrítico-perlíticas tendem a favorecer a ocorrência de altos valores de razão elástica, os quais aumentam com o endurecimento por refino de grão, solução sólida e precipitação; contudo, foi constatado que o aumento da fração de perlita diminui essa razão. Os parâmetros de processo afetam o valor de razão elástica conforme seu efeito na microestrutura do material. Essa razão tende a se elevar quando se usa maiores temperaturas de reaquecimento, uma vez que solubilizam maiores quantidades de elementos microligantes, aumentando o grau de endurecimento por precipitação; o mesmo ocorre para maiores graus de redução total e menores temperaturas de acabamento, que tendem a refinar a microestrutura.

**Palavras-Chave:** Razão elástica, aços microligados, laminação controlada.

---

<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado ao 39º Seminário de Laminação- Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Ouro Preto MG, 23 a 25 de Outubro de 2002.

<sup>2</sup> Sócio da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng., D. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>3</sup> Sócio da ABM. Engenheiro Metalurgista, Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>4</sup> Sócio da ABM. Engenheiro Metalurgista e de Qualidade, Gerente do Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>5</sup> Sócio da ABM. Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Gerente da Laminação de Tiras a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>6</sup> Sócio da ABM. Técnico Metalurgista, Analista de Produto da Gerência de Assistência Técnica, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

## - Introdução

Uma característica que vem assumindo crescente importância em chapas grossas destinadas à fabricação de tubos de grande diâmetro é a chamada *razão elástica*, ou seja, a razão entre seu limite de escoamento e de resistência. Quanto mais baixo for esse valor, menor será a tendência ao aparecimento do chamado *efeito mola* (“*spring-back*”) durante a conformação do tubo. Esta é uma ocorrência indesejável, onde a chapa que está sendo conformada não assume o formato desejado, “saltando” da matriz [1]. Por essa razão, os fabricantes de tubos geralmente limitam a razão elástica de chapas graus API 5L X60 a X65 em torno de 90%. Outro tipo de aplicação onde a razão elástica é uma propriedade relevante está na construção de prédios resistentes a terremotos. Neste caso os materiais devem apresentar baixa razão elástica, bem como dispersão restrita nos valores de limite de escoamento [2]. Um baixo valor de razão elástica proporciona maior capacidade de deformação plástica ao aço, evitando a ruptura das vigas que sustentam o prédio por ocasião de um abalo sísmico.

A restrição aos valores de razão elástica é um fenômeno relativamente recente. Por essa razão, a maioria dos trabalhos publicados na literatura sobre o desenvolvimento de aços microligados para tubos de grande diâmetro não trata especificamente sobre os efeitos da composição química, microestrutura e parâmetros de processo sobre a razão elástica. De maneira geral, o limite de escoamento é definido pela densidade de discordâncias móveis presentes na microestrutura, enquanto que o limite de resistência está ligado a mecanismos de endurecimento, tais como os proporcionados por solução sólida e fração volumétrica de segunda fase [3,4].

## - Efeitos da Microestrutura

As chapas grossas destinadas à fabricação de para tubos de grande diâmetro produzidos atualmente na COSIPA conforme as normas API X60 e X70 apresentam microestrutura ferrítico-perlítica. Trata-se de uma abordagem de custo relativamente baixo, pois prescinde de elementos de liga caros ou raros, bem como equipamentos para resfriamento acelerado após laminação. Por outro lado, elas apresentam razão elástica bastante alta.

As microestruturas ferrítico-perlíticas podem ser descritas basicamente pelo seu *tamanho de grão* e *fração volumétrica de perlita* que contém. O limite de escoamento é definido primordialmente pela fase mais macia, a ferrita, que será a primeira a se deformar, dada sua facilidade em iniciar e multiplicar discordâncias móveis. Já os mecanismos metalúrgicos que definem o limite de resistência são diferentes. Esse último parâmetro mecânico é mais influenciado pelo endurecimento por solução sólida, fração volumétrica de segunda fase e a razão entre os coeficientes de encruamento das duas fases presentes na microestrutura. Ou seja, ele é definido pelo agregado global de fases que constituem o material [3-6]. Ambos influenciam a razão elástica: enquanto que um maior refino de grão aumenta essa característica do material, o aumento na fração volumétrica de perlita tem efeito oposto, pois só eleva o limite de resistência do material, sem afetar seu limite de escoamento [7-10]. Esses efeitos podem ser vistos respectivamente nas figuras 1 e 2.

