

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO BORO NO AÇO 10B45 (FIO MÁQUINA E ARAME TREFILADO) ANALISANDO PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAS*

Viviane de Melo Borges¹
Jefferson Fabrício Cardoso Lins²

Resumo

O presente trabalho avaliou as influências da adição de boro nas características mecânicas e micro estruturais do fio máquina e arame trefilado. O estudo foi realizado por meio de análises no aço 10B45 com variações na adição de boro. Foi verificado que a adição de boro reduz a resistência do material. O boro reduz os efeitos do envelhecimento pois associa-se ao nitrogênio formando o nitreto de boro alocado no contorno de grão. Quanto maior a adição de boro menor resistência à trefilação, o que pôde ser comprovado pelo ensaio de torção. Através das micrografias de fio máquina foi possível evidenciar que o boro também atua como refinador de grão e inibe o crescimento do mesmo. Por fim, foi possível avaliar o modo de fratura relacionado com a quantidade de boro adicionada. Neste ponto não foi possível atribuir maior ductilidade à amostra com maior teor de boro.

Palavras-chave: Boro; Nitreto de boro; Fio máquina; Arames.

STUDY OF THE INFLUENCE OF BORON ON STEEL 10B45 (WIRE ROD AND DRAWN WIRE) ANALYZING MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURES

Abstract

The present work evaluated the influence of boron addition on the mechanical and micro structural characteristics of the wire rods and drawn wire. The study was about 10B45 steel with variations in the addition of boron. It has been found that the addition of boron reduces the resistance of the material. Boron reduces the effects of dynamic aging because it associates with nitrogen forming the boron nitride allocated in the grain boundary. The higher the boron addition the lower tensile strength, which could be proved by the torsion test. Through the wire rods micrographs it was possible to show that boron also acts as a refiner and inhibits the growth of the grain. Finally, it was possible to evaluate the mode of fracture related to the amount of boron added. At this point, it was not possible to assign higher ductility to the sample with higher boron content.

Keywords: Boron; Boron nitride, Wire rod, Drawn Wire.

¹ Engenheira Química, Mestranda, Engenheira de Processos, Gestão e Qualidade, Votorantim Siderurgia/Universidade Federal Fluminense, Resende, Rio de Janeiro – Brasil.

² Engenheiro Químico, Professor Doutor Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, PPGEM, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços carbono e ligados estão sempre evoluindo a fim de atender um mercado que demanda menos custos e melhores propriedades mecânicas. Vários são os elementos utilizados em ligas, no entanto o boro se destaca devido sua vantagem financeira em relação aos demais (sendo aqui mencionada a viabilidade financeira na indústria através da utilização da liga de FeB e não de Boro PA). Apenas pequenas dosagens já são suficientes para garantir ao material boa temperabilidade, baixa dureza no material na condição após laminação, alterações na ductilidade e redução dos efeitos do envelhecimento dinâmico⁽¹⁾.

O boro é caracterizado como um elemento de elevada capacidade de difusão na austenita, segregando rapidamente no contorno de grão da austenita antes da transformação da austenita em ferrita durante o resfriamento⁽²⁾.

1.1 Envelhecimento

O mecanismo de envelhecimento clássico se deve à presença de solutos intersticiais, carbono e/ou nitrogênio, restringindo o movimento das discordâncias. Entretanto, devido à maior solubilidade do nitrogênio do que a do carbono, o nitrogênio é o principal responsável pelo envelhecimento, apesar do soluto carbono também poder contribuir para esse fenômeno em altas temperaturas. Dessa forma, normalmente é reconhecido que o soluto nitrogênio é prejudicial às propriedades de conformação a frio do aço⁽³⁾.

Assim o envelhecimento é causado pelo obstáculo ao movimento das discordâncias devido ao ancoramento destas pelos átomos de nitrogênio, de pequeno raio atômico. Dessa forma, reduzir o teor de nitrogênio livre é uma forma efetiva de fazer com que as discordâncias possam se mover mais facilmente, reduzindo o efeito do envelhecimento⁽²⁾.

Portanto é necessário estabilizar ou eliminar a consequência do nitrogênio. Isto é conseguido pela adição de formadores de nitreto, dentre eles estão o boro, titânio, alumínio, vanádio e nióbio. O boro tem maior tendência a formar nitretos (Equação 1) que óxidos ou carbonetos, além disto, estes nitretos de boro não são prejudiciais ao arame devido ao seu pequeno tamanho. Mesmo em aços com alto teor de carbono quase todo o boro irá formar nitretos e uma quantidade mínima irá formar carbonetos⁽⁴⁾.



A formação de nitreto de boro diminui a quantidade de nitrogênio livre, além de ajudar na diminuição da quantidade de ferrita pró-eutetóide, minimizando os efeitos do primeiro estágio do envelhecimento⁽²⁾.

Há inúmeras vantagens do boro na formação de nitretos em relação aos demais elementos. Um fator importante é a eficiência estequiométrica com o nitrogênio 1:1⁽⁴⁾.

