

ESTUDO DO EFEITO DO BORO E DAS CONDIÇÕES DE TREFILAÇÃO NA DELAMINAÇÃO DE AÇOS PERLÍTICOS¹

Luciano de Castro Reis²
Vicente Tadeu Lopes Bueno³
Francisco José Martins Boratto⁴
Leandro Aparecido Marchi²

Resumo

Neste trabalho foi estudado o efeito exercido pelo boro e pelas condições de trefilação na ocorrência do fenômeno da “delaminação” em arames de aço perlítico. Foi constatado efeito positivo do boro e que este efeito é exercido pela minimização do primeiro estágio de envelhecimento, provavelmente pela redução de nitrogênio em solução sólida. Esta melhoria é mais pronunciada quando associada a uma redução da velocidade de trefilação. Este segundo fator possibilita uma menor geração de calor durante a trefilação, evitando-se assim níveis de temperatura que aceleram o envelhecimento. Um terceiro parâmetro, o esquema de passes de trefilação, foi também avaliado através da introdução de *skin pass*, no final da trefilação. Este parâmetro não se mostrou tão efetivo quanto o efeito do boro ou a velocidade de trefilação. Um dos efeitos deletérios da “delaminação” é um pior desempenho no ensaio de torção de arames, conforme foi confirmado aqui, após ensaios de torção instrumentados com células de torque.

Palavras-chave: Delaminação; Boro; Nitrogênio; Envelhecimento.

STUDY OF BORON EFFECT AND DRAWING CONDITIONS ON DELAMINATION OF PEARLITIC STEEL

Abstract

The addition of boron, and drawing parameters, were studied with respect to the occurrence of “delamination” in steel wires of pearlitic composition. The presence of boron reduced the chance of “delamination”, probably due to the reduction of nitrogen in solution, which hinders the effects of ageing. This beneficial effect of boron is improved, if associated with a reduction in drawing speed. The reduction of drawing speed also reduces the wire temperature which could lead to ageing phenomena to develop. A third factor was studied here, the scheme of drawing passes with “skin pass” at the end, but this was not as effective as the effect of boron or drawing speed. One of the effects of “delamination” is the reduction of performance of wires in instrumented torsion tests with torque cells, which was confirmed here.

Key words: Delamination; Boron; Nitrogen; Strain Ageing.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Mestre, Engenheiro Metalurgista. ArcelorMittal Monlevade.

³ Doutor, Físico. Professor Associado, DEMET/UFMG.

⁴ PhD, Físico. Consultor Sênior ArcelorMittal Monlevade.

1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas observados com o aumento do limite de resistência dos arames devido ao encruamento é a ocorrência de delaminação. Delaminação é um defeito que ocorre somente em aços perlíticos encruados e é caracterizado por trincas longitudinais e uma queda de torque após o início da deformação plástica na curva torque-deformação durante o ensaio de torção. Alguns fatores que podem estar associados a este tipo de defeito são: microestrutura, encruamento, defeitos superficiais, defeitos internos, envelhecimento estático e dinâmico, diâmetro do fio-máquina e textura.

A trefilação é um processo eficaz utilizado para aumento da resistência de aços completamente perlíticos com nível de ductilidade aceitável. Mudanças microestruturais e no comportamento da deformação da perlita durante a trefilação são relacionadas estreitamente à microestrutura inicial da perlita. As características principais destas mudanças durante o encruamento são associadas a um alinhamento progressivo das lamelas ao longo do eixo de trefilação, redução do espaçamento interlamelar e diminuição da espessura das lamelas de cementita.⁽¹⁾

Estudos da deformação plástica da perlita mostraram que o processo de alinhamento é caracterizado por um estágio inicial no qual as lamelas de ferrita e cementita tendem a se alinhar ao longo do eixo de deformação, seguido por um decréscimo progressivo no espaçamento interlamelar e finalmente pela flexão e fragmentação da cementita lamelar.⁽²⁾

Uma importante ferramenta utilizada na predição de alguns defeitos que podem ocorrer em arames relacionados com a degradação da ductilidade é o ensaio de torção.⁽³⁾ O tipo de fratura em um teste de torção é uma resposta mecânica reveladora. Estudos clássicos e amplos de fraturas na torção de arames de aço carbono foram relatados por Godecki.⁽⁴⁾ Mais recentemente, Su e Shemenski⁽⁵⁾ mostraram que, sob tensões de torção, os planos principais são orientados a 45° com o eixo longitudinal do arame e que a tensão máxima de cisalhamento ocorre em planos paralelos a esta tensão e é perpendicular ao eixo longitudinal.

