

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM AÇO ULTRA-BAIXO CARBONO EM TREFILAÇÃO DE ARAMES¹

Bruno Mendes Grillo²
Luciano Moreira Pessanha³
Rodrigo Gonçalves Amorim⁴

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a capacidade de deformação de um aço ultra-baixo carbono estabilizado ao Ti produzido em uma aciaria LD e submetido ao processo de trefilação. Atualmente, no Brasil não se conhece o desenvolvimento e aplicações deste tipo de aço como arame trefilado, bem como suas características e sua capacidade de deformação. Arames com 5,50 mm de diâmetro foram submetidos ao processo de trefilação para se obter a bitola de 1,25 mm em dez passes, onde foram obtidas as propriedades mecânicas após cada passe para avaliação do comportamento mecânico do material. A partir deste desenvolvimento, foi possível comparar, em cada passe de trefilação, as propriedades mecânicas entre um aço ultra-baixo carbono e um aço de baixo teor de carbono produzido também em aciaria LD. Os aços estudados neste trabalho suportaram deformações verdadeiras da ordem de 4,6 em redução de área na trefilação e foi mostrado que o aço ultra-baixo carbono possui maior capacidade de deformação plástica que o aço baixo carbono.

Palavras-chave: Trefilação; Fio-máquina; Aço ultra-baixo carbono.

STUDY OF THE BEHAVIOR OF A ULTRA-LOW CARBON STEEL IN THE WIRE DRAWING PROCESS

Abstract

The present work aims at evaluating the formability of titanium-added ultra low carbon steel produced by basic oxygen furnace and processed in the wire drawing process. At this time, in Brazil there is no development and applications of this type of steel in wire products. In order to investigate its plastic behavior, a wire of 5.50 mm diameter was drawn to 1.25 mm diameter by using 10 dies. After each wire drawing reduction, the mechanical properties were evaluated by means of uniaxial tensile tests and hardness measurements. In this work, it was possible to compare, in each reduction, the resulting mechanical properties of a ultra-low carbon steel in comparison to a low carbon steel also produced by basic oxygen furnace. The steels studied in this work were submitted to 4.6 of true strain in reduction of area by drawing process and was showed that the ultra-low carbon steel has the formability higher than the low carbon steel.

Key words: Drawing process; Wire rod; Ultra low carbon steel.

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 M.Sc. em Engenharia Metalúrgica, