

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO MICROLIGADO LAMINADO UTILIZANDO TMCP E RESFRIAMENTO ACELERADO COM DIFERENTES PLANOS DE PASSE DE DESBASTE EM UM LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE STECKEL *

João Júnio Pereira Lino ¹
 Jorge Adam Cleto Cohn ²
 Alisson Paulo de Oliveira ³
 Altair Lúcio de Souza ⁴
 Cleiton Arlindo Martins ⁵
 Willy Schuwarten Júnior ⁶
 Geraldo Lúcio de Faria ⁷

Resumo

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a influência da laminação de desbaste durante o processo de laminação termomecânica de um aço microligado ao Nb, Ti e V, obtido em um laminador Steckel, nas suas propriedades mecânicas. Duas variações do plano de passe para realização da laminação de desbaste foram propostas. As variações consistiram na diferenciação da redução passe a passe de forma a obter diferentes refinamento de grão ao fim do processamento de desbaste. O processamento de um aço com composição química adequada à obtenção de propriedades mecânicas compatíveis com o grau LNE380 especificado na norma ABNT NBR 6656 é demonstrado. Foram alcançados limites de escoamento a 0,2% de deformação e a resistência à tração na condição 1 de 459MPa e 563MPa e na condição 2 de 505MPa e 601MPa respectivamente, sendo que na condição 2 foram obtidos acréscimos de em torno de 40MPa em ambos LE e LR.

Palavras-chave: Laminador Steckel; Laminação Termomecânica; Propriedades Mecânicas, Aço Microligado, LNE380, Laminação de Desbaste.

MECHANICAL PROPERTIES OF A MICROALLOYED STEEL ROLLED USING TMCP AND ACCELERATED COOLING WITH DIFFERENT ROUGHING PASS SCHEDULE IN A STECKEL HOT STRIP MILL

Abstract

This paper has the objective to demonstrate the influence of roughing phase during the thermomechanical rolling of a Nb, V and Ti microalloyed steel, obtained in a Steckel Mill, in its mechanical properties. Two roughing pass schedule variations was proposed. The variation of the schedules consisted in different reductions pass to pass in the way to obtain different grain refinement after roughing process. The processing of a steel with chemical composition favorable to achieve compatible mechanical properties to LNE380 steel specified by ABNT NBR 6656 standard is demonstrated. Were achieved yield strength at 0,2% strain and tensile strength with the condition 1 of 459MPa and 563MPa respectively, and with the condition 2 of 505MPa and 601MPa respectively. The condition 2 presented around 40 MPa plus in both YS and UTS properties.

Keywords: Steckel Mill; Thermomechanical Rolling; Mechanical Properties, Microalloyed Steel, LNE380, Roughing.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia de Materiais, Assessor Técnico, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia, Consultor Técnico, Pesquisa e Desenvolvimento Aços Planos, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Assessor Técnico, Pesquisa e Desenvolvimento da Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco-MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Metalurgia, Assessor Técnico, Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Mecânica, Assessor Técnico, Pesquisa e Desenvolvimento da Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco-MG, Brasil.

⁶ Engenheiro Mecânico, Mestre em Metalurgia, Gerente da Laminação de Tiras a Quente, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil

⁷ Físico, Dr. em Engenharia de Materiais, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais e Brasil..

1 INTRODUÇÃO

A indústria do aço tem demandado cada vez mais aços de alta resistência mecânica, elevada tenacidade a baixas temperaturas, ductilidade e boa soldabilidade [1]. A necessidade de utilização de aços de maior resistência mecânica e tenacidade é reforçada também pela sua viabilidade econômica, uma vez que custos menores para transporte, fabricação e instalação são conseguidos [2].

A norma ABNT NBR 6656 estabelece requisitos para fabricação de bobinas e chapas de aço laminadas a quente nas espessuras entre 2 a 16mm, de aço carbono e baixa liga, para aplicação em peças de conformabilidade crítica, onde requisitos de propriedades mecânicas e de soldabilidade são fundamentais, como longarinas, travessas e suportes [3].

