

ESTUDO DAS VARIÁVEIS DA LAMINAÇÃO A QUENTE E A FRIO QUE INFLUENCIAM NA RELAÇÃO ELÁSTICA DO CA60¹

Bruna Melina Marques de Sousa Hissanaga²

Resumo

Este trabalho tem como objetivo um melhor entendimento das variáveis da laminação que influenciam na relação elástica do vergalhão CA60. Ele é obtido por meio da laminação a frio do Fio Máquina. Este estudo surgiu da necessidade de se obter a relação elástica no CA60 bobina. Foram realizadas alterações no processo de obtenção do Fio-máquina nas seguintes etapas do processo do laminador a quente: temperatura no formador de espiras, velocidade da esteira e vazão de ar nos ventiladores do processo Stelmor. Elas foram realizadas com o intuito de se obter um maior tamanho de grão em relação ao atual, objetivando a redução do limite de resistência. Os fios-máquina gerados nos experimentos foram laminados a frio para verificação das propriedades mecânicas do CA60 após as alterações no processo da laminação a quente. Para reduzir o limite de escoamento e alcançar a relação elástica mínima estabelecida por norma, foi necessário acrescentar mais um dispositivo no laminador a frio, de modo que se obtivesse um aumento no alívio de tensões. O resultado esperado com este trabalho foi alcançado após a instalação do dispositivo que permitiu um aumento no alívio das tensões no vergalhão, sendo assim possível obter a relação elástica esperada.

Palavras-chave: Fio máquina; Vergalhão CA-60; Alívio de tensão mecânica; Relação elástica.

STUDY OF VARIABLE OF HOT AND COLD ROLLING AFFECTING THE ELASTIC RELATION OF CA60

Abstract

This work aims at a better understanding of the variables influencing the elastic relation lamination tensile rebar CA60. It is obtained by cold rolling of wire machine. This study arose from the need to obtain the elastic relation in CA60 coil. Changes were made in the process of getting the wire rod in the following process steps of hot rolling mill: temperature in forming loops, belt speed and air flow fans in the process Stelmor. They were made in order to obtain a larger grain size compared to the current, aiming to reduce the threshold of resistance. The wire rods generated in the experiments were cold rolled to check the mechanical properties of CA60 after the changes in the process of hot rolling. To reduce the yield point and achieving minimum tensile ratio set by standard, it was necessary to add an additional device into cold rolling, so that obtain an increase in stress relief. The expected result was achieved with this working after installing the device that allowed an increase in the easing of tensions in rebar, making it possible to obtain the elastic relation expected.

Key words: Wire rod; CA60 rebar; Mechanical stress relief; Elastic relation.

¹ *Contribuição técnica ao 4º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-ferrosos, 26 e 27 de novembro de 2013, São Paulo, SP.*

² *Engenheira de Suporte Técnico (Votorantim Siderurgia – Unidade Resende).*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os produtos siderúrgicos brasileiros competem diretamente com produtos importados de países como China, Rússia e Índia, portanto considerando o cenário atual do mercado brasileiro, em que o aço importado custa 25% mais barato em relação ao produto interno é importante que o produto nacional se torne mais competitivo.⁽¹⁾ Para tornar o produto competitivo se faz necessário realizar pesquisas a fim de desenvolver novos produtos ou realizar melhoria nos processos.

Visando redução de custo e obtenção da relação elástica para a bobina do CA60, em condições diferentes da fabricação atual deste produto no mercado, foi utilizado neste trabalho o fio-máquina com diâmetro de 6,50mm com aço de baixo teor carbono 8%, de modo que fosse possível obter as propriedades mecânicas necessárias para atendimento a norma ABNT 7480/2007.⁽²⁾ Inicialmente foram realizados testes em algumas variáveis do resfriamento durante a laminação do FM. Anelli⁽³⁾ utilizou um modelo matemático para prever a evolução da microestrutura durante a laminação a quente e investigar o efeito das condições de trabalho e mecanismos de recristalização sobre a formação de microestruturas austeníticas heterogêneas. O modelo estima a estrutura da austenita desenvolvida durante cada passe. As heterogeneidades aumentam com o aumento da temperatura e tornam-se mais pronunciadas da superfície para o centro da barra. Usando este modelo é possível quantificar a influência do diâmetro e do resfriamento na microestrutura e do perfil de temperatura ao longo do Stelmor.

A trefilação é um processo a frio que pode ser utilizado para fabricar barras e arames (normalmente com geometria circular) em que uma força trativa atravessa uma fieira (ferramenta cônica) ou cassete ocasionando a redução de diâmetro.⁽⁴⁾

Segundo Bresciani et al.⁽⁵⁾ inicialmente no processo de deformação plástica, a tensão necessária para provocar a deformação é relativamente pequena. À medida que ocorre o processo, multiplicam-se as discordâncias aumentando sua densidade no cristal e se acentua o efeito de interação entre elas. Isto dificulta a movimentação das discordâncias, exigindo, portanto níveis de tensão mais elevados, para provocar a deformação. Esse fenômeno, caracterizado pelo aumento da intensidade da tensão para provocar a deformação plástica, é denominado encruamento.