1.2 Temperabilidade

Existem algumas explicações que descrevem os mecanismos do efeito do boro na temperabilidade. O fato comum a todas as explicações é que a segregação do boro nos contornos de grão austeníticos influencia no processo de nucleação da ferrita, no entanto não apresenta alterações nas características termodinâmicas da austenita e ferrita⁽⁵⁾.

O primeiro parâmetro a considerar quando se analisa a temperabilidade através do efeito do boro é justamente a quantidade de boro solúvel, ou seja, a quantidade de boro livre para segregar nos contornos de grão e formar precipitados. Segundo a maioria dos autores, a faixa ótima de solubilidade do boro é entre 10 e 30 ppm. É bastante comum, aços comerciais ao boro conterem maior percentual de boro do que irão dissolver (condições normais de austenitização entre 845 a 925°C). Posteriormente, a austenita saturada de boro resfria, e os átomos dissolvidos tendem a segregar nos contornos de grão⁽⁶⁾.

É bastante conhecido que uma pequena quantidade de boro aumenta significativamente a temperabilidade dos aços. Esse efeito é atribuído à segregação em contorno de grão mencionada, na qual retarda a transformação difusional da austenita em ferrita através da diminuição da energia interfacial do contorno de grão da austenita. Entretanto, há uma quantidade limite de boro, o excesso desse elemento induz a precipitação no contorno de grão da austenita como borocarbonetos, $M_{23}(C,B)_6$, que age como sítios preferenciais para nucleação da ferrita, o que piora a temperabilidade do aço. Com o objetivo de maximizar o efeito do boro na temperabilidade, é necessário controlar a segregação e precipitação do boro, o que normalmente depende dos outros elementos de liga adicionados e dos parâmetros de processo como, temperatura de austenitização, deformação e velocidade de resfriamento⁽⁷⁾.

1.3 Influência na trefilação

Como o boro em solução sólida é um importante elemento inibidor da formação de ferrita, este evita efetivamente trincas longitudinais na superfície do arame. O boro não produz este efeito em aços eutetóides e hipereutetóides, no entanto o boro elimina a formação da ferrita em aços eutetóides e hipereutetóides tão bem quanto em hipoeutetóides, prevenindo efetivamente trincas longitudinais, só que o efeito neste caso não é na forma de compostos de boro, mas sim o efeito de boro livre em solução sólida⁽⁸⁾.

A fim de permitir uma boa trefilabilidade do material, deverá haver uma combinação entre as propriedades mecânicas e microestruturais. Uma melhor performance na trefilação pode ser analisada através do coeficiente de encruamento (calculado neste trabalho pela Equação de Hollomon – Equação 2) e o número voltas no teste de torção em arame.

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (2)$$

Onde:

σ = Tensão Real (MPa)

ε = Deformação Real

n = Coeficiente de encruamento

k = Constante

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

Os aços comerciais utilizados para este trabalho foram produzidos na Unidade da Votorantim Siderurgia. Os elementos químicos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química das amostras (% em peso)

Lotes	Carbono	Fósforo	Enxofre	Manganês	Boro	Nitrogênio
Lote 1	0,44	0,03	0,01	0,69	0,0000	0,0103
Lote 2	0,45	0,03	0,01	0,68	0,0032	0,0090
Lote 3	0,45	0,02	0,02	0,60	0,0047	0,0090
Lote 4	0,46	0,03	0,01	0,63	0,0060	0,0089

Fonte: Certificado de Qualidade Votorantim Siderurgia

2.2 Métodos

2.2.1 Produção

O aço foi produzido em aciaria elétrica passando pelos processos de fusão e refino (forno elétrico); ajuste químico e térmico (forno panela) e solidificação (lingotamento contínuo).

Em seguida os tarugos foram laminados a quente gerando um dos produtos da análise, o Fio Máquina 5,5mm. A velocidade do laminador foi acima de 100 m/s e o tratamento térmico realizado com ar forçado.

Em seguida o fio máquina foi trefilado. Para este processo foi utilizado máquina de fieira, 8 passes, e velocidade acima de 20 m/s. Com uma redução total de 77% é produzido o arame ovalado 2,65mm com aplicação principal em cercas no ramo agropecuário.

2.2.2 Tratamento das amostras

A composição química dos lotes foi analisada durante o processo do forno panela na Aciaria Elétrica. Para esta análise utilizou-se o espectrômetro óptico.

A fim de analisar a composição química em uma única variável foi calculado, para cada lote, o carbono equivalente (CEQ) correspondente. A fórmula utilizada é a de soldabilidade indicada na norma ABNT NBR 8965:1985.

Os ensaios de tração foram realizados conforme norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013, nas amostras de fio máquina e arames. A fim de verificar a ductilidade dos arames foi realizado o ensaio de torção simples por meio da norma ABNT NBR 6003:1984. O ensaio consistiu em torcer as amostras no eixo da máquina e no mesmo sentido até sua ruptura. Foi considerado apenas o número completo de voltas para cada amostra. Para o arame ovalado estudado, a norma não prevê o número mínimo de voltas. Esta especificação é um consenso entre os fabricantes do produto, de acordo com sua utilização. O valor mínimo estipulado é de 25 voltas por amostra.