O aço LNE380, especificado na norma ABNT NBR 6656, é utilizado principalmente no setor automotivo para construção de longarinas. Tem como característica, boa conformabilidade a frio e boa soldabilidade [4]. Este aço é obtido por intermédio da laminação termomecânica.

A adição de microligantes associada à laminação termomecânica tem a principal função de promover o refino de grãos e da microestrutura do aço de forma a se obter resistência mecânica e tenacidade melhoradas no produto como laminado a quente [2].

A deformação sucessiva do grão austenítico a temperaturas abaixo da Temperatura de não recristalização promove um empanqueamento do grão. O achatamento destes grãos e as bandas de deslizamento geradas levam a uma maior quantidade de sítios para nucleação de grãos ferríticos [2].

A laminação termomecânica segue uma estratégia bem definida onde as reduções (graus de deformação plástica), temperaturas e etapas são controladas para produção do aço conforme requisitos. As etapas do processamento termomecânico são o reaquecimento da placa, laminação de desbaste, espera, laminação de acabamento e resfriamento acelerado [5]. O processo de laminação termomecânica está ilustrado na Figura 1.

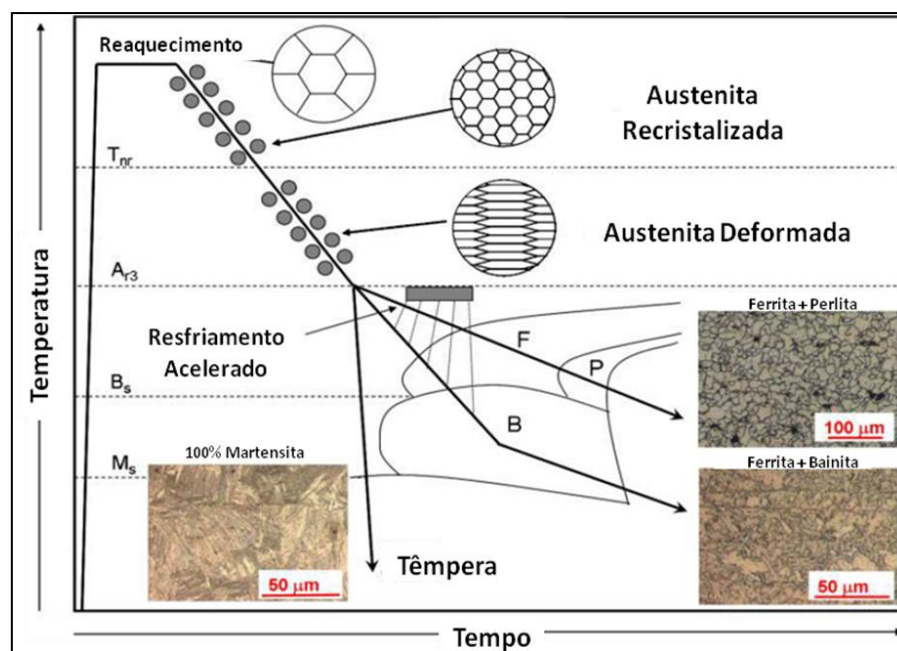


Figura 1. Figura esquemática que ilustra algumas etapas da laminação controlada de aços [5]

1.1. Etapas do Processamento Termomecânico

O processo de reaquecimento das placas é uma etapa necessária para a laminação de tiras a quente. No processamento termomecânico, a etapa de reaquecimento é definida de forma que seja promovido i) o amaciamento do material para diminuição das cargas de laminação; ii) austenitização completa em todas as direções e iii) a dissolução completa dos diversos compostos precipitados de forma a atuar na supressão da recristalização, quando em solução sólida na austenita, e impedindo o crescimento dos grãos pelo ancoramento das discordâncias quando na forma de precipitados. A temperatura de encharque para as placas de aços microligados é definida com base na temperatura mínima para solubilização dos precipitados. Esta temperatura depende da composição química do precipitado e dos teores de elementos de liga no aço [1].