Por outro lado, há microestruturas cuja razão elástica é relativamente independente do limite de resistência. Elas constituídas predominantemente de ferrita acicular ou bainita. Também as chamadas microestruturas bifásicas (*dual phase*) apre-

sentam baixos valores de razão elástica, pois elas dispõem de maior proporção de discordâncias móveis que tendem a facilitar o escoamento do material [4,11]. O chamado aço bainítico com teor extra-baixo de C (*ULCB, ultra-low-carbon bainite*) é outro exemplo desta abordagem, apresentando limite de escoamento entre 560 e 590 MPa, limite de resistência entre 785 e 805 MPa e razão elástica entre 72 e 74%. Como se pode observar, é um valor bastante baixo de razão elástica, considerando que o material apresenta níveis de resistência típicos de material destinado à produção de tubos API 5L X80 [12].

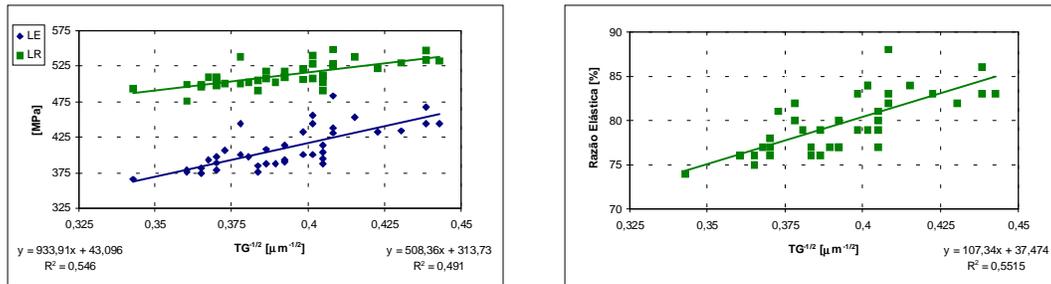


Figura 1: Efeito do refino de grão, conseguido através do aumento do grau de redução total placa/chapa, sobre o limite de escoamento, de resistência e razão elástica de um aço microligado ao NbTi [7,8].

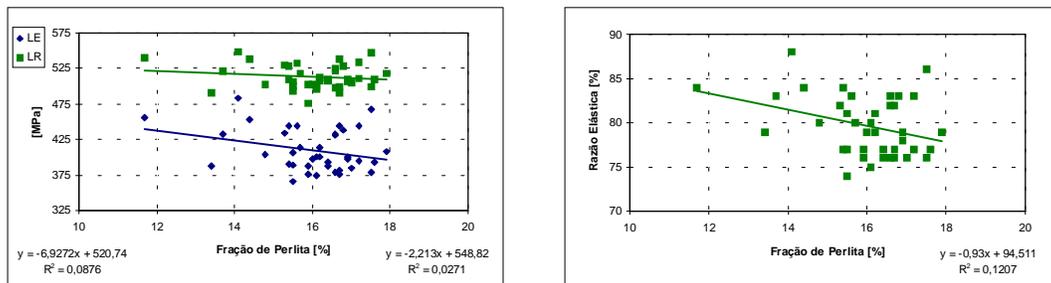


Figura 2: Efeito da fração volumétrica de perlita sobre a resistência mecânica e razão elástica de aços microligados ao NbTi [7,8].

Elementos de liga dissolvidos na matriz ferrítica do aço aumentam tanto o limite de escoamento como o de resistência por efeito de *solução sólida*. Seu efeito endurecedor é proporcional à diferença entre seus diâmetros atômicos e apresenta uma relação linear com a raiz quadrada do valor da concentração em peso do elemento. Contudo, em função da pequena faixa de valores observados, é mais comum usar-se uma relação linear diretamente com o valor da concentração [5]. Em tese os elementos intersticiais apresentam grande efeito endurecedor, dada a grande diferença entre seus diâmetros atômicos e o dos átomos de ferro. O C provoca uma distorção tetragonal no reticulado da ferrita, a qual interage de forma intensa com todos os tipos de discordâncias e explica seu alto poder endurecedor na forma de solução sólida [13]. Contudo, na prática, sua influência é pequena devido à sua solubilidade limitada na ferrita, que é da ordem de 0,008%. Já os elementos substitucionais apresentam menor efeito endurecedor, uma vez que o valor de seu diâmetro atômico está mais próximo ao do ferro.