Para a caracterização metalográfica, foram retiradas das seções transversal do fio máquina e longitudinal para o arame trefilado. A preparação das amostras abrangeu as etapas de corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico com o reagente Nital 2%.

As análises metalográficas foram realizadas por meio do microscópio ótico. O microscópio possui uma câmera acoplada e um analisador de imagens.

Para análise do tamanho de grão austenítico, foram retiradas amostras do fio máquina de 10 cm de comprimento e dispostas na estufa durante 3h na temperatura de 950°C. As condições de temperatura e tempo foram definidas a partir da

temperatura de austenitização deste aço. As atividades realizadas para análise do tamanho de grão estão de acordo com a norma ABNT NBR 7555:1990.

Para a análise fractográfica, as imagens foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura. O equipamento foi operado no modo de elétrons retroespalhados com aceleração do feixe eletrônico de 20 kV. A distância de trabalho adotada foi da ordem de 14 mm e as imagens capturadas com ampliações de 2000 vezes.

O software livre Image J foi utilizado para quantificar o percentual presente da fase na microestrutura, obter o tamanho de grão médio e a quantificar os *dimples* presentes. O software Image J foi validado para analisar imagens relacionadas a microestrutura de materiais⁽⁹⁾. Tanto para as análises de percentual de fase, quanto para tamanho de grão, foram utilizadas 10 imagens. O primeiro ponto foi realizar a calibração do Image J. Em seguida foi inserido um filtro a fim de ressaltar a diferença entre os tons da imagem. Por fim, foi dado o comando para medir a quantidade da fase através da diferenciação pela cor ou a indicação para a contagem dos grãos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fio máquina

A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas do fio máquina com suas respectivas variações.

Tabela 2 - Resultados de CEQ e propriedades mecânicas das amostras de FM

Lotes	CEQ (%)	LE (kgf/mm ²)	LR (kgf/mm ²)	AL (%)
Lote 1	0,530± 0,002	51,05± 2,18	79,63± 1,06	17,95± 1,05
Lote 2	0,599± 0,005	53,68± 1,94	82,77 ± 0,98	16,87± 0,98
Lote 3	0,587± 0,004	52,25± 2,48	80,12± 1,17	17,85± 0,48
Lote 4	0,603± 0,006	49,27± 2,86	77,85± 1,38	18,40± 0,47

Fonte: Do autor

Nota-se a redução do LE e LR com o aumento do teor do boro entre os lotes 2, 3 e 4. De acordo com REIS⁽²⁾ e COE et al⁽⁴⁾ a adição de boro reduz o nitrogênio livre reduzindo os efeitos do envelhecimento com a precipitação do BN. O envelhecimento, por sua vez, é o conjunto de variações das propriedades mecânicas pela interação dos átomos de solutos intersticiais (exemplo o nitrogênio) com as discordâncias, que implicam em elevação do LR e redução da ductilidade. No presente trabalho, verificou-se que quanto maior o teor de boro menores os valores de limite de resistência e/ou escoamento, o que sugere menor efeito do envelhecimento.

Observa-se que o lote 1 (0ppm B) obteve resultados inferiores aos lotes 2 e 3. Isso pode ser explicado, pois o Lote 1 obteve um valor de CEQ inferior aos demais. As propriedades dos aços carbono são afetadas pelas variações de sua composição química, sendo de maior impacto os elementos presentes na fórmula do CEQ (C; Mn; Cr; V; Mo; Cu; Ni). Os valores de propriedades mecânicas do Lote 1 (0 ppm B) foi superior apenas ao Lote 4 (60ppm B), o que sugere inversão dos efeitos mencionados.

A Figura 1 ilustra as curvas compiladas de tensão versus deformação. Para a montagem da figura utilizou-se as curvas com resultados mais aproximados dos valores médios apresentados na Tabela 2