A laminação de desbaste do material é executada após o processo de reaquecimento das placas. São aplicadas reduções sucessivas para que seja obtida a espessura do esboço desejada. No processamento termomecânico, o principal objetivo do processo de laminação de desbaste, além de reduzir a espessura do material até a espessura de esboço, é o refino de grão austenítico por intermédio da completa recristalização da austenita depois de cada passe de laminação [6].

A fase de espera é uma das etapas da laminação controlada. É a fase na qual o material é resfriado para uma temperatura abaixo da temperatura de não recristalização da austenita (T_{nr}). Abaixo da T_{nr} , a austenita deformada não recupera o formato equiaxial que apresentava antes dos passes de laminação. A temperatura T_{nr} pode ser estimada em função da composição química do aço. A aplicação da Equação 1.1, proposta por Boratto et al. 1989, dá uma aproximação da T_{nr} sem levar em consideração o efeito obtido pela deformação plástica acumulada [7].

$$T_{nr} = 897 + 464C + (6445Nb - 644\sqrt{Nb}) + (732V - 230\sqrt{V}) + 890Ti + 363Al - 357Si \quad (1.1)$$

A etapa de acabamento é a etapa onde ocorre o condicionamento da austenita e a redução da espessura do material até a espessura final. Os grãos austeníticos submetidos aos passes de laminação são deformados assumindo uma forma empanquecada, achatados no sentido da espessura da tira e alongado no sentido de laminação. Esta condição gera um aumento nos sítios de nucleação de grãos ferríticos pelo aumento da área superficial de cada grão, bem como a formação de bandas de deformação no grão austenítico em dependência da deformação aplicada.

O resfriamento acelerado foi introduzido como processo subsequente ao processo de laminação termomecânica a partir da década de 1960 com o intuito de se promover um maior refinamento dos grãos ferríticos. Melhorias relacionadas à resistência mecânica em tração, tenacidade ao impacto e soldabilidade foram conseguidas a partir de então [8]. A temperatura medida antes do bobinamento do material é definida como temperatura de bobinamento, e este é um parâmetro de processo muito importante para a microestrutura final do material obtido por meio da laminação termomecânica. Os produtos de microestrutura final podem ser: ferrita e perlita, ferrita e bainita, ferrita acicular, ou uma variedade de constituintes metalúrgicos em uma estrutura denominada como de fase complexa, que inclui ilhas de martensita [1].

1.2. Processamento adequado durante a fase de desbaste

Para que seja realizado o condicionamento da austenita de forma adequada durante o processo de desbaste, deve ser objetivada uma redução plástica do material total na fase de desbaste de 60%. Em adição, o mínimo de 15% de redução relativa por passe é desejado para que o efeito do tamanho de grão austenítico inicial elevado seja minimizado.

Na Figura 2 está ilustrado o efeito da deformação por passe e da redução total durante os passes de desbaste na diminuição do tamanho de grão austenítico. Pode ser observado que, mesmo partindo de tamanhos de grão austeníticos bem diferentes em virtude das práticas de reaquecimento, o tamanho de grão austenítico final não apresenta diferenças consideráveis no refinamento [9].