Os métodos de aumento da resistência dos arames podem ser divididos em endurecimento por solução sólida, por deslocamentos, por refinamento de grão e por precipitação. Um modo eficaz que tem sido bastante utilizado é o endurecimento pelo refinamento do espaçamento lamelar, que aumenta o limite de resistência do arame, mas pode diminuir sua ductilidade e levar à ocorrência de delaminação. Portanto, um dos maiores obstáculos desse mecanismo de endurecimento é a delaminação, a qual é muitas vezes observada quando o limite de resistência se torna significativamente elevado com alto grau de deformação.⁽⁶⁾

Embury e Fisher, citados por Nam et al.,⁽⁷⁾ expressaram a resistência mecânica de arames eutetóides trefilados por uma equação similar à de Hall-Petch:

$$\sigma = \sigma_0 + \{k_y / (2S_0)^{1/2}\} * \exp(\epsilon/4) \quad (1.1)$$

Onde:

σ : Resistência do arame

σ_0 : Tensão de atrito

k_y : Parâmetro de Hall-Petch

S_0 : Espaçamento interlamelar inicial

ϵ : Deformação verdadeira na trefilação dada por $\epsilon = \ln (D_0/D_\epsilon)^2$

De acordo com a equação 1.1, o aumento da resistência do fio trefilado pode ser obtido pela diminuição do espaçamento lamelar (S_0) ou pelo aumento da deformação na trefilação (ϵ).

Um fenômeno que pode ocorrer quando o arame é trefilado denomina-se envelhecimento e é caracterizado basicamente pelo aumento da resistência e decréscimo da ductilidade do aço, tornando-o assim mais frágil e, conseqüentemente, mais susceptível a trincas e quebras quando submetido a tensões em processos subseqüentes. À medida que o arame é trefilado, o calor gerado na deformação devido ao atrito metal-fieira pode causar aumento da temperatura do arame. A quantidade de calor gerado no processo também aumenta com a diminuição do diâmetro do arame.⁽⁸⁾ O aumento da temperatura do fio, associado à presença de deslocamentos gerados na deformação, pode levar à ocorrência do envelhecimento.

Estas variações em propriedades associadas ao envelhecimento ocorrem devido a interações entre átomos de soluto intersticiais e deslocamentos durante ou após a deformação plástica. Quando estas variações ocorrem após a deformação o fenômeno é chamado de envelhecimento estático ou envelhecimento após deformação. Se as variações ocorrem durante a deformação, o fenômeno é denominado envelhecimento dinâmico.⁽⁹⁾

A fenomenologia do envelhecimento após deformação em aços perlíticos foi discutida por vários autores.^(10,11) Além do mecanismo clássico de envelhecimento associado à presença de carbono e nitrogênio em solução sólida na ferrita, como observado nos aços de baixo teor de carbono, outro estágio de envelhecimento está presente nesses aços, sendo caracterizado por variações mais drásticas na resistência e ductilidade. Este estágio envolve o ancoramento de deslocamentos na ferrita por átomos de carbono provenientes da decomposição da cementita, que ocorre durante a deformação plástica.

Uma das formas de se controlar o envelhecimento em aços é a adição de elementos formadores de nitretos, carbonetos e carbonitretos, uma vez que a interação entre deslocamentos, carbono e nitrogênio em solução sólida é a causa das modificações no comportamento mecânico características do envelhecimento por deformação.

O uso de microadições para controlar os teores de intersticiais através da precipitação tem-se mostrado um método bastante promissor para minimizar os efeitos do envelhecimento. Elementos tais como titânio, nióbio, alumínio, vanádio e boro têm sido utilizados na tentativa de desenvolver aços resistentes ao envelhecimento, pois possuem grande afinidade ao carbono e nitrogênio. Além de uma boa eficiência estequiométrica, o boro é o elemento de custo mais baixo dentre os que possuem afinidade ao nitrogênio e carbono. Boratto é citado por Chown e Cornish⁽¹²⁾ por apresentarem valores para uma relação necessária para remover todo o nitrogênio de solução sólida B:N de 0,8.