A maioria dos elementos de liga, como C, N, Cr e Ni, tendem a abaixar a razão elástica, particularmente os dois primeiros. O silício possui efeito neutro, enquanto que o Mn e Cu apresentam efeito no sentido de elevar a razão elástica. Obvia-

mente tais efeitos decorrem exclusivamente da ação da solução sólida. Isso nem sempre é visto na realidade, uma vez que a presença de elementos de liga podem modificar a microestrutura de forma tal a exercer outros efeitos sobre a resistência mecânica do aço [13].

Os elementos de liga capazes de formar compostos intermetálicos que se precipitam na ferrita durante o resfriamento do laminado a quente também contribuem significativamente para o endurecimento do material. Este fato foi constatado para aços microligados ao Nb, NbTi e NbV [14]. A precipitação de carbonitreto de elementos de microliga, provocada por um tratamento de envelhecimento a 600° C por uma hora, elevou significativamente a razão elástica desses materiais, conforme mostram os dados da tabela III. No caso mais drástico, o do aço ao Nb, a razão elástica passou de 0,77 para 0,95. O valor significativamente baixo da razão elástica desses aços no estado bruto de laminação, apesar de apresentarem resistência mecânica equivalente de chapas API X-60 a X-80, decorre de sua microestrutura bainítica.

### - Efeito dos Parâmetros de Processo de Laminação Controlada

Os parâmetros de processo de laminação controlada atuam decisivamente na definição da microestrutura final do material, cujas características, por sua vez, definirão a razão elástica do produto final.

Os resultados observados na literatura indicam que, quanto maior forem a temperatura e o tempo de permanência da placa no interior do forno de reaquecimento, mais elevada será a razão elástica do material [15]. Tal fato já era esperado: quanto maior o tempo de reaquecimento, maior será a temperatura a que a placa será progressivamente submetida, aumentando o grau de solubilização dos elementos de microliga, particularmente Nb e Ti, pois o V se solubiliza completamente sob temperaturas muito mais baixas, da ordem de 900° C. O maior teor de elementos de microliga solubilizados promoverá maior precipitação de carbonitreto na ferrita durante o resfriamento do laminado. Como já foi visto neste trabalho, o endurecimento por precipitação tende a aumentar a razão elástica do material.

A comprovação deste fato pôde ser observada na COSIPA durante a laminação de chapas grossas ao NbTi, grau API X-60. A figura 3 mostra que efetivamente maiores tempos de enformamento levaram à elevação dos limites de escoamento e resistência, bem como da razão elástica.

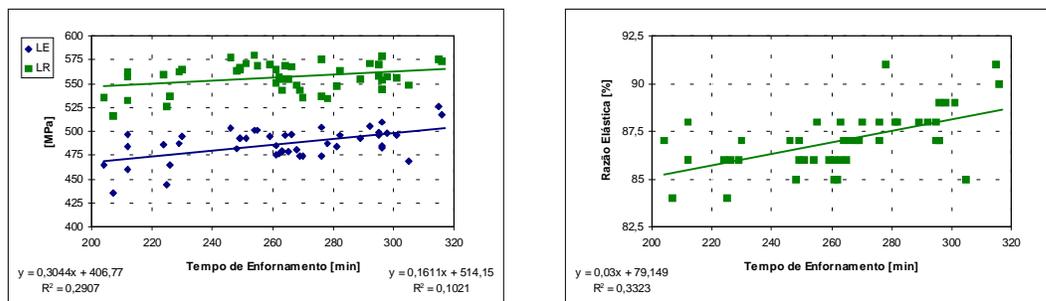


Figura 3: Elevação dos limites de escoamento e resistência, bem como da razão elástica, provocada pelo aumento da temperatura de reaquecimento antes da laminação controlada de material API X60 ao NbTi na COSIPA.

Um maior *grau global de deformação a quente*, placa/chapa, tende a refinar a microestrutura em função ao maior número de ciclos de encruamento/recristalização que ocorre ao longo do esquema de passes. Como já foi visto anteriormente, quanto menor o tamanho de grão, maior a razão elástica do material. Isto foi confirmado na prática industrial da COSIPA, como foi verificado numa experiência onde se variou o grau de redução total, obtendo-se chapas de diversas espessuras a partir de placas de aço ao NbTi com dimensões idênticas [7,8]. Como se pode observar na figura 4, o aumento do grau de redução total levou ao refino de grão do produto final, aumento dos limites de escoamento e resistência e também da razão elástica.