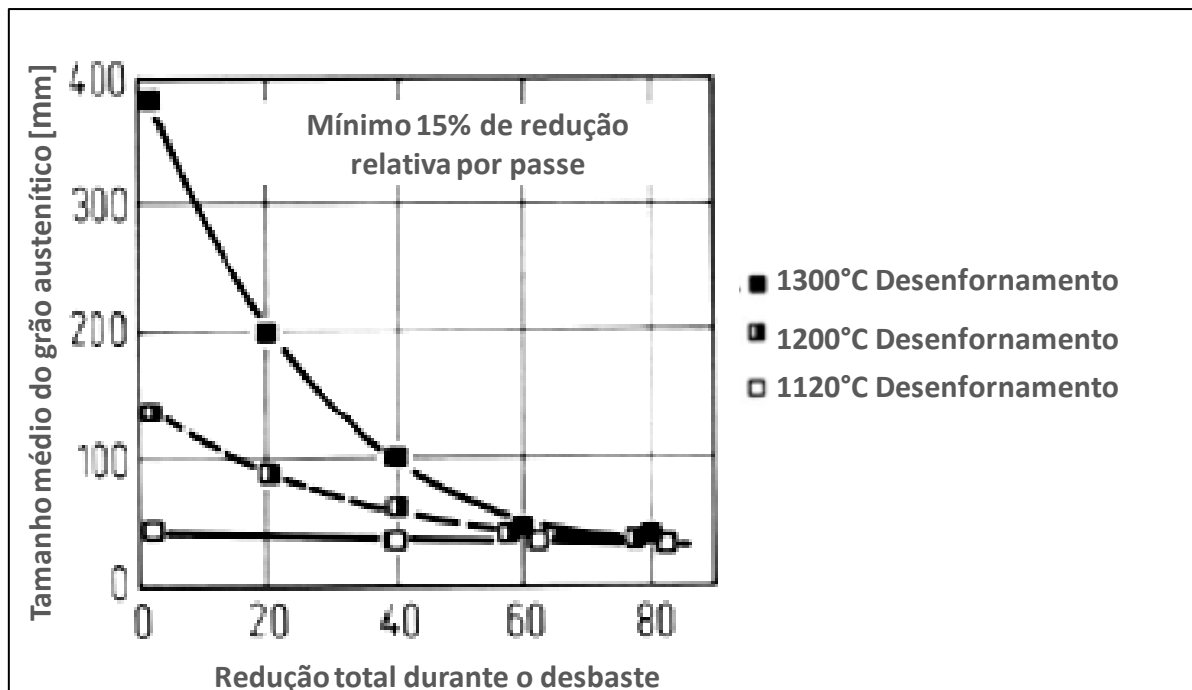


Figura 2. Efeito da deformação por passe e da redução total durante os passes de desbaste na diminuição do tamanho de grão austenítico para diferentes temperaturas de desenfornamento (Adaptado de [9])

Para um processo de desbaste mais eficaz no sentido de produzir um esboço com grãos austeníticos mais refinados e com maior homogeneidade ao longo da espessura, as maiores reduções possíveis pela utilização do laminador devem ser realizadas. Estas reduções na fase de desbaste geralmente são limitadas pelo torque de laminação. As reduções mais elevadas na fase de desbaste permitem que toda a microestrutura seja atingida pela deformação dos passes assegurando assim adequado condicionamento da austenita ao longo de toda a seção do laminado. Na Figura 3 está ilustrado um plano de passe alinhado com as práticas ideais de desbaste onde, são aplicadas as maiores reduções até que o laminado tenha espessura menor do que a metade da espessura inicial [9]. Os passes de acabamento após a fase de espera são mantidos com alto grau de deformação

plástica e geralmente são limitados pela carga máxima de laminação e de questões relacionadas a planicidade do material laminado.