Os processos de conformação mecânica como laminação e dobramento têm como principal mecanismo de geração de tensões residuais a heterogeneidade das deformações plásticas entre as várias regiões do material.

De forma simples, entende-se por tensões residuais aquelas existentes em um corpo sem que estejam agindo sobre ele forças externas. As tensões residuais são elásticas e se superpõem as cargas de serviço, podendo ser benéficas ou não as estruturas e equipamentos, dependendo de sua magnitude, sinal e distribuição.⁽⁶⁾ Qualquer remoção de material, aplicação de carregamentos térmicos ou mecânicos, altera o seu estado e causa sua redistribuição de modo que as tensões se equilibrem novamente.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo avançar no conhecimento sobre a influência das variáveis do processo de laminação a quente e a frio que interferem na obtenção da relação elástica do vergalhão CA60 bobina.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No processo de conformação mecânica do FM no laminador Morgan foram avaliadas três alterações no processo de resfriamento no Stelmor: temperatura no formador de espiras, velocidade de resfriamento e o emprego de das seguintes condições: com ou sem resfriamento.

Na laminação a frio será verificada a redução, o alívio de tensões e o atendimento das propriedades mecânicas estabelecidas na norma ABNT com foco na relação elástica (1,05 mín.), utilizando a matéria-prima conseguida em diferentes configurações obtidas na laminação a quente.

2.1 Material

O material do estudo é o vergalhão CA-60 diâmetro 5,00 mm, proveniente do fio-máquina diâmetro 6,50 mm. A Tabela 1 apresenta a composição química nominal deste aço.

Tabela 1. Composição química do aço ABNT

C (%)	Mn (%)	P(%)	S(%)
0,06	0,40	0,021	0,020

Neste material após a laminação a quente e a frio serão realizados testes de tração nas bobinas de FM e do CA60 para análise das propriedades mecânicas e análise metalográfica.

2.1.1 Variáveis da laminação a quente

De acordo com Wan-Hua et al.⁽⁷⁾ e Labib et al.,⁽⁸⁾ o Stelmor é um processo popular que visa o controle do resfriamento e das propriedades microestruturais na produção do fio-máquina. A sua utilização em grande escala ocorre devido à alta velocidade de produção e propriedades mecânicas homogêneas ao longo do comprimento da bobina.

No sistema podem-se utilizar diversas estratégias de resfriamento que dependem do tipo e da aplicação do aço, laminação ou o tratamento térmico de normalização.

A utilização de aços com baixo teor de carbono ou com adição de elementos de liga para a produção do fio-máquina induz a realização de pesquisas e aperfeiçoamentos no processo Stelmor para possibilitar a utilização desta técnica para a maior variedade possível de aços, em função das vantagens em termos de produtividade deste processo.⁽⁹⁾

Os testes foram realizados utilizando um Fio-máquina com diâmetro de 6,5 mm aço baixo carbono, no laminador a quente. Três variáveis foram analisadas em conjunto, são elas a temperatura no formador de espiras, a velocidade da esteira e a porcentagem de abertura dos ventiladores durante o resfriamento a ar no *Stelmor*. A Figura1 ilustra um esquema da região do laminador a quente que foi utilizado para realizar os experimentos. O aumento da velocidade da mesa transportadora ocasiona uma distância entre as espiras. Quanto maior essa distância, maior e mais uniforme será o resfriamento. Por outro lado, quanto menor a velocidade da mesa as espiras se tornam mais próximas, o que gera o acúmulo de calor. Quando o conjunto de tampas está fechado, a velocidade de resfriamento é reduzida. Se as tampas estiverem abertas a passagem de ar é facilitada de forma a acelerar o resfriamento.

O resfriamento interfere no refinamento e na homogeneização da microestrutura do aço, influenciando nas propriedades mecânicas.



Figura 1. Stelmor.

Oito experimentos foram programados conforme a Tabela 2, de forma a variar a temperatura do formador de espiras (870°C e 910°C), a velocidade da esteira (35 e 49 m/min) e a porcentagem de abertura dos ventiladores no resfriamento. Quando utilizado o resfriamento a ar, foi realizada a seguinte programação: ventiladores 1 e 2 com 10%, ventiladores 3 e 4 com 50% e os ventiladores 5 e 6 com 100%. Nos casos em que o resfriamento não foi utilizado, foi adotada a seguinte configuração: ventiladores de 1 a 6 com 10% de abertura.