Várias técnicas de trefilação são conhecidas como efetivas formas de prevenir o superaquecimento do arame, das quais se pode citar: (1) redução gradual da deformação na trefilação a cada fieira sucessiva (plano decrescente não-linear); (2) redução da deformação na trefilação a cada fieira sucessiva por uma quantidade constante (plano linear decrescente); (3) aplicar uma deformação na trefilação constante a cada fieira sucessiva (plano com mesma redução de área); ou uma combinação de quaisquer umas das descritas.⁽¹³⁾

Neste trabalho foi avaliada, através de ensaios de torção, a influência da adição de boro a um aço alto teor de carbono, realizada visando minimizar a ocorrência de delaminação durante o processamento subsequente de fios trefilados, utilizado, por exemplo, na fabricação de cabos e molas. Os efeitos da velocidade de deformação, considerando duas velocidades limites, bem como do emprego de *skin pass*, foram também testados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Neste trabalho foram utilizadas amostras de aço perlítico comercial (ABNT 1080) e outro ligado ao boro, ambos na forma de arame trefilado, com diâmetro de 1,83mm, cujas composições químicas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química das corridas testadas (% em peso)

Aço	C	Mn	Cr	Al	N	B
1080	0,84	0,40	0,26	0,010	0,039	0,040
1080 + B	0,85	0,43	0,24	0,020	0,034	-

2.2 Trefilação

Os dois aços, apresentados na Tabela 1 foram laminados em um laminador contínuo da ArcelorMittal Monlevade na bitola de 5,50mm conforme prática padrão para laminação deste aço.

Para a trefilação, foi elaborado um Planejamento de Experimento (PDE) de forma a abranger as variáveis a serem estudadas: adição de boro, plano de passes e velocidade de trefilação. A variável resposta foi o comportamento do material em ensaio de torção instrumentado que indica a presença de delaminação através de variação no torque. A descrição do PDE seguiu o formato 2^3 fatorial de acordo com a Tabela 2.

Os níveis descritos para velocidade de trefilação na Tabela 2 são (1) baixa: 5m/s; (2) alta: 12m/s. O plano de passe sem *skin pass* seguiu a prática padrão para trefilação deste aço na BBA, Belgo Bekaert Arames. Os planos de passes tiveram a mesma redução total, já que as bitolas iniciais e finais foram as mesmas, mas o plano padrão da Bekaert possui 10 passes e o plano *skin pass* 11 passes.

Tabela 2. Formato final do planejamento de experimento (PDE)

Experimento	Velocidade Trefilação	Aço	Skin Pass
1	Baixa	1080+B	Não
2	Alta	1080+B	Não
3	Alta	1080	Não
4	Baixa	1080	Não
5	Baixa	1080	Sim
6	Alta	1080	Sim
7	Alta	1080+B	Sim
8	Baixa	1080+B	Sim

2.3 Envelhecimento

As amostras foram tratadas de acordo com a especificação do cliente final que prevê uma temperatura de 150°C durante o tempo de 1 hora. O tratamento foi realizado em um forno tipo mufla com controle automático de temperatura. Após equalização da temperatura na mufla, por 1 hora, as amostras foram envelhecidas em uma única batelada.

2.4 Ensaio de Torção

Os ensaios de torção foram realizados na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, em uma máquina Instron 1225 com célula de torque 100 kN, a uma velocidade de ensaio padrão de 20 voltas/minuto. O método empregado envolve torção no sentido horário com reversão após a terceira volta e torção até a ruptura.

O tamanho total das amostras foi de 30,3 cm, com um comprimento útil de 18,3 cm ($100 \cdot D$) e 6 cm de cada lado para dobramento das pontas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades Mecânicas

Os valores das propriedades mecânicas foram obtidos em ensaio de tração realizados no laboratório da ArcelorMittal Monlevade para fio-máquina e no CETEC-MG para o arame trefilado. Para o fio-máquina na bitola de 5,50 mm, o limite de resistência do aço 1080 foi de 1.240 ± 13 MPa e para o aço 1080+B foi de 1.229 ± 22 MPa, dados obtidos da média de pelo menos seis ensaios.