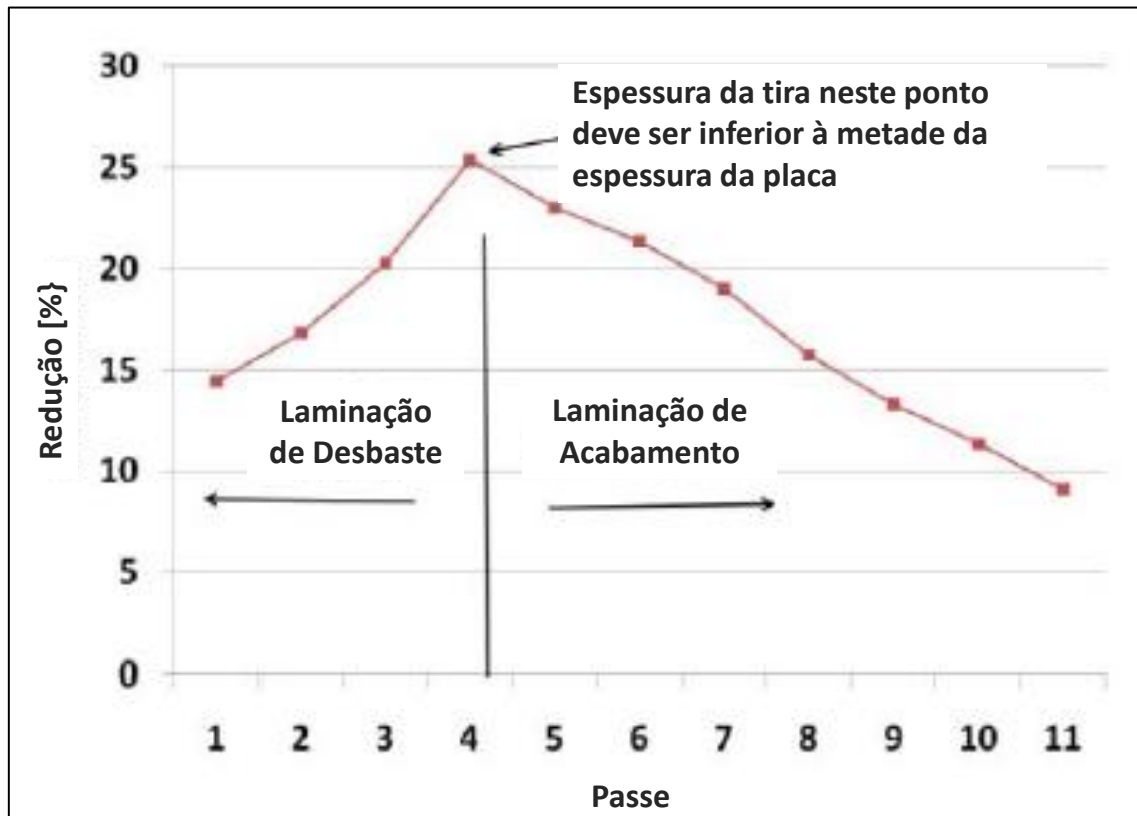


Figura 3. Exemplo de passe de passe desejado para a laminação de desbaste com o objetivo de refinamento de grãos antes da etapa de espera (Adaptado de [9])

1.3. Laminador de Tiras a Quente, com cadeira tipo Steckel da Gerdau

O laminador de tiras a quente da Gerdau entrou em operação no mês de outubro do ano de 2013 e desde então passou por grandes avanços no desenvolvimento do mix de produção. As dimensões de produtos que compõem o mix de produção do laminador da Gerdau variam de espessura de 1,8mm a 25,4mm, nas larguras de 850mm a 2100mm. Na medida em que a espessura diminui e a largura aumenta, aumenta também a dificuldade no processamento [10].

Os laminadores *Steckel* representam as soluções econômicas para a produção de até 1.000.000 t de laminados a quente.

Estes também podem ser lucrativos quando usados para produzir aços carbono e aços especiais, quando a produção for limitada e os lotes de pedidos forem pequenos [10].

Quando se faz uma comparação com laminadores convencionais contínuos, o laminador *Steckel* tem como característica, tempo entre passes muito elevados, facilitando assim a ocorrência de recristalização em aços comuns e de baixo teor de nióbio. A laminação de aços microligados configura uma alternativa interessante para a produção de aços para aplicação em dutos e aplicações estruturais neste tipo de laminador [1].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, a laminação de um aço com composição química adequada para obtenção de um material que atenda as especificações para o aço LNE380 especificado na norma ABNT NBR 6656, foi executada no Laminador de Tiras a Quente da Gerdau Ouro Branco, com cadeira tipo *Steckel* única para desbaste e acabamento. Foi planejada para a bobina a obtenção da espessura final de 9,66mm na largura de 1500mm.

2.1. Material

Para a laminação experimental foram selecionadas 2 placas na espessura de 220mm e largura de 1500mm produzidas na planta da Gerdau Ouro Branco. O aço laminado para o presente estudo é um aço C-Mn com adição de Nb, Ti e V para promover maior refinamento do grão ferrítico final. A composição química com valores máximos é exibida na Tabela 1.