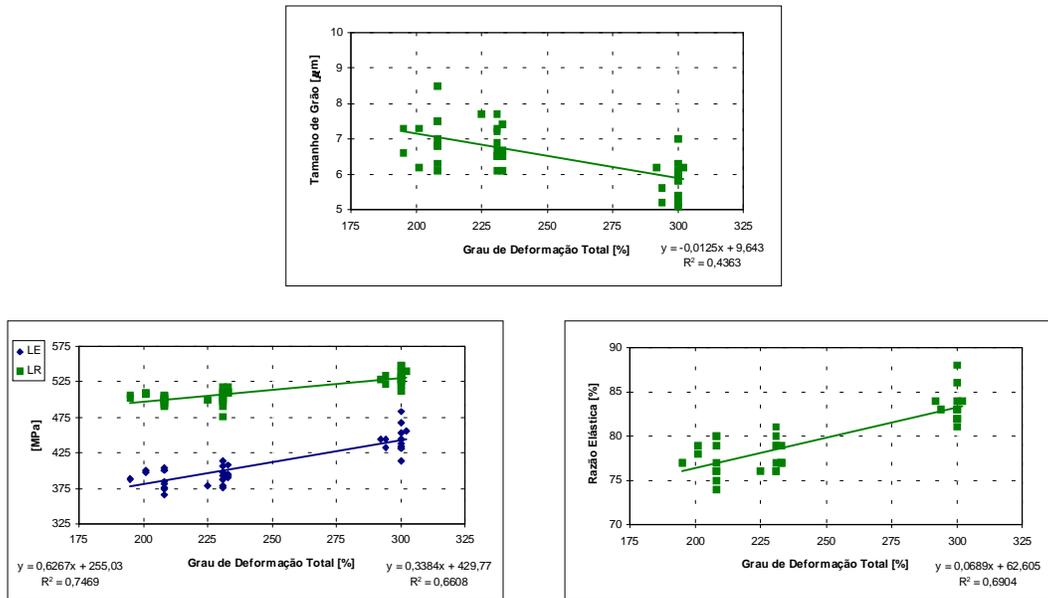


Figura 4: O aumento do grau de deformação a quente total (placa/chapa) leva ao refino da microestrutura e, conseqüentemente, aumento da resistência mecânica e da razão elástica. Dados para chapas ao NbTi processadas por laminação controlada [7,8].

Os resultados obtidos na prática industrial da COSIPA [7,8] também revelam que o aumento do *grau de redução aplicado na fase de acabamento* da laminação controlada (ou, dito de outra forma, o aumento da espessura de espera) tende a elevar a razão elástica do produto. Mais uma vez, esse efeito deriva do efeito de refino de grão proporcionado pelo aumento do grau de deformação a quente aplicado durante a fase de acabamento da laminação controlada. O gráfico da figura 5 mostra o efeito do aumento desse grau de redução sobre o tamanho de grão final, a resistência mecânica e a razão elástica de um aço ao NbTi. Por outro lado, os resultados também indicam que o efeito do grau de redução aplicado na fase de acabamento da laminação controlada exerce pouco efeito na razão elástica de chapas grossas relativamente leves, com até 25,4 mm. O efeito só foi significativo para materiais mais pesados como, por exemplo, produtos com bitola de 32 mm [7,8].

Como se sabe, a *temperatura final ou de acabamento da laminação controlada* de um aço microligado afeta tanto sua microestrutura como suas propriedades mecânicas. Já seu efeito preciso nem sempre pode ser previsto com certeza, pois há casos onde seus efeitos parecem ser contraditórios [15-17]. Há uma série de razões

para esse comportamento ambíguo, que normalmente se encontram associadas às ligas e condições de processamento específicas que foram empregadas em cada estudo.