Os ensaios do arame foram separados para cada condição de trefilação definida no Quadro 1. Os índices T e E significam: (T) amostras retiradas após trefilação e (E) amostras após envelhecimento de acordo com o procedimento do cliente final já descrito. Os valores de limite de resistência (R_m) e limite de escoamento a 0,2% de deformação ($R_{p0,2\%}$) correspondem à média de pelo menos três ensaios.

A análise dos dados da Figura 1 não mostrou diferenças significativas entre as amostras após trefilação e após envelhecimento analisadas do ponto de vista de limite de resistência. Já do ponto de vista do limite de escoamento, os resultados apresentaram diferença significativa entre as amostras após trefilação e após envelhecimento. Estas diferenças são maiores nas amostras sem adição de boro (C3, C4, C5 e C6) em comparação às condições com adição de boro (C1, C2, C7 e C8), isto se deve a influência do teor de nitrogênio solúvel.⁽¹⁰⁾

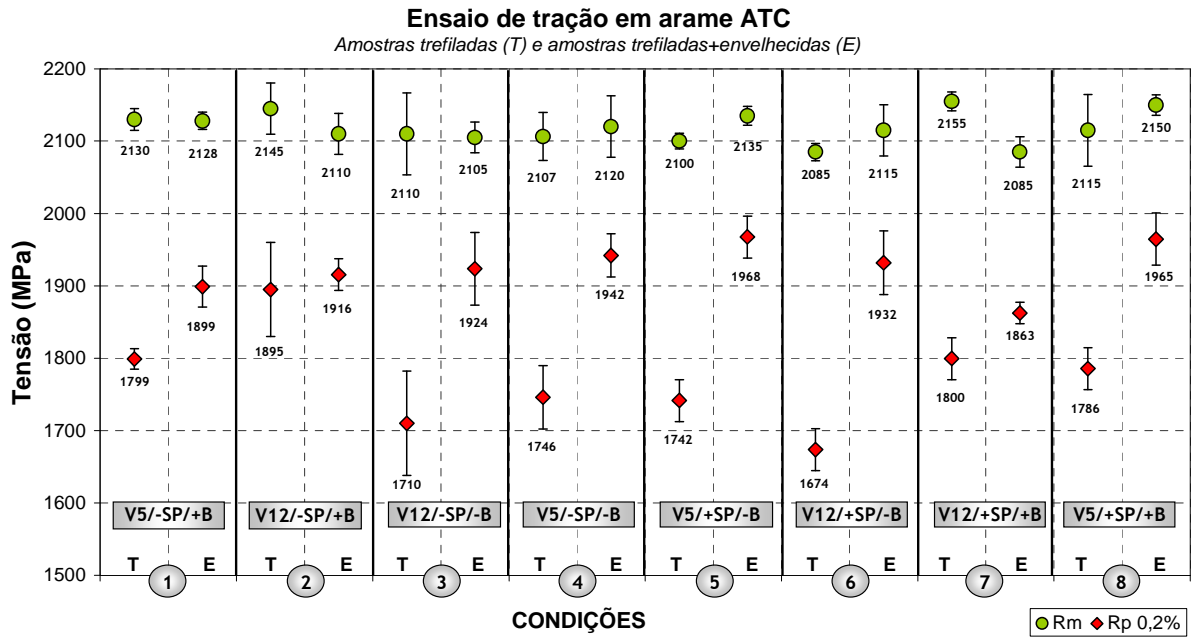


Figura 1. Ensaio de tração em amostras de arame com e sem tratamento de envelhecimento.

O diagrama balanceado de variação do limite de escoamento, construído agrupando todas as variáveis comuns das condições analisadas (utilizando a mesma média), é mostrado na Figura 2. Verifica-se, nesse diagrama, que o limite de escoamento é mais sensível ao envelhecimento do que o limite de resistência e estas diferenças são maiores nas amostras sem adição de boro (C3, C4, C5 e C6) em comparação às condições com adição de boro (C1, C2, C7 e C8). Isto se deve a efetividade do boro em retirar o nitrogênio de solução sólida, eliminando/minimizando o efeito do primeiro estágio de envelhecimento.