Tabela 1. Concentração de C, Mn, Nb, Ti e V na Placa (% em massa)

C	Mn	Nb	Ti	V
< 0,10	< 1,00	< 0,055	< 0,012	< 0,036

A composição química do aço estudado é adequada para obtenção de limite de escoamento (LE) acima de 380MPa nos ensaios de resistência à tração, por meio da utilização do processamento termomecânico, requisito especificado na norma ABNT NBR6656 [3].

2.2. Processo de Reaquecimento da Placa

Para o processo de reaquecimento e a solubilização completa do Nb e V presentes na composição química do aço, foi definida a temperatura de encharque e desenformamento da placa em 1220°C. A temperatura de desenformamento foi definida com base na equação (2) para solubilidade dos carbonitretos de nióbio proposta por Siciliano demonstrada abaixo [11].

$$T = \frac{838[Mn]^{0,246} - 1730[Si]^{0,594} - 6440}{\log[Nb] \times \left[C + \frac{12}{14} N \right] - 2,26} - 273 \quad (1)$$

2.3. Processo de Laminação do Material

A estratégia de laminação teve como premissas, a aplicação de altas reduções nos passes de desbaste com o objetivo de se obter menor tamanho de grão austenítico; a espera para resfriamento em uma espessura a partir da qual era possível desenvolver alta deformação do grão austenítico abaixo da temperatura de não recristalização, e a laminação de acabamento no mínimo de passes possível [12].

A temperatura de reinício da laminação foi definida pela utilização da Equação (2) qual dá uma aproximação adequada da temperatura de não recristalização (T_{nr}) pela aplicação de um fator de 80% de eficiência sobre a equação de Boratto nos teores de Nb, Al, V, Ti e Si com base em resultados práticos de laminação de aços microligados [13]. A Equação (2) está descrita abaixo.

$$T_{nr} = 887 + 464C + (6645 \times (0,80Nb) - 644\sqrt{0,80Nb}) + (732 \times (0,80V) - 230\sqrt{0,80V}) + 890 \times (0,80Ti) + 363 \times (0,80Al) - 357 \times (0,80Si) \quad (2)$$

A espessura da espera foi definida com base na espessura final de laminação. Levando-se em consideração que a espessura final seria de 9,66mm, foi adotado um fator de, no mínimo 3 vezes a espessura final, para que deformação seja o mais uniforme ao longo da espessura do passe. Foi definida então, a espessura de patamar em 30mm.

Como o objetivo principal para o presente estudo era demonstrar a influência da laminação de desbaste durante o processo de laminação termomecânica de um aço microligado ao Nb, Ti e V nas propriedades mecânicas do produto obtido em um laminador Steckel, dois planos de passe para desbaste foram propostos sendo, a condição 1, um plano de passe com reduções menos elevadas totalizando 8 passes para a redução da espessura da placa de 220mm para 30mm e a condição 2, com reduções mais elevadas a cada passe totalizando 6 passes para alcançar a espessura do esboço.

A etapa de espera, o processo de laminação de acabamento e o resfriamento acelerado após a laminação foram executados da mesma forma para todas as duas tiras avaliadas equalizando assim o processamento termomecânico a partir da etapa de desbaste.

2.4. Ensaios Laboratoriais

Para a verificação dos resultados obtidos foram planejados corpos de prova para ensaios de resistência mecânica a tração e análise microestrutural por meio da utilização de microscópio ótico.

Para os ensaios de tração, foram preparados os corpos de prova de acordo com a norma ABNT NBR 6673. Os corpos de prova foram retirados no sentido transversal da tira a $\frac{1}{4}$ da largura [14].

O equipamento utilizado para o ensaio de tração foi uma máquina universal de ensaios Shimadzu modelo UH-F600kNI.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Processamento

O processamento do material foi realizado conforme planejado. Os passes de laminação bem como as temperaturas de processamento foram cumpridos pelo modelamento matemático de alto desempenho equipado no laminador.

