

LAMINAÇÃO CONTROLADA DE ANÉIS DE AÇO SAE 1035 COM ADIÇÃO DE NIÓBIO*

Luiz Henrique Campos de Lima Castro¹

Mariana Tortella Merli Fiorante²

Marcelo Arantes Rebellato³

José Aparecido Valsechi⁴

Resumo

O presente trabalho visa realizar a laminação controlada de anéis feitos de aço SAE 1035 com adição de Nióbio, a fim de obter a resistência mecânica e a microestrutura especificada sem a etapa de tratamento térmico de normalização posterior ao processo de fabricação. O Nióbio tem importante função na composição química por ser um elemento capaz de restringir a recristalização e o crescimento de grão austenítico, aumentando a resistência mecânica e dureza do aço. Para tanto, realizou-se a laminação dos anéis, os quais deram origem a corpos de prova em diferentes condições (com e sem Nióbio, com e sem normalização). Com isso, obtiveram-se resultados mecânicos e microestruturas que comprovam a eficiência do projeto proposto, de modo que a normalização possa ser suprimida do processo de fabricação, reduzindo custos e os prazos de entrega.

Palavras-chave: Laminação Controlada de Anéis; Normalização; Nióbio; SAE 1035.

CONTROLLED RING ROLLING OF SAE 1035 STEEL WITH NOBIUM ADDITION

Abstract

The present work aims to realize the controlled rolling of SAE 1035 steel rings with Niobium addition, in order to obtain the specified mechanical strength and microstructure without the stage of normalizing heat treatment after the manufacturing process. Niobium plays an important role in the thermomechanical processing as it is capable of restricting austenite recrystallization and grain growth and increase mechanical strength and hardness of the steel. For that, the rings were rolled, which have originated specimens under different conditions (with and without Niobium, with and without normalizing). The mechanical property and microstructure results proved the efficiency of the proposed project, so that normalizing treatment can be suppressed from the manufacturing process, reducing costs and speeding delivery.

Keywords: Controlled Rolling of Rings; Normalizing; Niobium; SAE 1035.

¹ Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM, São Paulo, Brasil.

² Engenheira de Materiais, Analista de Engenharia de Materiais, Uniforja, Diadema, São Paulo, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Consultor Técnico da CBMM, Eurosport, São Paulo, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Consultor Técnico da CBMM, Techjav, Pindamonhangaba, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Tratamento termomecânico ou *thermo-mechanical control process* (TMCP) é uma técnica que controla a microestrutura do material por meio da combinação entre a laminação e o resfriamento controlado, a fim de obter excelentes propriedades mecânicas, as quais só poderiam ser alcançadas com o tratamento térmico convencional [1].

Pesquisas relacionadas ao processo de laminação controlada têm sido desenvolvidas há anos e estão cada vez mais associadas às alterações na composição química do material, temperatura e rota de processamento, visando reduções de custo e tempo de entrega, aumento na produtividade e melhorias na qualidade do produto.

Sendo assim, este trabalho tem por objetivo realizar a laminação controlada de anéis feitos com aço SAE 1035 a fim de atingir propriedades mecânicas e microestrutura especificadas apenas com o calor da laminação, ou seja, sem a necessidade da etapa de tratamento térmico de normalização. Para tanto, a temperatura final de laminação deve ser igual a que é empregada na austenitização do tratamento térmico de normalização em si [2].

Além disso, alterações na composição química do material também foram estudadas, resultando no incremento de Nióbio, que segundo autores como Yan e Bhadeshia [3] e Morrison [4] é um elemento de liga capaz de aumentar a resistência mecânica e dureza dos aços, por restringir a recristalização e o crescimento de grão austenítico, assegurando uma microestrutura fina de ferrita e perlita.

Desta forma, a combinação entre a composição química e a laminação controlada do material, permitem com que produtos sejam fabricados com as propriedades e microestruturas desejadas diretamente do calor da laminação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço em estudo, SAE 1035, é fornecido como um lingote de 490 mm de diâmetro, de composição química conforme Tabela 1. A fração de Nióbio adicionada foi calculada pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) através da equação de solubilização proposta por Irvine, obtendo-se o intervalo de 0,015%-0,025%Nb, em função da composição química restante do material e da temperatura de austenitização de 1150°C [5].