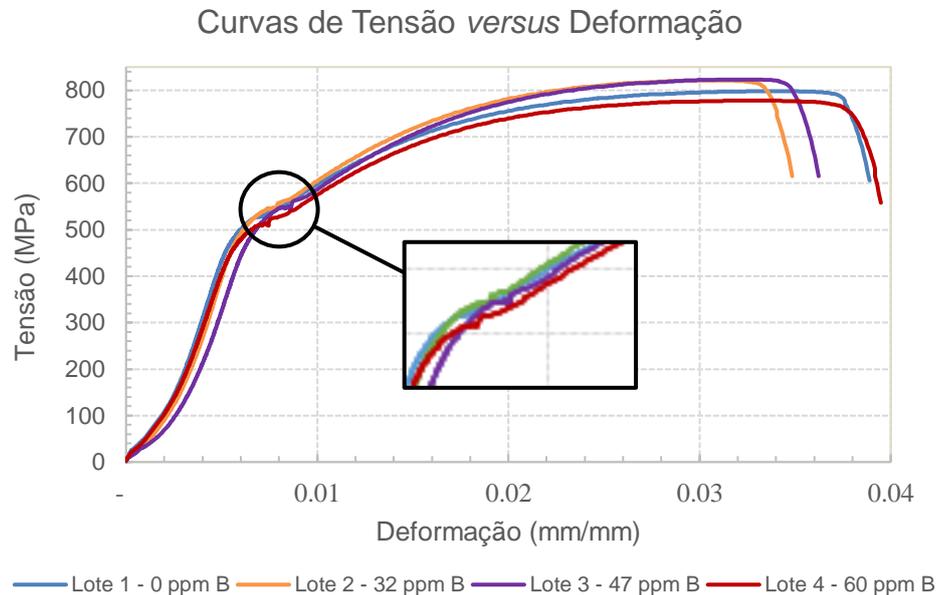


Figura 1 - Curvas tensão versus deformação para o aço 1045. Destacada região de serrilhamento.
Fonte: Do autor

A Figura 1 destaca as diferenças entre LE e LR já mencionadas. Nota-se que na área de encruamento é possível identificar uma região de serrilhamento, também conhecido como efeito de *Portevin-LeChatelier*. Este comportamento é acompanhado pelo aumento das taxas de encruamento, dependência negativa da taxa de deformação com o escoamento da deformação e redução da ductilidade⁽¹⁰⁾. Em aços comerciais, esse fenômeno acontece em função da interação, durante a deformação, das discordâncias com os átomos de nitrogênio. Ou seja, como se houvessem “travamentos” para deslocamento das discordâncias, pelo nitrogênio livre na matriz. A região de serrilhamento denota o efeito causado pelo envelhecimento nos aços.

A partir dos dados das curvas de tensão *versus* deformação foi possível o cálculo do coeficiente de encruamento a fim de predizer o comportamento das amostras durante a trefilação. Utilizou-se os dados da fase plástica de cada material e a Equação de Hollomon para cálculo. A Figura 2 apresenta o índice de encruamento em relação a quantidade de boro adicionada.

O coeficiente de encruamento (n) relaciona-se diretamente proporcional a maior conformação dos aços⁽¹¹⁾. Verifica-se que o índice de conformação aumentou entre os lotes 1 a 4. Ou seja, os lotes com boro têm maior conformação mecânica que o material sem boro.

Nota-se que há uma redução do coeficiente entre os lotes 2, 3 e 4. Este efeito não era esperado, pois com a adição de boro os efeitos do envelhecimento são reduzidos e há uma melhor trefilabilidade do material. Assim era esperado um aumento do coeficiente de encruamento entre os lotes 2, 3 e 4. Uma suposição para o resultado encontrado é que nem todo nitrogênio está de forma “livre” na matriz.

Assim maiores adições de boro não contribuiriam para aumento da trefilabilidade já que não seriam formadas maiores quantidades de nitreto. O resultado sugere que na adição de 30 a 47ppm de boro, todo o nitrogênio livre já seria capturado. Esta suposição está alinhada com o resultado encontrado no teste de torção dos arames mais adiante.

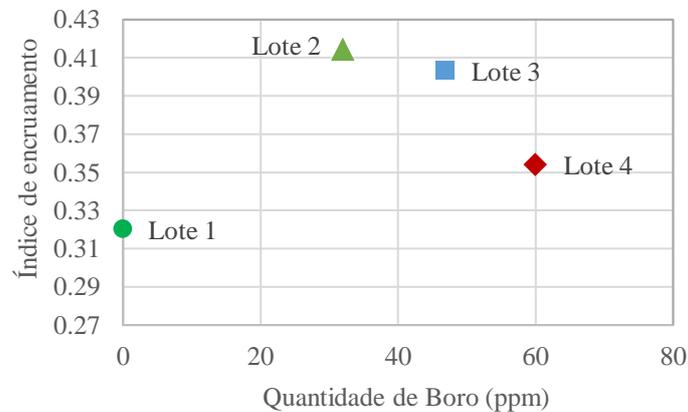


Figura 2 - Índice de encruamento (Equação de Holomon) versus a quantidade de boro de cada respectivo lote.

Fonte: Do autor

Em relação às microestruturas do fio máquina, o primeiro ponto notado é a presença de perlitas finas devido à laminação em alta velocidade. Nos lotes com presença de boro, nota-se grãos ainda mais finos, pois o boro atuou como refinador de grão⁽²⁾.

A adição de boro modifica sensivelmente o diagrama Fe-C⁽¹²⁾. A presença do boro desloca o ponto eutetóide para a esquerda reduzindo a formação de ferrita pró-eutetóide por reduzir a energia livre nos contornos de grãos austeníticos. Esta teoria foi comprovada a partir da quantificação das fases entre os Lotes 1 e 4 (Figura 3).