A etapa de laminação de desbaste foi realizada conforme planejado. No processamento do material com 8 passes de desbaste a redução máxima obtida foi de 30% em contrapartida, o material processado em 6 passes de desbaste alcançou reduções superiores à máxima obtida no processamento em 8 passes após o

terceiro passe de laminação. Os dados da laminação de desbaste para as duas condições estão apresentados na Figura 4.

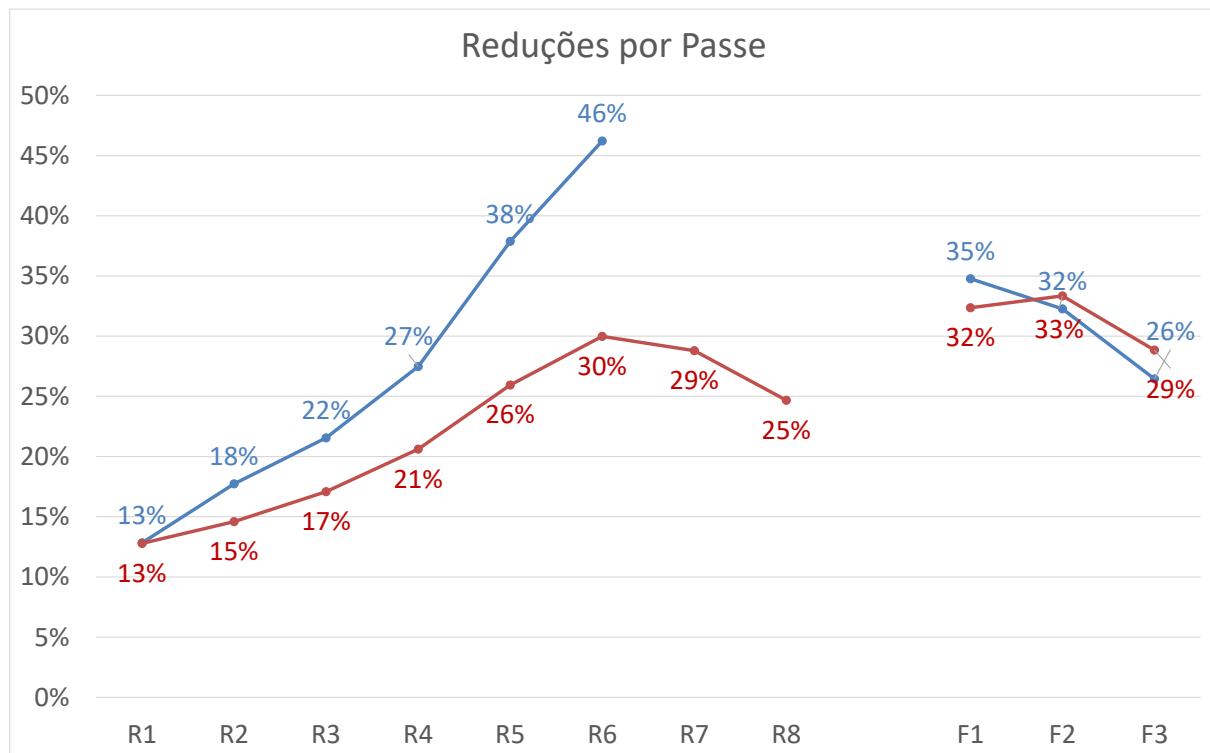


Figura 4. Reduções passe a passe durante a laminação de desbaste e de acabamento conforme executado no material laminado para o presente estudo.

3.2. Ensaios Mecânicos

Os resultados obtidos no ensaio de tração estão sumarizados na Tabela 2. Estão apresentados os valores menores encontrados para LE e LR e os valores médios para razão elástica e alongamento.

Tabela 2. Resultados do Ensaio de Tração

Condição	Espessura	Largura	L ₀	LR	LE 0,2%	Razão Elástica
1	9,77mm	20,46mm	80mm	563MPa	459MPa	81%
2	9,65mm	20,27mm	79mm	601MPa	505MPa	85%

Os valores mínimos e máximos especificados na norma ABNT NBR 6656 para o aço LNE380 são 380Mpa a 530 para limite de escoamento e de 460Mpa a 600Mpa para limite de resistência [3]. Os resultados obtidos no aço processado em ambas as condições atendem com boa margem à especificação do aço LNE380.