Tabela 1. Composição química do aço SAE 1035

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Nb	Fe
0,348	0,764	0,210	0,121	0,037	0,075	0,019	Bal.

As etapas de forjamento e a laminação do anel podem ser vistas na Figura 1. Para a fabricação do anel de aço SAE 1035 convencional, ou seja, sem adição de Nióbio, comumente realiza-se tanto o forjamento da pré-forma quanto a laminação do anel a 1150°C, seguido de normalização a 880°C com tempo de encharque de 1h/polegada.

Já para fins de comparação e validação do projeto, adicionou-se 0,019% de Nióbio à composição química e realizou-se o forjamento de três pré-formas a 1150°C, que deram origem a três anéis laminados a temperatura mais baixa, 1000°C. Apenas um anel foi normalizado a 880°C com tempo de encharque de 1h/polegada, enquanto os outros dois permaneceram sem tratamento térmico.

Por fim, apenas um dos anéis não tratados passou por resfriamento controlado por 300s até atingir temperatura menor que 500°C, a uma taxa de 1,7°C/s, seguido de resfriamento ao ar calmo. O dispositivo comporta anéis de no máximo 2 m de diâmetro externo e possui um exaustor acoplado, responsável pelo resfriamento homogêneo da peça, conforme pode ser visto na Figura 2.

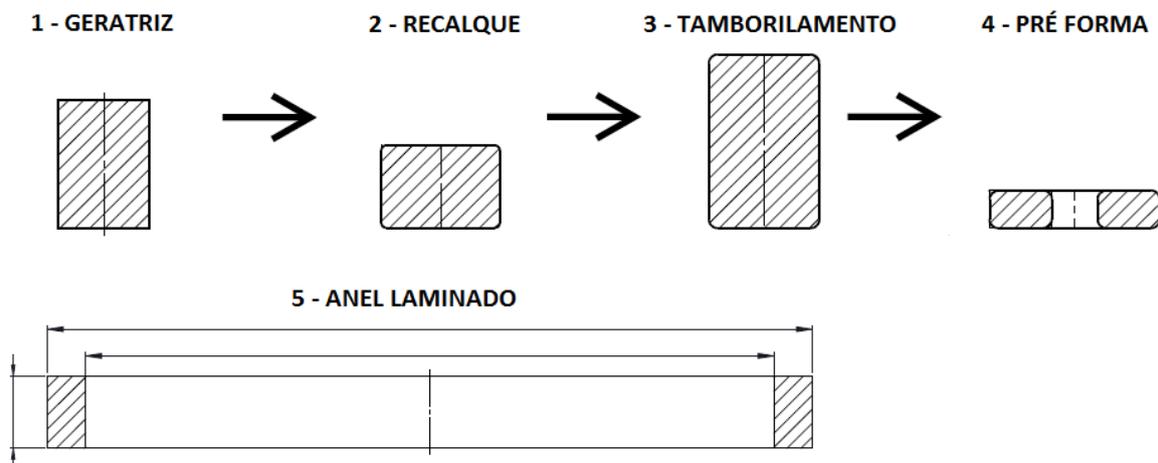


Figura 1. Etapas de forjamento e laminação do anel.