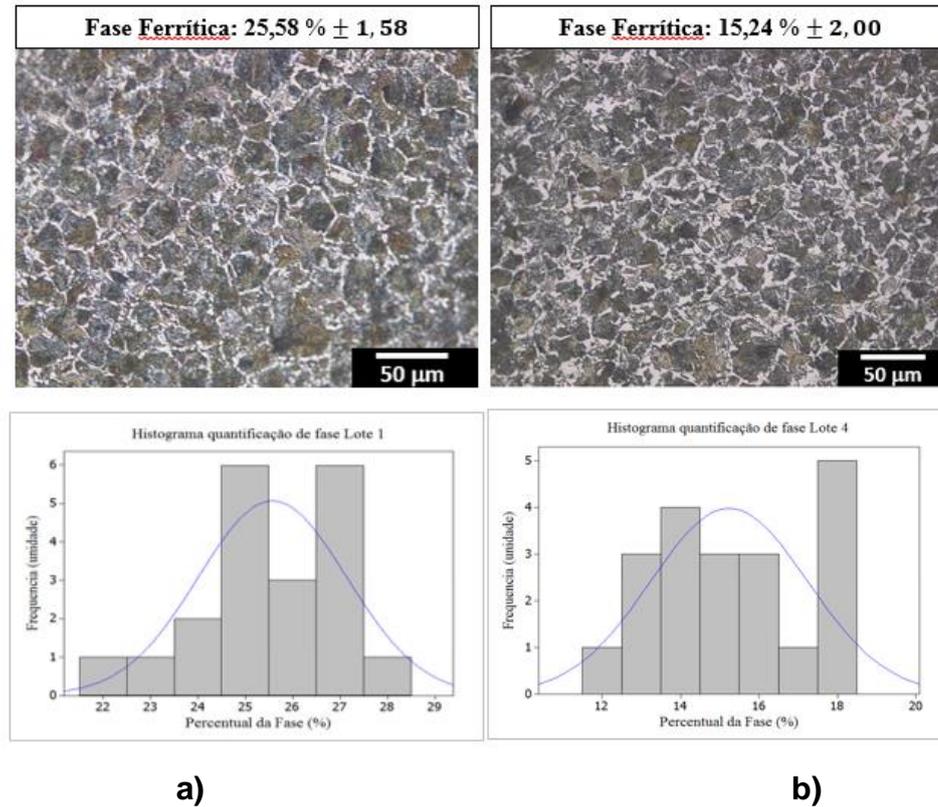


Figura 3 - Micrografias de FM na secção transversal de laminação e seu respectivo histograma de quantificação de fase ferrítica, sendo: a) Lote 1 (0 ppm B) e b) Lote 4 (60 ppm B).

Fonte: Do autor.

Além do impacto do diagrama ferro-carbono, a adição de boro influencia no tamanho do grão na microestrutura. A precipitação de BN no contorno de grão austenítico impede o mesmo de crescer durante o processo de aquecimento⁽²⁾. Na Figura 3 é possível avaliar que as colônias de perlita do Lote 1 (a) são ligeiramente maiores em relação ao Lote 4 (b). Para determinar a diferença foi realizado a análise do tamanho de grão austenítico (Figura 4). A adição de 60ppm de boro implicou em uma redução do tamanho de grão austenítico da ordem de 37%.

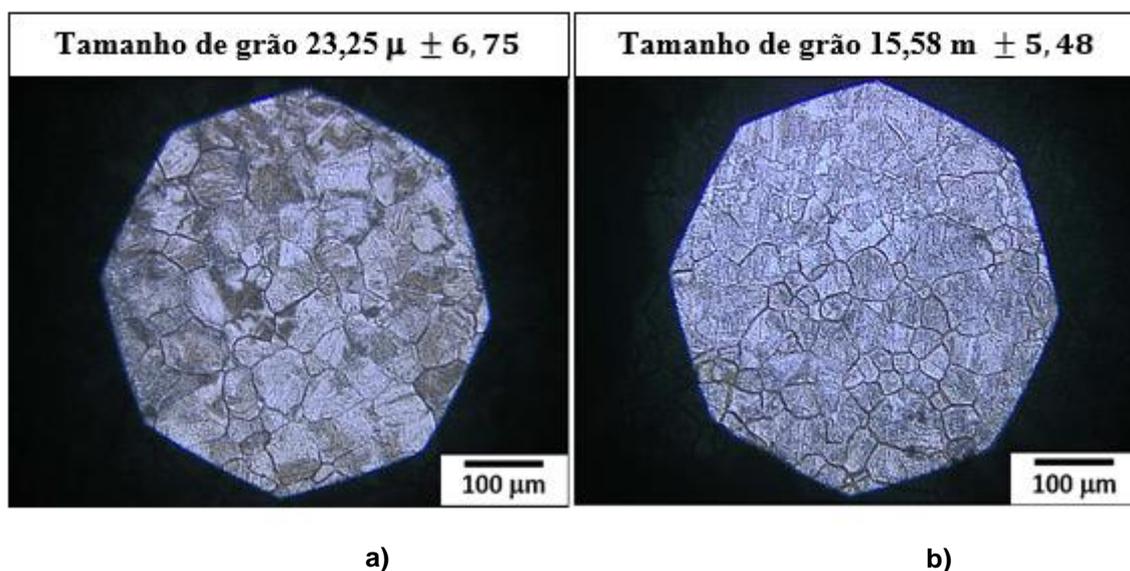


Figura 4 - Micrografias de fio máquina após tratamento para revelação do tamanho do grão austenítico. Onde, a) Lote 1 (0 ppm B) e b) Lote 4 (60 ppm B).