Observou-se que o aço laminado segundo a condição 2, apresentou resultados de propriedades mecânicas mais elevadas do que as obtidas quando da laminação na condição 1. Um acréscimo de em torno de 40 MPa foi obtido tanto para LE e para LR pela modificação da condição de laminação de desbaste.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que por meio de um controle adequado das condições de laminação é possível atingir as propriedades mecânicas atraentes quando da laminação de aços microligados.

A laminação de desbaste efetuada com reduções mais elevadas passou a ser a forma adequada para o processamento de aços microligados, uma vez que foi demonstrado um aumento de resistência mecânica pelo maior refinamento do grão austenítico a uma temperatura superior à T_{nr} .

Os resultados obtidos no presente estudo comprovam que o laminador de tiras a quente tipo Steckel da Gerdau é adequado ao processamento de aços microligados com controle apurado do processamento.

REFERÊNCIAS

- 1 Miranda L. S. Estudo da Influência de Variáveis de Laminação em uma Linha de Laminação de Tiras a Quente Convencional nas Propriedades Mecânicas de um Aço Alto Nióbio da Classe API 5L X70. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG; 2010
- 2 Lino J. J. P., Cohn J. A. C., Rossi E. H., Souza A. L., de Faria G. L., Schuwarten Junior W. Laminação Termomecânica de um Aço Microligado ao Nióbio em um Laminador de Tiras a Quente, com Cadeira Steckel. 53º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM Week. Rio de Janeiro. 2016
- 3 ABNT NBR 6656, Bobinas e Chapas Laminadas a Quente de Aço Acalmado com Características Especiais de Propriedades Mecânicas, Conformabilidade e Soldabilidade, 2ª Edição, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 2008
- 4 Catálogo Gerdau. Aços Planos Gerdau Bobinas Laminadas a Quente. <https://www.comercialgerdau.com.br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/catalogo-acos-planos-bobinas-a-quente.pdf>. Acesso em: 19/05/2017.
- 5 Lino J. J. P. Laminação Controlada de um Aço Microligado ao Nióbio Visando a Obtenção do Grau API X60 em Laminador Steckel. Dissertação de Mestrado, REDEMAT- Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2016
- 6 Júnior, E. H. Investigação Experimental do Comportamento Dúctil de Aços API-X70 e Aplicação de Curvas de Resistência $J-\Delta a$ para Previsão de Colapso em Dutos. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004
- 7 Boratto, F. J. M.; Barbosa, R. A. N. M.; Santos, D. B. Fundamentos da Laminação Controlada, Apostila Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, 1989
- 8 Toffolo, R. C. V. Estudo Comparativo dos Aços Microligados API-5L-X70 usados para Confecção de Tubos quanto à Tenacidade à Fratura. Ouro Preto, Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2008.
- 9 Stalheim D. G. Metallurgical Optimization of Microalloyed Steels for Oil and Gas Transmission Pipelines. Proceedings and Presentation at the 6th International Conference on High Strength Low Alloy Steels (HSLA Steels 2011). Chinese Society for Metals. Beijing China, June 2011
- 10 Lino J. J. P., Souza A. L., Borges J., Frenn H., Pereira M., Schuwarten W. Os Benefícios da Utilização da Estratégia Tapering na Redução de Cargas nas Pontas da Tira. 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2014
- 11 Siciliano Junior, Fúlvio. Mathematical Modeling of the Hot Strip Rolling of Nb Microalloyed Steels. Doctor of Philosophy thesis, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal, Canada, 1999
- 12 Stalheim D., Glodowski R. Fundamentals of the Generation of Fine Grained As-Rolled Structural Steels. Proceedings and Presentation at AIST International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels. Winter Park, Colorado USA, Junho 2011
- 13 Stalheim D. Equations for Rolling Process Design. Comunicação interna. 2016

- 14 ABNT NBR 6673, Produtos Planos de Aço – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração, 1ª Edição, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 1981