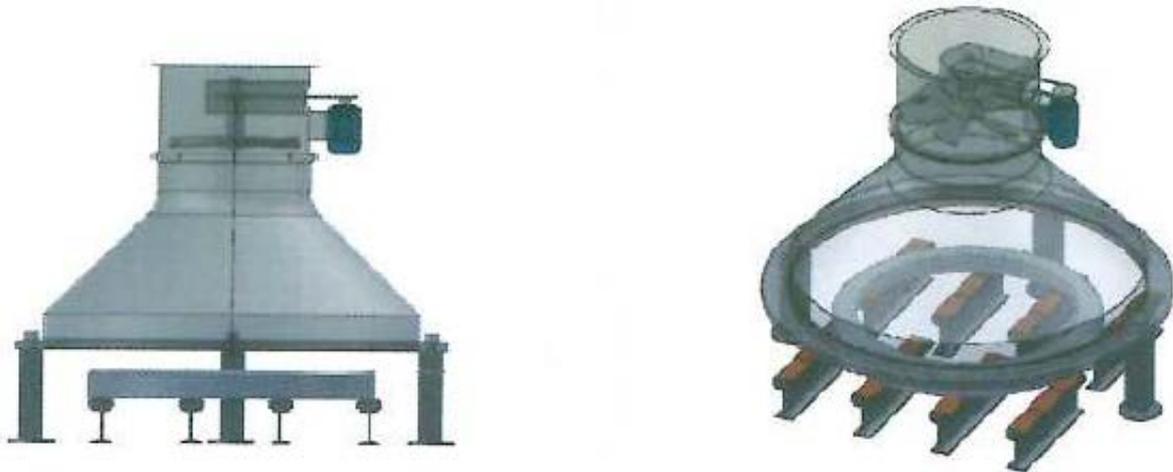


Figura 2. Dispositivo para resfriamento controlado do anel.

Com isso, foi obtido um corpo de prova para cada condição de processamento e composição, conforme a seguir:

- 1 – Corpo de prova de anel sem adição de Nb e normalizado;
- 2 – Corpo de prova de anel com adição de Nb e normalizado;
- 3 – Corpo de prova de anel com adição de Nb e sem tratamento térmico;
- 4 – Corpo de prova de anel com adição de Nb, sem tratamento térmico e com resfriamento controlado.

Os equipamentos utilizados foram uma prensa de 4000 toneladas para o forjamento da pré-forma, uma laminadora de capacidade 500 Kg e 2m de diâmetro para a laminação do anel e um forno elétrico do tipo câmara, sem atmosfera controlada, para o tratamento térmico.

O anel em questão é aplicado em caminhão-betoneira, cuja dimensão final de fornecimento é dada na Figura 3, em milímetros.

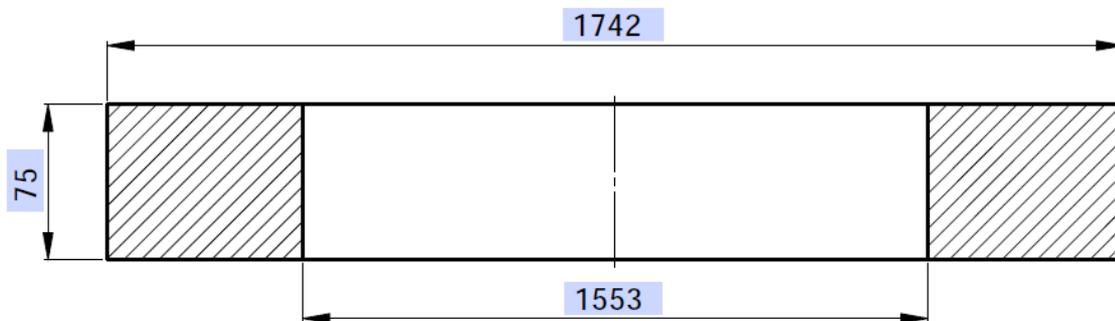


Figura 3. Dimensões de fornecimento do anel laminado.

Após a laminação final do anel realizaram-se os ensaios mecânicos e metalografia dos corpos de prova, a começar pelo ensaio de dureza Brinell no produto final, feito de acordo com a norma ASTM E10, seguido do ensaio de tração de orientação transversal ao sentido da laminação, realizado de acordo com a norma ASTM A370, e, por fim, micrografia dos corpos de prova e tamanho de grão segundo as normas ASTM E3 e ASTM E112, respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de tração e dureza podem ser vistos na Tabela 2. Nota-se que os valores de limite de resistência, alongamento, redução de área e dureza praticamente são iguais entre os diferentes corpos de prova, enquanto que o limite de escoamento e a razão elástica (LE/LR) aumentaram com o incremento de Nióbio ao material e com a normalização.