Tabela 2. Dados dos experimentos no laminador a quente

Experimento	Qtd bobinas	Temperatura formador de espiras (°C)	Velocidade STELMOR (m/min)	Ventilação STELMOR
1	5	870	35	sem
2	5	870	35	com
3	5	870	49	com
4	5	870	49	sem
5	5	910	49	sem
6	5	910	49	com
7	5	910	35	sem
8	5	910	35	com

O experimento 3 são os valores considerados como padrão para referência, nos demais foram fixadas duas variáveis e a terceira alterada. Foi utilizada uma única corrida (80 t laminadas do mesmo lote) para evitar que a composição química pudesse nesta avaliação se tornar mais uma variável.

Buscou-se avaliar a influência do resfriamento na laminação a quente do aço 1008 nas propriedades mecânicas, sendo realizadas análises metalográficas e ensaios de tração após cada experimento.

Cinco bobinas de fio-máquina com aproximadamente 2 toneladas foram laminadas a quente para os experimentos de 1 a 6 e somente uma para o 7º experimento.

Durante os experimentos foram realizadas análises termográficas (18 pontos marcados no *Stelmor*) para mapear as características e variações de temperatura das espiras da saída do formador até o final da esteira quando é formada a bobina.

Após processamento foi realizada a inspeção de qualidade em que para cada bobina laminada foram descartadas as espiras iniciais. Foram retiradas 15 espiras

do início (“cabeça”) e 15 do final da bobina (“cauda”), pois poderia haver problemas de qualidade por se tratar do início e do fim da bobina.

Labib et al.⁽⁸⁾ realizaram testes utilizando a normalização por meio do processo *Stelmor*. Foram utilizados três diferentes aços carbono com manganês variando de 0.07wt.% a 0.67wt.% C (AISI 1008, 1019 e 1060). A primeira fase do resfriamento foi realizado através de resfriamento com água, enquanto a segunda fase foi realizada por meio de convecção forçada com ventilador. O aumento em porcentagem da abertura dos ventiladores aumenta significativamente a taxa de resfriamento, portanto diminui o tamanho de grão da ferrita, e o espaçamento da perlita dando origem a um aumento no limite de elasticidade e na resistência à tração.

Kazeminezhad e Taheri⁽¹⁰⁾ observaram os efeitos de diferentes condições de resfriamento para um fio-máquina com diâmetro de 5,5mm, após a laminação a quente em *Stelmor*. As propriedades mecânicas foram estudadas variando as condições de resfriamento das seguintes formas: abrindo e fechando as tampas dos ventiladores em sistema *Stelmor*, ligando e desligando-os. Isto foi realizado com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e ductilidade do material. Eles realizaram ensaio de tração, metalografia com analisador de imagens para Foram analisadas cinco condições distintas de resfriamento até encontrar a condição ótima necessária para alta resistência e ductilidade. A melhor condição foi a primeira em que a temperatura no início do resfriamento era 850°C. Na mesa transportadora, os ventiladores de 1 a 3 tiveram suas tampas abertas, enquanto que os de 4 a 7 tiveram suas tampas fechadas. Antes do ventilador 4 a temperatura do aço foi medida por um pirômetro óptico, e apresentou o valor de 570°C. Nesta condição de resfriamento, verificou-se que a temperatura da haste no intervalo entre a tampa 4 a 7 é constante.

2.1.2 Variáveis da laminação a frio

A trefilação é um processo a frio que pode ser utilizado para fabricar barras e arames (normalmente com geometria circular) em que uma força trativa atravessa uma fieira (ferramenta cônica) ou cassete ocasionando a redução de diâmetro.⁽⁴⁾

Atualmente também são utilizados cassetes para laminar a frio o vergalhão. Eles são uma montagem mecânica de componentes com anéis de metal duro, rolamentos precisos e robustos com sistemas de lubrificação e refrigeração integrados em um só equipamento que garante a conformação do material e precisão na saída do arame.⁽¹¹⁾

A redução no diâmetro da peça é em maior parte, devido ao escoamento plástico permanente do material, que é causado por uma reação de compressão realizada pela ferramenta no material enquanto este sofre a ação da força trativa. A força trativa é aplicada pelo outro lado da fieira ou cassete que puxa realizando a força necessária para que o material sofra redução e se obtenha o diâmetro esperado. Segundo Yang⁽¹²⁾ a deformação a frio foi um dos primeiros métodos para a produção de vergalhões. Neste tipo de processo embora a resistência seja obviamente aumentada por deformação a frio, a ductilidade é prejudicada na conformação.

Rocha⁽¹³⁾ fez uma pesquisa utilizando o FM 5,50mm com 0,12%C para obter vergalhão CA60, o mesmo verificou a necessidade da secagem do mesmo antes da laminação a frio.