Fonte: Do autor

Ainda nas amostras de fio máquina, foi aplicada uma ampliação de 2000 vezes nas micrografias, via microscópio óptico (Figura 5). Com esta ampliação foi possível identificar como o espaçamento lamelar das perlitas é sensivelmente maior na amostra isenta de boro em comparação ao lote com boro. Confirmando a função de inibição de crescimento e refinador de grão atribuída a adição de boro no material.

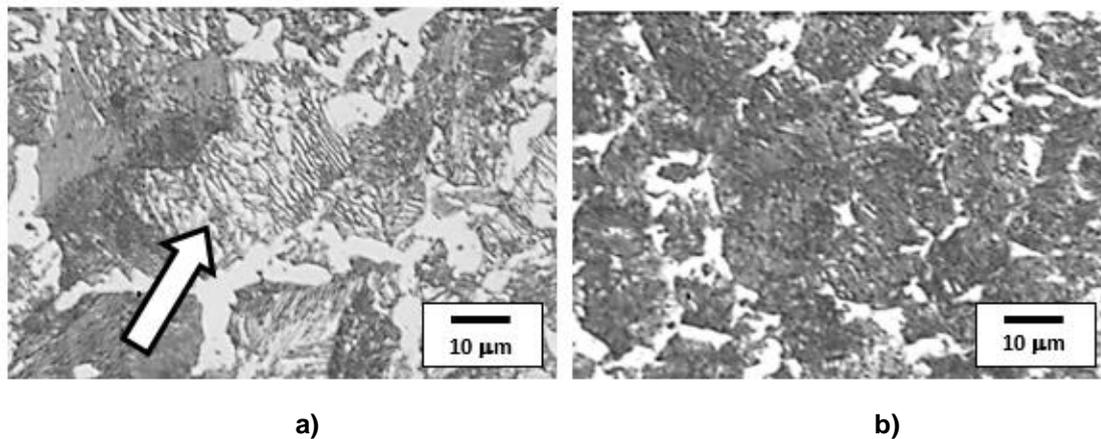


Figura 5 - Micrografias FM, na secção transversal de laminação, sendo a) Lote 1 e b) Lote 4. Em destaque uma colônia de perlitas com espaçamento maiores.

Fonte: Do autor

Com o auxílio do microscópio de varredura foi realizado a análise de fratura em amostras de fio máquina após o ensaio de tração dos lotes 1 e 4. A análise tem o objetivo de confirmar o impacto do boro na ductilidade das fraturas.