Tabela 2. Resultados dos ensaios mecânicos.

#CP anel	LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR (%)	AL (%)	RA (%)	Dureza (HB)
1	339	596	57	27	55	170
2	409	585	70	25	57	167
3	381	598	64	25	52	167
4	401	592	68	25	56	168

Percebe-se que em relação ao anel 1 (sem adição de Nb e normalizado), a adição de Nb proporciona um ganho de até 20% no limite de escoamento e na razão elástica do anel 2 (normalizado), de 12% no anel 3 (sem tratamento térmico) e de 18% no anel 4 (sem tratamento e com resfriamento controlado).

Sendo assim, esse elemento é capaz de incrementar o limite de escoamento do material além de manter as propriedades atingidas com a normalização, sem que o aço precise ser submetido ao tratamento térmico.

Para se verificar o comportamento da microestrutura do material em função das diferentes rotas de processamento e composição, realizou-se a análise metalográfica dos anéis, conforme ASTM E3, utilizando-se microscópio Zeisse obtendo-se a micrografia com o software Axio Vision SE64, conforme é possível observar nas Figuras 4, 5,6 e 7, todas atacadas com Nital4%, 100x de aumento e estrutura de ferrita e perlita.



Figura 4.Micrografia do corpo de prova 1 (sem adição de Nb e normalizado), atacado com Nital 4% e com 100x de aumento.



Figura 5.Micrografia do corpo de prova 2 (com adição de Nb e normalizado), atacado com Nital 4% e com 100x de aumento.



Figura 6. Micrografia do corpo de prova 3 (com adição de Nb e sem tratamento térmico), atacado com Nital 4% e com 100x de aumento.

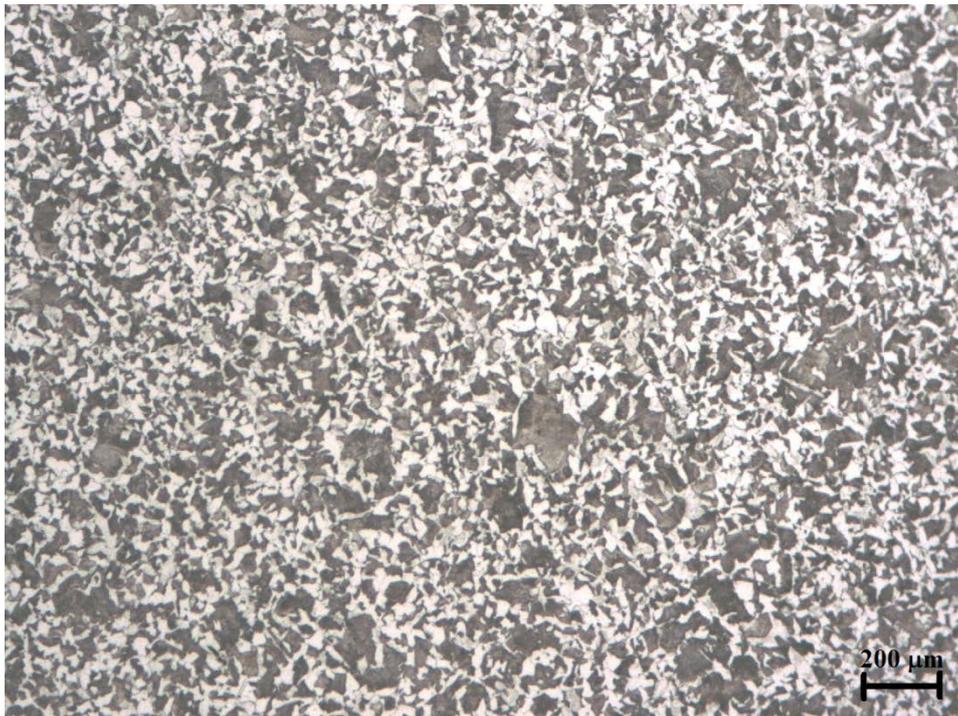


Figura 7. Micrografia do corpo de prova 4 (com adição de Nb, sem tratamento térmico e com resfriamento controlado), atacado com Nital 4% e com 100x de aumento.