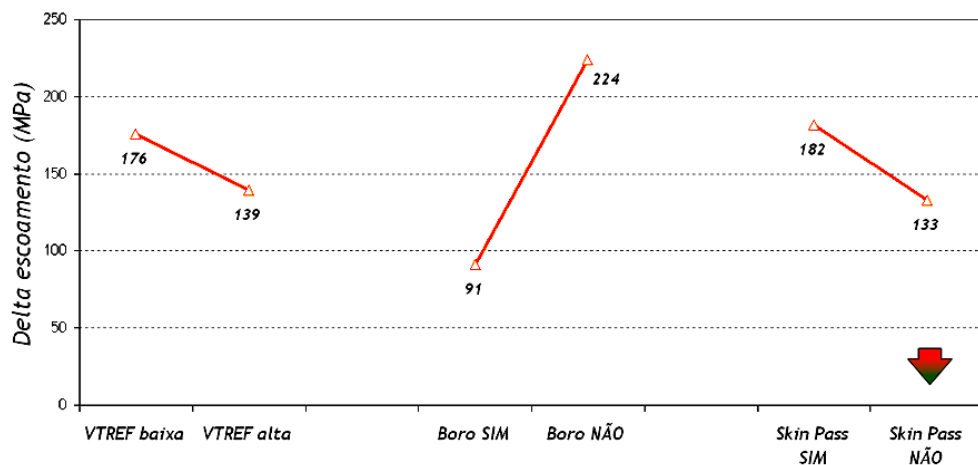


Figura 2. Diagrama balanceado da variação do limite de escoamento.

Como a melhor condição é a de minimização da variação de escoamento, o melhor resultado para cada fator é dado por: “V_{TREF} alta”, “Boro SIM” e “Skin Pass NÃO”.

Também foi realizado o teste de comparação estatística de médias (teste-t). Este teste é baseado na comparação dos valores dos parâmetros “stat t” e “t crítico bi-caudal”. Para se ter uma diferença estatística entre as variáveis comparadas o

valor, em módulo, do parâmetro “stat t” deve ser maior que o parâmetro “t crítico bicaudal”. Portanto, com 95% de certeza (alfa=0,05), as variáveis: boro e “skin pass” são estatisticamente diferentes, já a variável velocidade de trefilação não apresentou diferença estatística.

3.2 Índice de Qualidade do Ensaio de Torção

Conforme comentado por Godecki:⁽⁴⁾ “a observação visual do teste de torção com base simplesmente no número total de voltas não fornece uma resposta decisiva em relação à delaminação, além disto, pode-se também gerar confusão caso o arame com delaminação resista por várias voltas”. Portanto, foi necessário avaliar quais eram as variáveis mais importantes em um ensaio de torção. Para isto foi construído um índice, aqui denominado Índice de Qualidade do ensaio de Torção (IQT), descrito no Quadro 1.

Quadro 1. Divisão de pontuação do índice IQT.

IQT	
Item avaliado	Máximo de Pontos
Número de voltas	30
Tipo de fratura	30
Queda de Torque (kgf*cm)	20
Tamanho fluxo serrilhado (voltas)	20
Total	100

O IQT possui variação de 0 pontos a 100 pontos distribuídos nas quatro variáveis mais importantes descritas no Quadro 1. Cada variável possui uma subdivisão mostrada no Quadro 2.

Quadro 2. Subdivisão das variáveis que compõem o índice IQT.

Número de Voltas	Pontos	Queda de Torque (kgf*cm)	Pontos
> 40	30	0	20
30 a 39	25	1 a 3	10
20 a 29	20	4 a 6	5
10 a 19	15	7 a 9	4
0 a 9	10	> 10	3
Tipo de Fratura	Pontos	Tamanho do fluxo serrilhado (voltas)	Pontos
90°	30	0	20
Garra a 90°	25	0,1 a 1,0	10
Garra a 45°	15	1,01 a 2,0	5
45°	5	> 2	4

Um exemplo de ensaio que apresenta delaminação e, conseqüentemente, queda de torque e fluxo serrilhado é mostrado na Figura 3, onde pode ser observado também que avaliando apenas o número de voltas no ensaio poderia haver um erro, já que a amostra apresentou recuperação de torque (encruamento) após 16 voltas e somente rompeu com aproximadamente 33 voltas.