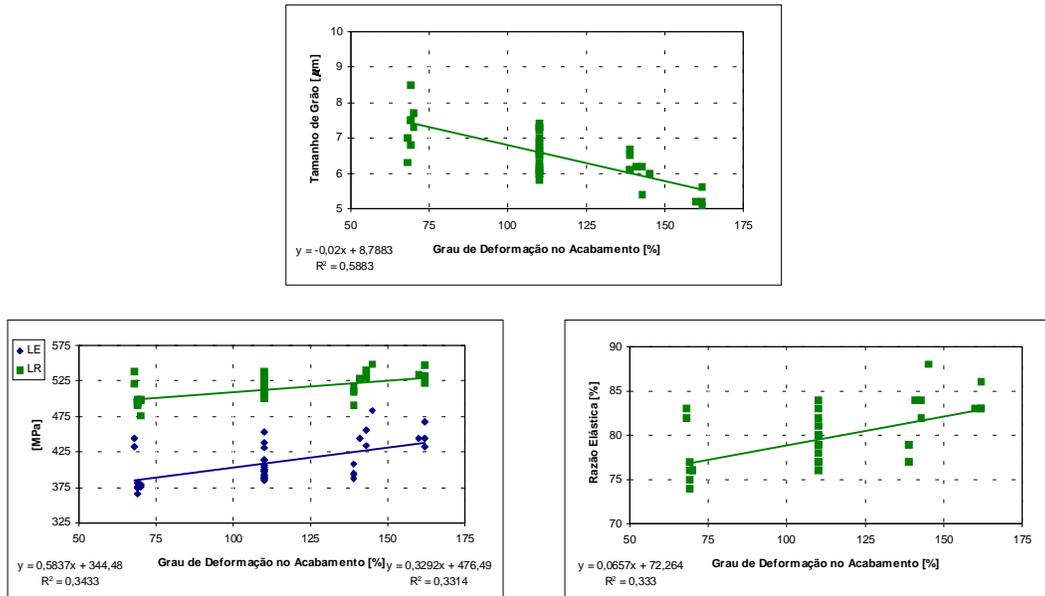


Figura 5: Refino de grão e elevação da resistência mecânica e razão elástica provocada pelo refino de grão decorrente da aplicação de maior grau de redução a quente durante a fase de acabamento. Dados para chapas ao NbTi processadas por laminação controlada [7,8].

Um ponto fundamental a ser considerado é a temperatura abaixo da qual começa a ocorrer a transformação da austenita em ferrita no laminado, ou seja, o chamado ponto  $Ar_3$ . A laminação intercrítica, que é executada abaixo dessa temperatura, afeta significativamente as propriedades do material. Logo, os efeitos da temperatura de acabamento sobre o esboço dependerão se o final da laminação ocorrer acima ou abaixo de  $Ar_3$ . Eles serão discutidos a seguir, a partir das conclusões da bibliografia a respeito [15-17], que foram deduzidas predominantemente a partir de ensaios laboratoriais.

Um abaixamento da temperatura de acabamento tende efetivamente a elevar tanto o limite de escoamento como o de resistência do material. Esse efeito tende a ser intensificado se ocorrer deformação na região intercrítica, ou seja, abaixo da temperatura  $Ar_3$ . Neste caso, a ferrita que se forma durante a deformação sobre um encruamento progressivo sem restauração significativa posterior, o qual aumenta acentuadamente a resistência mecânica do material.

A variação da razão elástica com a temperatura de acabamento também depende se o final da laminação ocorreu acima ou abaixo de  $Ar_3$ . Caso o acabamento se dê com o material ainda totalmente austenítico, sob temperaturas acima de  $Ar_3$ , há tendência da razão elástica subir com o abaixamento da temperatura de acabamento [16,17]. Contudo, no caso da laminação intercrítica, foram constatados resultados contraditórios na literatura para aços ao Nb; poderia ocorrer tanto aumento [15] como abaixamento [16] desse parâmetro. A causa dessa ambigüidade não ficou clara, mas pode estar relacionada com as condições específicas de composição química e processamento da liga.

Um estudo efetuado pela COSIPA para verificar o efeito da temperatura de acabamento sobre as características de um aço microligado ao NbTi, e que já foi citado neste trabalho dentro do tópico sobre o efeito do tamanho de grão sobre a razão elástica [9], confirmou os resultados vistos nos parágrafos anteriores: a redução da temperatura de acabamento de 950 para 750° C refinou o tamanho de grão ferrítico, elevou a resistência mecânica e a razão elástica, conforme mostrado na figura 6.