Bernadic e Tittel⁽¹⁴⁾ realizaram uma pesquisa com aço de 0,22% de C para avaliar as propriedades mecânicas de vergalhões laminados a frio com 30,5% de redução, utilizando ensaios de tração. Foram avaliadas as propriedades mecânicas para

diâmetros distintos (4, 5,6, 8 e 10mm). O resultado médio da relação elástica obtida após a laminação a frio do material com 5,00mm de diâmetro foi de 1,09. O processo de laminação a frio provocou um endurecimento mecânico do material.

Os processos de conformação mecânica têm como principal mecanismo de geração de tensões residuais a heterogeneidade das deformações plásticas entre as várias regiões do material. De forma simples, entende-se por tensões residuais aquelas existentes em um corpo sem que estejam agindo sobre ele forças externas. As tensões residuais são elásticas e se superpõem as cargas de serviço, podendo ser benéficas ou não as estruturas e equipamentos, dependendo de sua magnitude, sinal e distribuição. ⁽⁶⁾

Se um corpo é altamente deformado em uma direção e então imediatamente recarregado na direção oposta, ele começa a fluir nessa direção com uma redução da tensão. Este é o efeito Bauschinger. ⁽¹⁵⁾

Ripoll et al. ⁽¹⁶⁾ propuseram a aplicação de uma geometria da matriz avançada realizando um tratamento pós-trefilação com base em operações de dobragem orientadas.

Para aumentar o alívio de tensões mecânicas foi confeccionado um dispositivo como ilustra a Figura 2, considerando a localização e o posicionamento do mesmo dentro do laminador. Ele foi soldado na parte final do laminador após o último cabrestante (peça cilíndrica com diâmetro externo de 760 mm) (Figura 3).

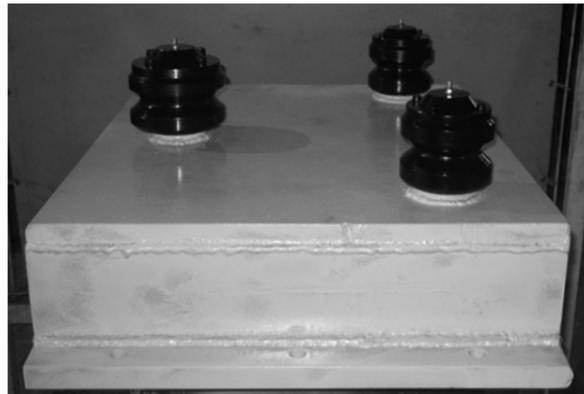


Figura 2. Dispositivo para alívio de tensões mecânicas.



Figura 3. Posicionamento do dispositivo no laminador.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pode-se observar na Figura 4 o resultado do mapeamento do perfil térmico dos experimentos 4 e 5. Nos dois experimentos, foi mantida a mesma velocidade no *Stelmor* (49m/s) e não foi utilizado o resfriamento. A alteração realizada foi na temperatura de formação da espira que foi aumentada em 40°C.

Como consequência pode-se verificar que no experimento em que foi utilizada uma temperatura mais alta no formador as espiras, as mesmas chegaram ao final da esteira no último ponto de verificação (18) com temperaturas mais altas. A taxa de resfriamento para o experimento 4 foi 14°C/s enquanto que para o experimento 5 foi de 10°C/s.

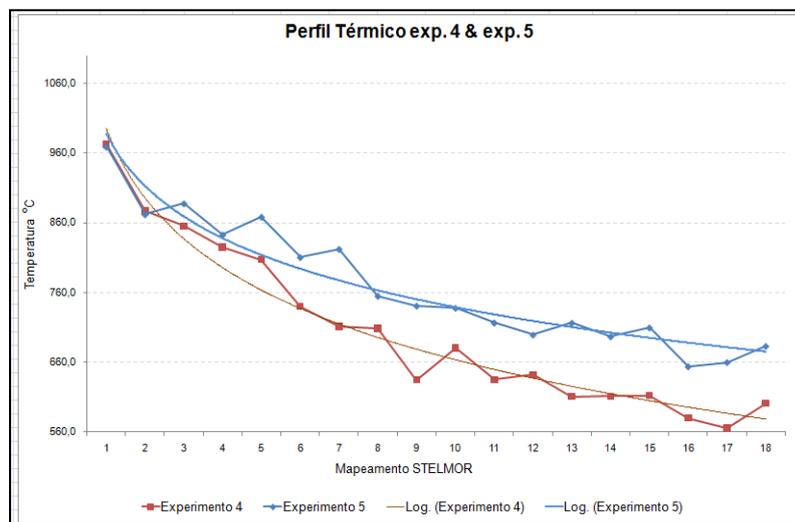


Figura 4. Gráfico do mapeamento por termografia das espiras do fio-máquina durante o resfriamento.