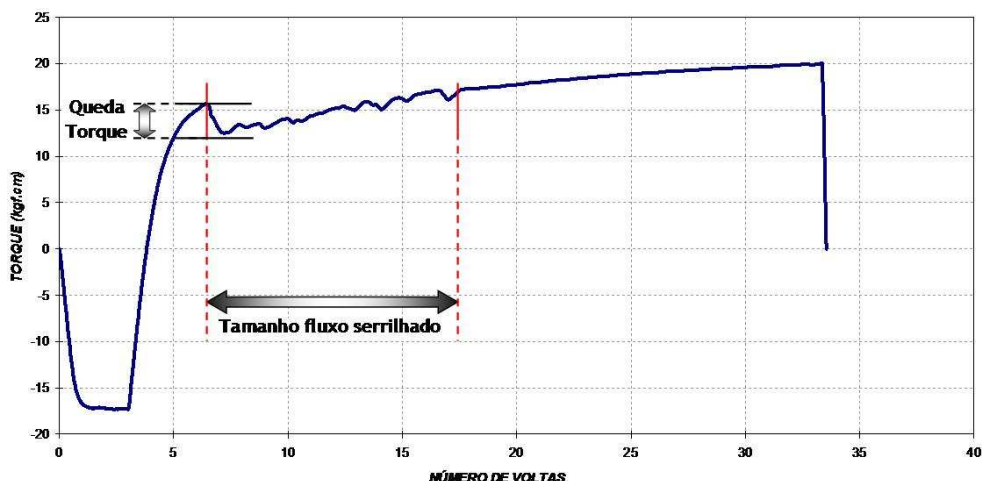


Figura 3. Ensaio de torção em arame que apresentou delaminação onde se pode medir a queda do torque e o tamanho do fluxo serrilhado.

A Figura 4 mostra um resumo de todas as condições avaliadas e a nota média do IQT para cada condição, estes valores correspondem à média de pelo menos seis ensaios. A variabilidade de cada condição será avaliada posteriormente pelo desvio padrão. A cada condição existe um retângulo informativo que lembra os níveis da variável na seguinte ordem: Velocidade de trefilação (5 m/s e 12 m/s) / Skin Pass (SIM, + / NÃO, -) / Adição de boro (SIM, + / NÃO, -).