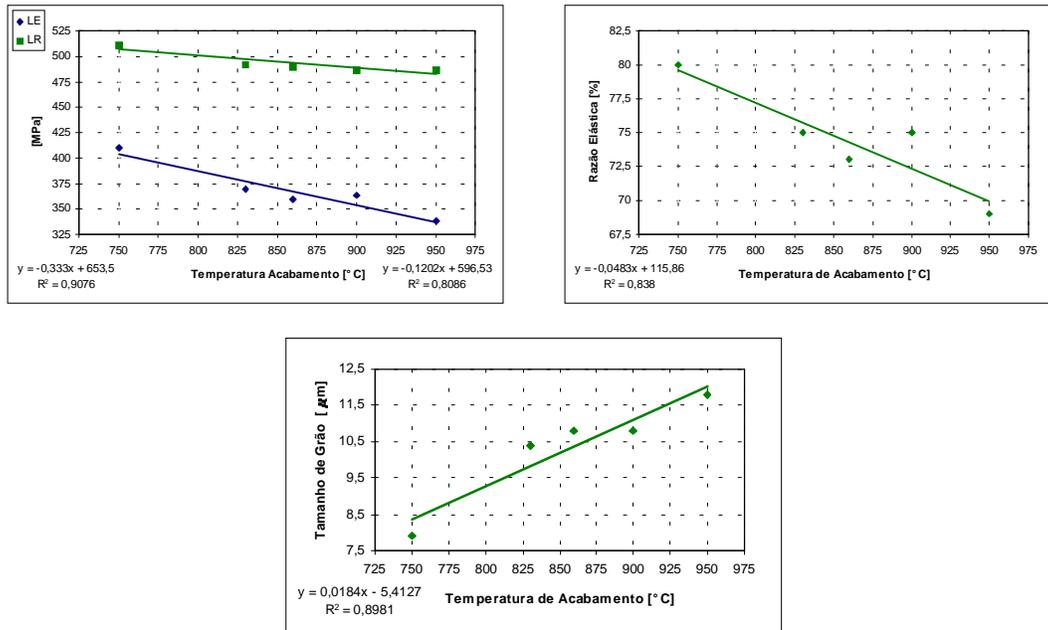


Figura 6: Refino de grão e elevação da resistência mecânica e razão elástica provocada pelo refino de grão decorrente da aplicação menores temperaturas de acabamento. Dados para chapas ao NbTi processadas por laminação controlada [9].

Os efeitos da temperatura de acabamento sobre as propriedades mecânicas também foram bastante significativos. No caso do limite de escoamento, o abaixamento da temperatura de acabamento de 950 para 750° C levou a um aumento de 338 a 410 MPa nesse parâmetro. Isto representa uma variação média de 7 MPa a cada 20° C de alteração na temperatura de acabamento.

Efeito similar também foi verificado no limite de resistência. O abaixamento da temperatura de acabamento de 950 para 750° C fez com que esse parâmetro se elevasse de 487 para 511 MPa, ou seja, uma elevação de 2,5 MPa a cada 20° C de redução naquela temperatura. Como se pode observar, o efeito da temperatura de acabamento sobre o limite de resistência foi bem menor do que o observado para o limite de escoamento, fato confirmado pela literatura em geral [15-17]. Esse maior efeito da temperatura em acabamento sobre o limite de escoamento em comparação com o de resistência promove aumento da razão elástica do material. É justamente o que se observa na figura 6, onde o abaixamento da temperatura de acabamento de 950 para 750° C levou a um aumento na razão elástica do aço, que passou de 69 para 80%.

## - Conclusões

As informações encontradas na literatura e os resultados industriais obtidos na COSIPA permitiram identificar os fatores ligados ao material e processo que afetam a razão elástica de chapas grossas feitas de aço microligado e processadas por laminação controlada. Os materiais com microestrutura ferrítico-perlítica tendem a apresentar razão elástica muito alta, que é superior a 0,85 no caso dos materiais destinados à fabricação de tubos de grande diâmetro, como os que atendem à especificação API 5L X60 ou graus superiores. O refino de grão e a precipitação na ferrita, mecanismos de endurecimento típicos desse tratamento termomecânico, tendem a elevar ainda mais a razão elástica. Logo, para uma dada liga, os parâmetros de processo da laminação controlada devem ser escolhidos criteriosamente para se obter a faixa desejada de valores de razão elástica.