Os resultados das propriedades mecânicas do fio-máquina experimentos 1 a 7 são mostrados na Figura 5 os resultados de limite de resistência, limite de escoamento e redução de área para os experimentos realizados não apresentaram diferença significativa quando comparados. Isto indica que as alterações realizadas nos experimentos não foram suficientes para modificar drasticamente as propriedades mecânicas do fio-máquina. Na Figura 6 observam-se que os melhores resultados para a relação elástica foram obtidos nos experimentos 5 e 6. Nestes experimentos a relação elástica atingiu o valor de 1,04. A diferença entre os experimentos foi o aumento da temperatura no formador de espiras de 870 °C para 910 °C. Os parâmetros do laminador a frio não foram alterados. Os demais experimentos apresentaram valores abaixo de 1,04, inclusive para o experimento 3 (padrão) que apresentou relação elástica de 1,01.

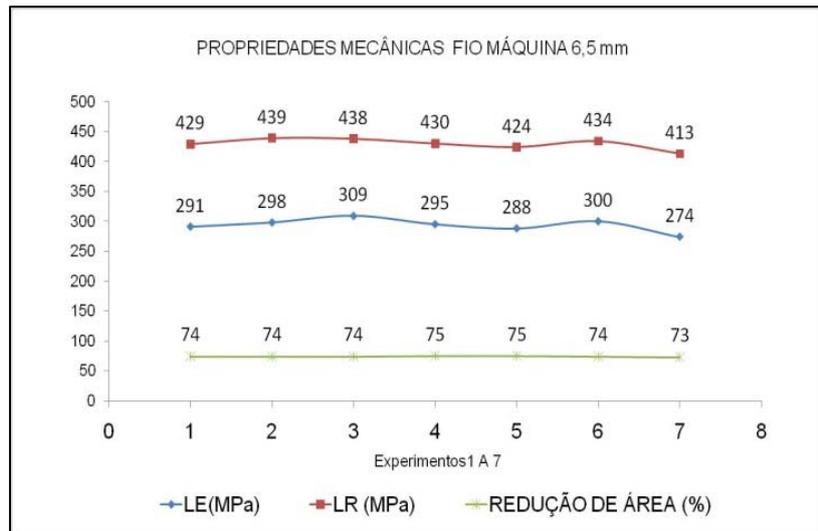


Figura 5. Gráficos dos resultados das propriedades mecânicas do Fio máquina.

Para todos os experimentos avaliados as amostras apresentaram microestruturas semelhantes e alguns pontos com grãos heterogêneos (Figura 6). Para medir o tamanho de grão foi utilizado o método planimétrico de acordo com a ASTM E112.⁽¹⁷⁾ O tamanho médio de grão obtido foi ASTM 9 e apresentou distribuição normal (Figura 7).

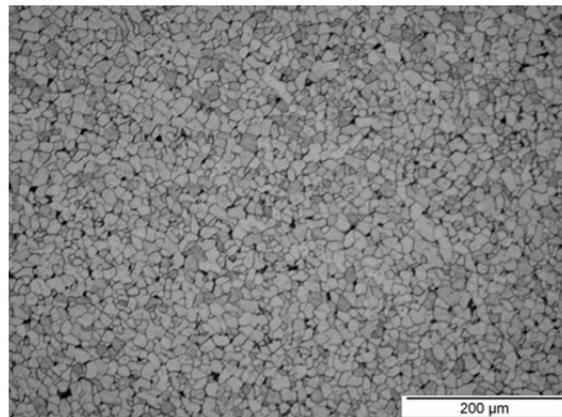


Figura 6. Micrografia do FM. 200x. Ataque Picral.

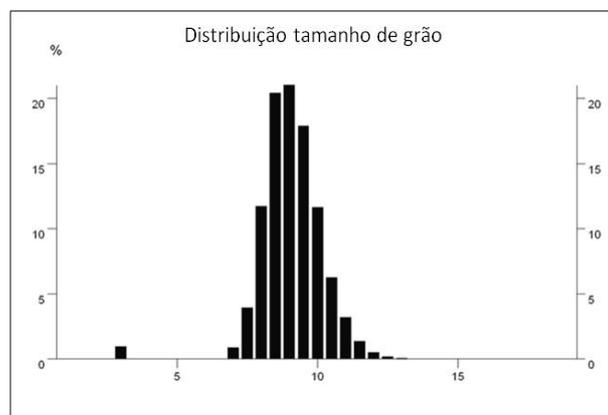


Figura 7. Distribuição do tamanho de grãos.

Foi realizada a medição da espessura das carepas nos fios-máquina por meio de microscopia óptica utilizando o software Analysis. Os experimentos 4 e 5 apresentaram a espessura de camada da carepa de 11,30 e 13,51 μm respectivamente como mostra a Figura 8. Os valores obtidos abaixo de 17 μm são excelentes para a decapagem mecânica do fio-máquina. Já o experimento 7 como ilustrado na micrografia da Figura 9 apresentou espessura de camada (22,25 μm) o que prejudica a decapagem.