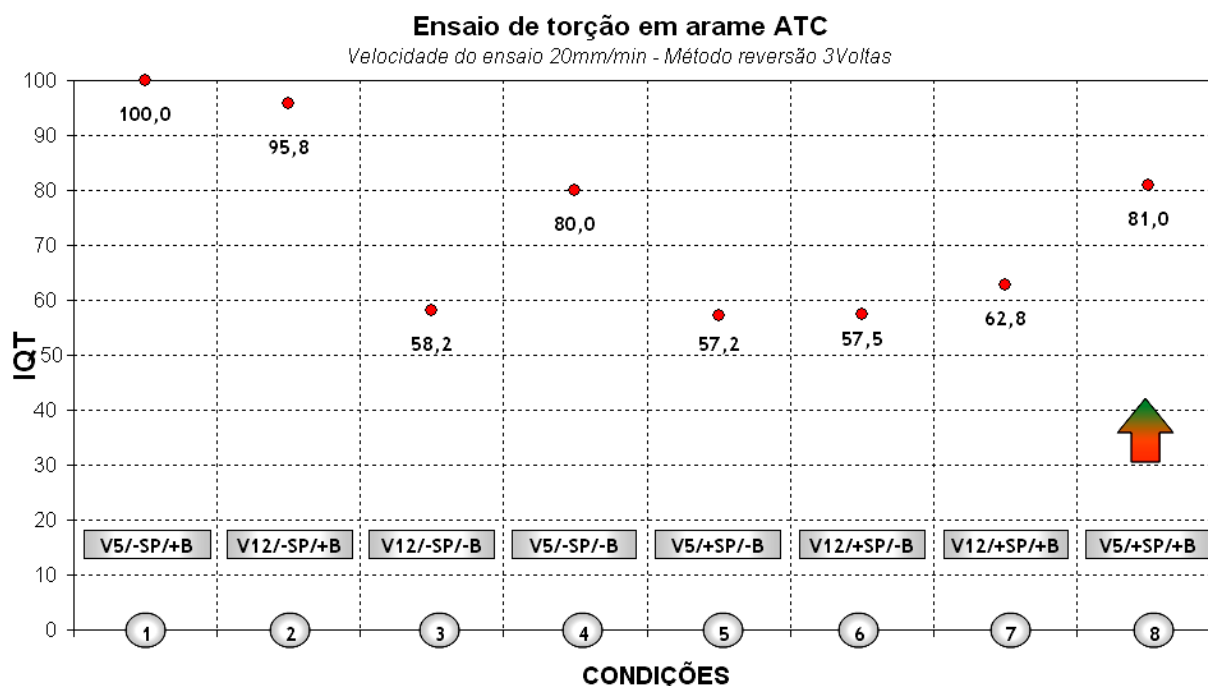


Figura 4. Resumo dos resultados obtidos no IQT.

A análise da Figura 4 mostra claramente que o desempenho das condições 1, 2, 4 e 8 foi superior ao das condições 3, 5, 6 e 7. As condições 1 e 2 foram as únicas que não apresentaram delaminação em nenhuma das amostras ensaiadas.

O ganho no material com a adição de boro foi de 39,2% (comparação das condições 3 e 2, de 58,2 para 95,8). O ganho com a diminuição de velocidade, comparação das condições 3 e 4, foi de 38,7%. Em relação ao uso do “*skin pass*”, não houve ganho (comparação das condições 3 e 6, a condição 6 apresentou valor menor que a condição 3).

Como complementação dos resultados, foi feita a análise de Taguchi, semelhante à realizada para as propriedades mecânicas. A Figura 5 mostra o diagrama balanceado para os valores da média de todas as condições em cada variável. Assim, a melhor condição da análise dos resultados é a que maximiza o IQT, ou seja: V_{TREF} baixa, Boro SIM, “*skin pass*” Não. Este resultado é a descrição da condição 1.

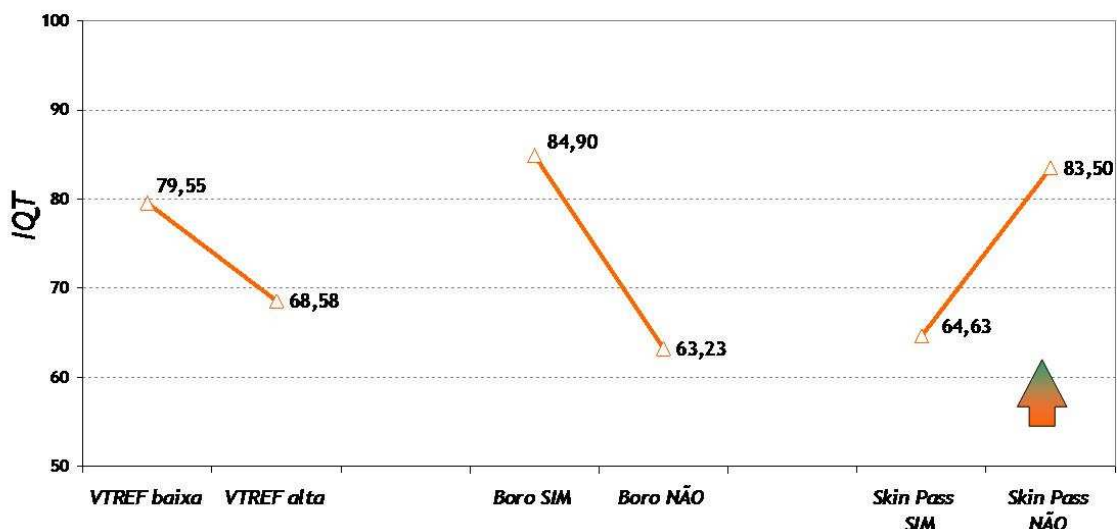


Figura 5. Diagrama balanceado das médias do IQT para as variáveis estudadas.