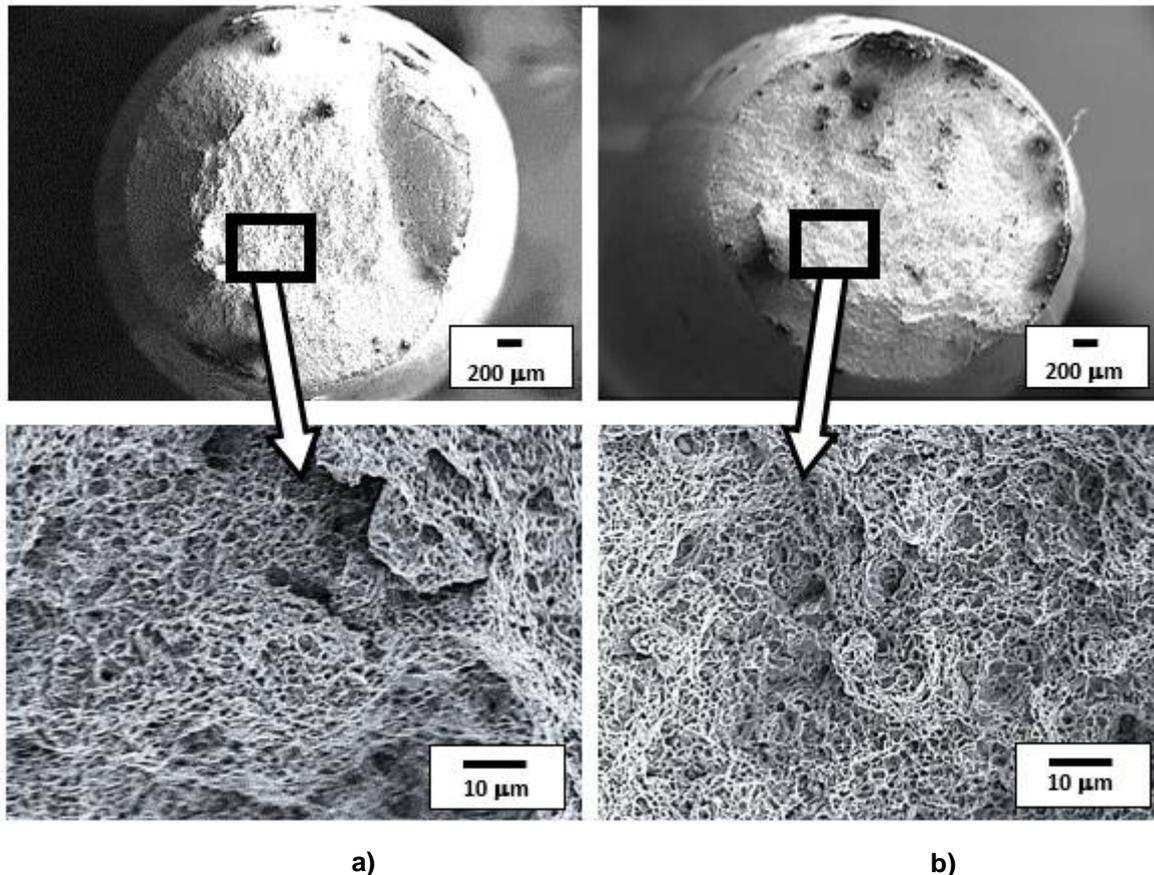


Figura 6 – Fratura do fio máquina após o ensaio de tração e corresponde região de dimples a ser quantificada, sendo: a) Lote 1 (0 ppm B) e b) Lote 4 (60 ppm B). MEV – imagem no modo de elétrons retroespalhados 20 kV e WD de 14mm.

Fonte: Do autor

A Figura 6 apresenta a formação e coalescimento de micro cavidades (*dimples*) equiaxiais de tamanhos variados. Os pontos destacados na figura são as regiões onde as imagens dos *dimples* foram capturadas para a análise.

Através da análise da quantificação de *dimples* em cada micrografia foi avaliado a intensidade da ductilidade em ambas fraturas. Para o Lote 1 foi encontrado um percentual de $37,32\% \pm 6,31$ de *dimples* e para o Lote 4 foi de $46,79\% \pm 4,67$.

Através dos resultados não foi possível identificar maior intensidade na ductilidade dos materiais pois o desvio padrão mantém a quantificação de *dimples* equivalente. É possível apenas afirmar que ambas fraturas são dúcteis.

3.2 Arame trefilado

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas encontradas para o arame. Foram realizados 5 ensaios com cada amostra. Verifica-se que impacto percebido pelo CEQ no fio máquina para o Lote 1 não foi evidenciado também no arame. Este resultado sugere que os efeitos relacionados a alteração da morfologia dos grãos são maiores que os impactos relacionados a composição química.

Tabela 3 - Resultados médios das propriedades mecânicas do Arame Ovalado

Lotes	LR	AL	Número de Voltas
-------	----	----	------------------

	(kgf/mm ²)	(%)	(Unidade)
Lote 1	143,49± 0,36	6,00± 0,44	18,25 ± 4,03
Lote 2	141,00 ± 1,00	7,77± 0,15	28,65 ± 0,58
Lote 3	133,33± 2,52	7,93± 0,58	26,68 ± 2,89
Lote 4	132,00± 1,73	7,73± 0,46	28,67 ± 2,08

Fonte: Do autor

Para o limite de resistência há um comportamento descendente entre o Lote 1 ao 4, o que indica que para os arames o efeito do envelhecimento é relevante. Desta maneira quanto maior o percentual de boro adicionado, menor a quantidade de nitrogênio livre na matriz e, portanto, menor resistência ao movimento das discordâncias. O nitreto de boro formado no contorno de grão, atua como um lubrificante durante a trefilação o que confirma a redução do limite de resistência⁽³⁾.

A Figura 7 ilustra os resultados dos quatro testes de torção aplicados às amostras de arame. De acordo com a aplicação deste produto o número mínimo de voltas exigido pelo mercado é de 25 voltas sem que haja nenhuma ruptura no arame. Os arames do Lote 1 (sem adição de boro), quebraram sem atingir o número mínimo de voltas. Já os Lotes 2, 3 e 4 (com adição de boro) tiveram performances similares e acima do limite mínimo estipulado.

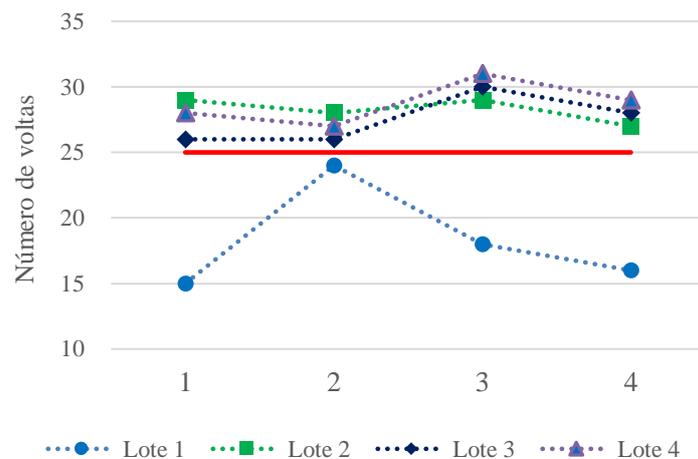


Figura 1 - Resultados dos testes de torção nos arames trefilados, onde Lote 1 (0 ppm B), Lote 2 (32 ppm B), Lote 3 (47 ppm B), Lote 4 (60 ppm B).