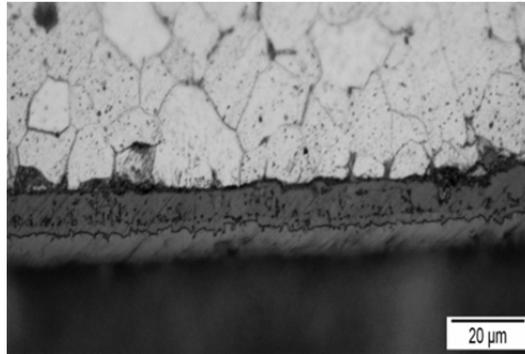


Figura 8. Micrografia da espessura da carepa do FM experimento 4 e 5. 1000x. Ataque Picral.

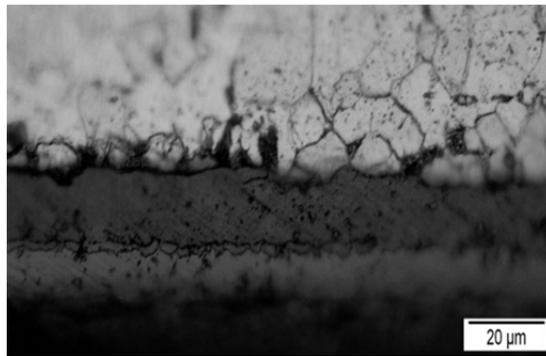


Figura 9. Micrografia da espessura da carepa do FM experimento 7. 1000x. Ataque Picral.

Os resultados das propriedades mecânicas do CA60, experimentos 1 a 7 são mostrados na Figura 10. Observam-se que os melhores resultados para a relação elástica foram obtidos nos experimentos 5 e 6. Nestes experimentos a relação elástica atingiu o valor de 1,04.

A diferença entre os experimentos foi o aumento da temperatura no formador de espiras de 870°C para 910°C. Os parâmetros do laminador a frio não foram alterados. Os demais experimentos apresentaram valores abaixo de 1,04, inclusive para o experimento 3 (padrão) que apresentou relação elástica de 1,01.

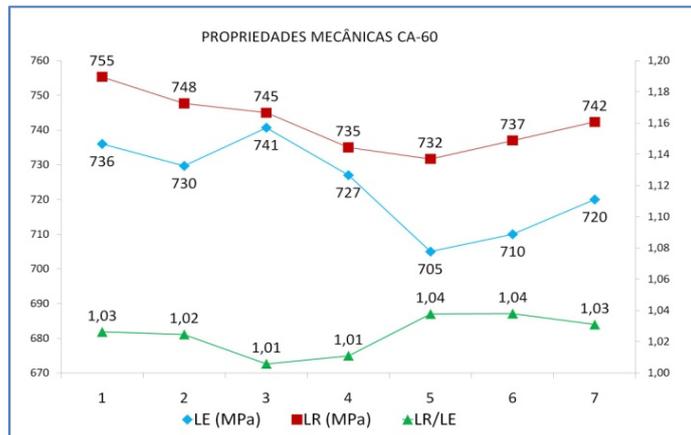


Figura 10. Gráfico dos resultados das propriedades mecânicas do Vergalhão CA60.

Como o valor mínimo de 1,05 para a relação elástica, definido por norma, não foi alcançado, foi necessário realizar experimentos adicionais com o objetivo de aumentar a relação elástica. Após a análise das propriedades mecânicas dos vergalhões e pesquisa definiu-se que deveria ser aumentado o alívio das tensões mecânicas durante o processo de laminação a frio.

Para aliviar as tensões mecânicas do vergalhão após a laminação a frio foi necessário fabricar um dispositivo.

Após a laminação a frio foi utilizando um dispositivo que aliviou as tensões mecânicas do vergalhão. Isto pôde ser observado quando se comparou as propriedades mecânicas do vergalhão obtidas antes e após a utilização do dispositivo.

Na Figura 11 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas obtidos após a laminação utilizando o dispositivo para alívio de tensões. Verifica-se que o alívio de tensões produziu uma queda acentuada no limite de escoamento do material que passou para 654 MPa e um decréscimo menor no limite de resistência que ficou em 710MPa. Em virtude disso a relação elástica aumentou consideravelmente atingindo 1,09 superando o mínimo especificado exigido por norma que é de 1,05.

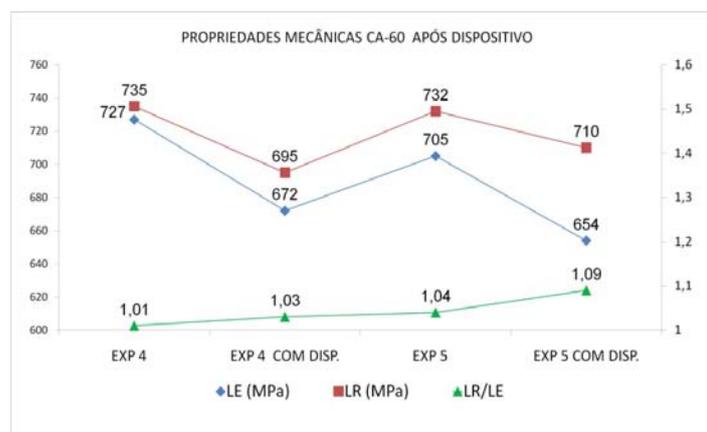


Figura 11. Gráficos de resultados das propriedades mecânicas do Vergalhão CA60 após utilização do dispositivo.

Realizando análise comparativa da redução na deformação a frio de grãos conforme ASM Metals Handbook-Metallography and Microstructures,⁽¹⁸⁾ a microestrutura do núcleo do CA60 avaliado após a utilização do dispositivo

apresenta menor redução, 20% de deformação (Figura 12), em relação à deformação verificada na superfície do material 40% (Figura 13).

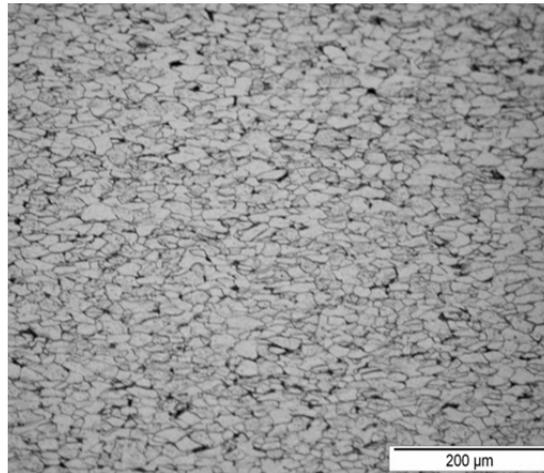


Figura 12. Micrografia CA60 experimento 4 e 5 após dispositivo. 200x. Núcleo com redução de 20%. Ataque Picral.

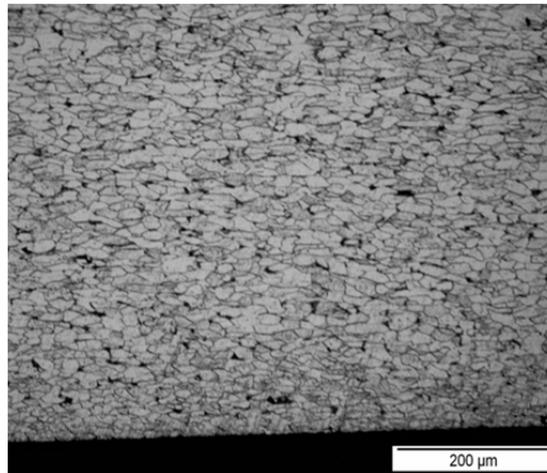


Figura 13. Micrografia CA60 experimento 4 e 5 após dispositivo. 200x. Superfície com redução de 40%. Ataque Picral.

Foi utilizado o Boxplot para avaliar estatisticamente os melhores resultados da relação elástica. Na Figura 14 o experimento 5 corresponde ao teste três, o experimento 5 com dispositivo corresponde ao teste quatro.

Analisando o Bloxplot da relação elástica o teste três apresentou resultados com menor dispersão, porém neste teste não foi alcançado o valor mínimo especificado para a relação elástica conforme norma ABNT 7480⁽²⁾ 1,05. O teste quatro apresentou resultados proporcionais em relação ao teste três, já que o Box apresenta valor médio de 1,09 para relação elástica, valor este acima do mínimo especificado por norma.

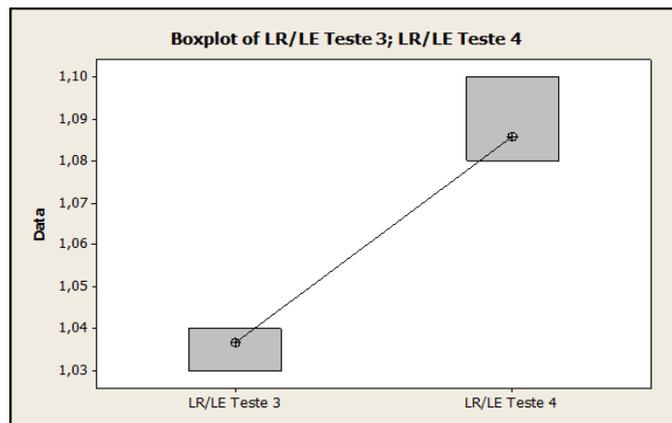


Figura 14. Gráficos Boxplot da relação elástica CA60.