Nota-se também que há bandeamento na microestrutura do anel 3 (com Nb e sem tratamento térmico), o que era de se esperar, visto que com apenas o calor da laminação o anel encontra-se com a superfície em temperatura mais baixa que o núcleo, não permitindo a homogeneização da estrutura, ao contrário do que acontece na normalização, já que há maior homogeneidade durante o encharque,

como se observa nas microestruturas dos anéis 1 e 2 [3]. Já o anel 4, apesar de não sofrer normalização, está sujeito ao resfriamento controlado e acelerado, o que também restringe a difusão dos elementos de liga que dão origem ao bandeamento da estrutura.

Os tamanhos de grãos foram obtidos conforme ASTM E112 e estão na faixa de 4-8 para o anel 3 (com Nb e sem tratamento) e de 6-8 para os anéis 1 e 2 (normalizados) e anel 4 (resfriamento controlado). Os maiores valores de tamanho de grão encontrados no anel sem tratamento térmico são justificados pela impossibilidade da laminação ocorrer à temperatura próxima ou igual à temperatura de austenitização para normalização, conforme impõe o conceito de laminação controlada para normalização, por conta da limitação do equipamento. Logo, maiores temperaturas resultam em maiores tamanhos de grãos [6].

Por fim, este trabalho constitui um primeiro passo para constatar o efeito do Nióbio com o objetivo de se otimizar a composição química e o processo de laminação a quente de anéis. A partir dos resultados favoráveis obtidos, pode-se sugerir os seguintes desenvolvimentos futuros: laminar próximo a temperatura de normalização; ajustes mais profundos na composição química do aço, como a substituição de Mn por maior teor de Nb; otimização do processo de conformação a quente; e minimização do bandeamento microestrutural, entre outras possibilidades.

4 CONCLUSÃO

A adição de Nióbio permite que o aço SAE 1035 atinja as mesmas propriedades mecânicas de um anel normalizado sem que seja realizado o tratamento térmico, exceto no limite de escoamento, o qual é incrementado. Contudo, a dificuldade em laminar na mesma temperatura de austenitização para normalização, impede com que a estrutura seja refinada conforme esperado em padrões de normalização. Ainda assim, o fato do Nióbio e da laminação controlada serem capazes de suprimir a etapa de normalização, resultou em redução de custo, de prazo de entrega do anel e de desgaste do forno.

Agradecimentos

Um dos autores (M.T.M.F.) agradece ao Engenheiro Luiz Henrique Campos de Lima Castro, pela idealização do projeto; à Uniforja, por permitir a realização da pesquisa e do desenvolvimento prático da mesma in situ; e à CBMM, na pessoa do Engenheiro José Antônio Valsechi, Engenheiro Marcelo Arantes Rebellato e Engenheiro Antônio Augusto Gorni, por todo auxílio intelectual e parceria ao longo do desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 Nakata, N.; Endo, S. Development of Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) and high performance steel in JFE Steel. JFE Technical Report. 2015. [Acesso em 11 junho 2018]. Disponível em: www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/020/pdf/020-02.pdf
- 2 Gorni, A. A.; Cavalcanti C.; Silveira J. Produção de chapas grossas normalizadas diretamente do calor de laminação. XXXIV Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos. ABM, Belo Horizonte, MG. 1997, pág. 479-497.
- 3 Yan, P.; Bhadeshia, H. The austenite-ferrite transformation in enhanced-niobium low-carbon steel. Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge. 2015: 01-05.
- 4 Morrison, W. Microalloy Steels – the beginning. Materials Science and Technology. 2009;25: 1066-1073.
- 5 Irvine KJ, Pickering FB, Gladman T. Grain-Refined C-Mn Steels. Journal of the Iron and Steel Institute, 1967, 205:161-182.
- 6 Padilha, A.; Siciliano, F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. 3 ed. ABM, São Paulo. 2005, pág:59-73,132-161