## - Referências Bibliográficas

1. MARRON, G. et al. Revue de Metallurgie, Jan. 1995, 121-130.
2. OHASHI, M. et al. Nippon Steel Technical Report, Jan. 1990, 8-20.
3. SHIKANAI, N. e outros. Nippon Kokan Technical Review, 54/1988, 1-7.
4. BEJAR, L. e outros. In: Low Carbon Steels for the 90's. PROCEEDINGS. American Society for Metals/The Metallurgical Society, Pittsburgh, October 1993.
5. PICKERING, F.B. Physical Metallurgy and the Design of Steels. Allied Science Publishers, London, 1978. 275 p.
6. MITCHELL, P.S. e outros. In: Low Carbon Steels for the 90's. PROCEEDINGS. ASM/TMS, Pittsburgh, October 1993.
7. GORNI, A.A. e outros. In: L Congresso Anual da ABM. ANAIS. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Pedro, 1995.
8. GORNI, A.A. e outros. In: XXXII Seminário de Laminação da ABM. ANAIS. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Curitiba, 1995.
9. GORNI, A.A. e outros. In: XXXII Seminário de Laminação da ABM. ANAIS. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, 1997.
10. IRVINE, K.J. e outros. Journal of the Iron and Steel Institute, Feb. 1967, 161-182.
11. GORNI, A.A. & BRANCHINI, O.L.G. In: Seminário de Conformação Mecânica. ANAIS. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1990.
12. GORNI, A.A. e outros. In: LIV Congresso Anual da ABM. ANAIS. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 1999.

13. HONEYCOMBE, R.W.K. Steels: Microstructure and Properties, Edward Arnold, London, 1981.
14. MASSIP, A. e outros. Stahl und Eisen, 21 Sept. 1978, 989-996.
15. PAWELSKI, O. et al. Untersuchung der Thermomechanischen Behandlung beim walzen von hochfesten Baustählen zur Verbesserung ihrer mechanischen und technologischen Eigenschaften, Forschungsbericht T83-083, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, Mai 1983. 237 p.
16. TAMURA, I. et al. Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steels. Butterworths, London, 1988. 248 p.
17. HAUMANN, W. e outros. Verringerung der Streubreite der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Warmgewalzen Baustählen. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, April 1983. 139 p.

# FACTORS INFLUENCING THE YIELD RATIO OF MICROALLOYED PLATE STEELS <sup>1</sup>

Antonio Augusto Gorni <sup>2</sup>  
Flávio Viana de Freitas <sup>3</sup>  
Jackson Soares de Souza Reis <sup>4</sup>  
José Herbert Dolabela da Silveira <sup>5</sup>  
Celso Gomes Cavalcanti <sup>6</sup>

## ABSTRACT

API grade microalloyed plate steels with very high yield ratios, above 0,90, have a increased tendency to show springback during tube forming, a defect which impairs process efficiency. The aim of this work was to identify the main causes that promotes high yield ratio values in microalloyed steels, including the effect of alloy design, microstructure and controlled rolling process. It was verified that ferritic-perlitic microstructures tend to promote high values of yield ratio, which are increased even more with grain size refining, solid solution and precipitation hardening. However, it was also verified that this ratio is decreased by an increase in the amount of pearlite in microstructure. The yield ratio increases with higher reheating temperatures, as this condition implies in a higher amount of solubilized microalloying elements, thus increasing precipitation hardening. A similar effect is observed for higher total strain degrees and lower finishing temperatures, that tend to refine microstructure.

**Keywords:** Yield ratio, microalloyed steels, controlled rolling.

---

<sup>1</sup> Paper to be presented at the 39° Rolling Seminar - Processes, Rolled and Coated Products, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Ouro Preto MG, October 23 to 25, 2002.

<sup>2</sup> ABM Member. Materials Engineer, M. Eng., D. Eng., Process Analyst, Hot Rolling Technical Support Section, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>3</sup> ABM Member. Metallurgical Engineer, Process Analyst, Hot Rolling Technical Support Section, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>4</sup> ABM Member, Metallurgical and Quality Engineer, Manager of the Hot Rolling Technical Support, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>5</sup> ABM Member. Metallurgical Engineer, M. Eng., Manager of the Hot Strip Mill, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

<sup>6</sup> ABM Member. Metallurgical Technician, Product Analyst, Technical Assistance Section, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.