4 CONCLUSÃO

As propriedades mecânicas dos aços na laminação a frio são alteradas de acordo com o tipo de aço utilizado, número de passes para redução e alívio de tensões mecânicas. A laminação a frio de aços baixo carbono para aços longos se mostra promissora, apesar de haver inúmeras pesquisas que utilizam aços médio carbono podendo haver adição de Vanádio ou Nióbio.

O vergalhão após a utilização do dispositivo para alívio de tensões mecânicas apresentou resultados que atendem a norma ABNT 7480/2007.⁽²⁾ O valor médio obtido de relação elástica passou de 1,04 para 1,09, utilizando aço baixo carbono com bitola de 6,5mm. Grande parte dos processos industriais utiliza a bitola de 5,50mm para fabricar CA60.

A possibilidade de alterar o diâmetro do fio máquina de entrada no laminador a frio, traz ganho na produtividade dos laminadores a quente e a frio.

Com os testes realizados foi possível conhecer a influência da alteração de algumas variáveis dos processos produtivos e reduzir custos mantendo a qualidade e as propriedades mecânicas do material.

Agradecimentos

Agradeço a Votorantim Siderurgia, a equipe da GPP (Gerenciamento de Produtos e Processos), a toda a equipe da GAC (Gerência de Acabamento) da usina de Resende, a todos que apoiaram o projeto direta ou indiretamente, pois sem eles, este trabalho não seria possível de ser realizado. Agradeço ao empenho de cada um durante o planejamento e execução dos testes e ao laboratório Metalúrgico pelo apoio ao realizar a análise dos produtos gerados nos testes.

Ao IME pela parceria com a Votorantim Siderurgia que me abriu portas na área de aços longos. Muito Obrigada!

REFERÊNCIAS

- 1 INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/instituto/index.asp>> Acesso em 06 jul. 2013.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado, 2007.
- 3 ANELLI, E. Application of Mathematical Modelling to Hot Rolling and Controlled Cooling of Wire Rods and Bars. ISIJ International. v. 32, N° 3, p. 440 – 449, 1992

- 4 DIETER, G. E. *Metalurgia Mecânica*. 2ª ed., Editora Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro:1981.653p.
- 5 BRESCIANI, E. F., SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. *Conformação plástica de metais*. Ed. UNICAMP, 6ª ed (1ª ed digital) 2011.257p.
- 6 LU, J., *Handbook of Measurements of Residual Stress*, Vol. 2, Ed. SEM, 2ed, p. 417, 2005.
- 7 WAN-HUA, Y., SHAO-HUI, C., YONG-HAI,K., KAI-CHAO,C. Development and application of online Stelmor Controlled Cooling System, *Applied Thermal Engineering*, v. 29, p. 2949 - 2953, 2009.
- 8 LABIB, H. F., MEGAHED, G.M., EL-MAHALLAWI, I., DASHWOOD, R.J., LEE, P.D. Simulation And Control Of The Cooling Of Hot Rolled Steel Wire Rod, *Current advances in mechanical design and production VII*, p. 389 - 396, 2000.
- 9 RIZZO, E. M. S. *Processos de Laminação de produtos Longos de Aço*. Associação Brasileira de Metais, 2010.350p.
- 10 KAZEMINEZHAD, M., TAHERI, A. K. The effect of controlled cooling after hot roling on the mechanical properties of a commercial high carbon steel wire rod. *Material of Design*. v. 24, p. 415 – 421, 2003.
- 11 BERNALDI, René Spagnol; MASEIRO, Paulo. A trefilação com uso de cassetes laminadores e suas vantagens em relação ao processo tradicional utilizando fieiras. In: SEMINÁRIO DE TREFILAÇÃO DA ABM, 3º, 2012, São Paulo, SP, Brasil. Anais... São Paulo: ABM, 2012. p.1-8. 1 CD-ROM.
- 12 YANG, C. Development of high strength Construction Rebars, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, 2010.
- 13 ROCHA, Fábio Augusto Costa. Desenvolvimento de um sistema de ventilação forçada para secar o fio máquina na laminação a frio de vergalhões. *Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 2012. 77 p.
- 14 BERNADIC, L., TITTEL, V. Effect of Cold Rolling and Artificial Aging on mechanical properties of Reinforcing Bars, *Machine Design*, v 4, N°1ISSN 1821-1259, p 11-14, 2012.
- 15 COTTRELL, A. H. *Dislocations and plastic flow in crystals*. Oxford University Press, p 111 e 132, 1953.
- 16 RIPOLL, RODRIGUEZ, M., SABINE, M., RIEDELA, W., RIEDELA, H., Reduction of Tensile Residual Stresses during the Drawing Process of Tungsten Wires. *Materials Science and Engineering*. A 527, 3064–3072, 2010.
- 17 ASM Metals. *HandBook – Metallography and Microstrut*. v. 9 p. 306.
- 18 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS E 112: *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, 2012.