Fonte: Do autor.

A adição de boro elevou a ductilidade do material. Sem a presença de boro, o nitrogênio atuou com o elemento intersticial e evitou o movimento livre das discordâncias, o que resultou na quebra das amostras.

Era esperado maior ductilidade para o lote 4, seguidos dos lotes 3, 2 e 1. No entanto, o comportamento equivalente entre os lotes 2, 3 e 4 sugere que na menor adição de boro efetuada - 32ppm, o nitrogênio disponível da matriz já é segregado na forma de nitreto de boro. Assim as maiores quantidades boro nos demais lotes não resultaram em maior maleabilidade. Outra hipótese que pode explicar esse

fenômeno é que nem todo nitrogênio está livre na matriz⁽²⁾. Assim, nem sempre, adições gradativas de boro conferem ao material maior ductilidade.

O resultado descrito acima confirma os resultados encontrados para o cálculo do coeficiente de encruamento do fio máquina.

4 CONCLUSÃO

A adição de boro se tornou efetiva para reduzir os efeitos do envelhecimento, reduzindo o volume de nitrogênio livre na matriz com a precipitação de BN no contorno do grão. Isto foi comprovado com a redução dos limites de resistência tanto no fio máquina como nos arames.

Através dos ensaios de tamanho de grão no fio máquina, foi possível notar a capacidade do boro de atuar como inibidor do crescimento do grão. Evidenciado de que o espaço interlamelar nas colônias de perlita é sensivelmente maior na amostra sem boro.

Ainda nas análises de micrografia do fio máquina, foi possível evidenciar a alteração provocada pela adição de boro no diagrama ferro carbono. A amostra com maior teor de boro apresentou maior volume de fase ferrítica que a amostra sem boro.

No ensaio de torção houve comportamento similar nos arames com boro, já a amostra sem boro não atingiu o número mínimo de voltas sendo reprovada no teste. Por fim, por meio das análises fractográfica, não foi possível verificar o aumento da intensidade da ductilidade nas amostras com boro, apenas comprovar a ductilidade das fraturas.

REFERÊNCIAS

- 1 MAITREPIERRE, PH.; ROFES-VERNIS, J.; THIEVELLIER, D. Structure- Properties relationships in boron Steels. AIME, p. 1, 1979.
- 2 REIS, L. Estudo do efeito do boro e das condições de trefilação na delaminação de aços perlíticos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 83p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica), 2009.
- 3 GONZALEZ, B.M.; BUONO, V. T. L.; VILELA, J. M. C E MANTEL, M. J. The influence of copper addition on the formability of AISI 304 stainless steel. Revista Materials Science and Engineering, v 343, p 51-56, 2003
- 4 COE, C.L., GORDON, A.T. Method for making strain aging resistant steel. EUA, 2006.
- 5 WANG, X. M.; HE, X. L., Effect of Boron Addition on Structure and Properties of low Carbon Bainitic Steels, ISIJ International, Vol. 42, 2002.
- 6 KAPADIA, B.M. Effect of Boron Additions on the Toughness of Heat-Treated Low Alloy Steels, v 5, n 1, 1987.
- 7 HAN, F.; HWANG, B.; SUH, D-W.; WANG, Z. LEE, D. L.; KIM, S-J. Effect of molybdenum and chromium on hardenability of low-carbon boron-added steels. Revista Metals and Materials International, v 14, p 667, 2008.
- 8 NAGAO, M. Very thin, high carbon steel wire and method of producing same. US7258756. KOBE STEEL. 21 ago. 2007
- 9 NICHOLSON, M. E. Trans. AIME, p 185, 1954.
- 9 CRUZ, M. L. P. S.; REBOLLO, R. R. F.; PÉREZ, J. C.; LÓPEZ, G. F. G; BELTRÁN, L. A. e DOMÍNGUEZ, G. C. Evaluation of Image Analysis Tools for Characterization of Sweet Bread Crumb Structure. Food and Bioprocess Technology, v5, p 474-484, 2006.
- 10 TAHERI, A. K.; MACCAGNO, T. M. e JONAS, J. J; Dynamic Strain Aging and the Wire Drawing of LQW Carbon Steel Rods, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. ISIJ International. Vol, 35, n. 12, p. 1532-1540, 1995

- 11 VOGT, J-B; ANTOINE, P.; e VANDEPUTTE, S. Empirical model predicting the value of the strain-hardening exponent of a Ti-IF steel grade. Universidade de Lille, França. Revista científica Materials Science & Engineering, volume 433, p 55-63, 2006.
- 12 SHEN, X. P. e PRIESTNER, R. Effect of boron on the microstructure and tensile properties of dual-phase steel. Metallurgical Transactions A, v 21, p 2547 – 2553, 1990.