Novamente utilizando os parâmetros “stat t” e “t-crítico bi-caudal”, conforme procedimento realizado para comparação da variação do limite de escoamento, foi possível notar que apenas a variável boro, com 95% de certeza, é estatisticamente diferente. Para as outras variáveis, *skin pass* e velocidade de trefilação, a 95% de certeza não é possível afirmar que são diferentes.

O desvio padrão das condições analisadas foram: (1) V_{TREF} baixa=23,4, V_{TREF} alta=23,2; (2) $BORO_{SIM}$ =20,5, $BORO_{NÃO}$ =20,4; (3) “*Skin Pass*” $_{SIM}$ =20,9, “*Skin Pass*” $_{NÃO}$ =22,4. A avaliação das condições não mostrou grandes diferenças entre as condições analisadas e que para a variável boro, a variação foi mínima entre os níveis, além de ter sido obtido o menor resultado de variabilidade.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo dão suporte às seguintes conclusões sobre o efeito do boro e das condições de trefilação na delaminação de aços perlíticos:

- O boro foi efetivo para minimização do fenômeno de delaminação no aço perlítico estudado. O aumento de processabilidade medido pelo ensaio de torção e mostrado pelo diagrama balanceado foi comprovado pelo teste estatístico de médias, mostrando também que sua efetividade está ligada a outras variáveis, principalmente velocidade de trefilação. O ganho somente

com a adição de boro, avaliado pelo IQT, mostrou diminuição considerável da ocorrência de delaminação e melhoria do desempenho no teste de torção.

- A velocidade de trefilação e o plano de passe “*skin pass*” tiveram um efeito secundário na delaminação de aços perlíticos.
- A adoção do índice IQT como ferramenta de análise se mostrou muito eficiente, por ser uma ferramenta de fácil visualização e entendimento.

REFERÊNCIAS

- 1 BUONO, V.T.L., GONZALEZ, B.M., LIMA, T.M., ANDRADE, M.S. Measurement of fine pearlite interlamellar spacing by atomic force microscopy. *Journal of Materials Science*, v. 32, p. 1005-1008, 1997.
- 2 NAM, W.J., SONG, H.R., BAE, C.M. Effect on microstructural features on ductility of drawn pearlitic carbon steel. *ISIJ International*, v. 45, p. 1205-1210, 2005.
- 3 PARK, D.B., KANG, E. G., NAM, W.J. The prediction of occurrence of the delamination in cold drawn hyper-eutectoid steel wires. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 187-188, p. 178-181, 2007.
- 4 GODECKI, L. The delamination of spring wires during torsion testing - part 1 to 5. *Wire Industry*, Janeiro a Junho 1969.
- 5 SU, Y.Y., SHEMENSKI, R. M. Torsion test: in-depth characterization and microscopic analysis. *Wire Journal*, p. 128-139, 2000.
- 6 TARUI, T., TAKAHASHI, J., TASHIRO, H., MARUYAMA, N., NISHIDA, S, OCHIAI, I., OHASHI, S. Strengthening of steel wire of tire cord. *Nippon Steel Technical Report*, n. 64, p. 45-49, 1995.
- 7 NAM, W.J., LEE, C.S., BAE, C.M. Effect of interlamellar spacing on the delamination of pearlitic steel wires. *Scripta Materialia*, v. 35, p. 641-646, 1996.
- 8 COE, C.L., GORDON, A.T. Method for making strain aging resistant steel. US2006/0124208. 27 jun. 2006.
- 9 LESLIE, W.C. The Physical Metallurgy of Steels, Class notes and lecture material, web: p 79, 1981.
- 10 BUONO, V.T.L., ANDRADE, M.S., GONZALEZ, B.M. Kinetics of strain aging in drawn pearlitic steels. *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 29A, p. 1415-1423, 1998.
- 11 OLIVEIRA, W.C. Influência do cromo no envelhecimento após deformação em fios de aço perlítico. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2003. 79p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 12 CHOWN, L.H., CORNISH, L.A. Investigation of hot ductility in Al-killed boron steels. *Materials Science and Engineering A*, v. 494, p. 263-275, 2008.
- 13 ZELIN, M. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing. *Acta Materialia*, v. 50, p. 4431-4447, 2002.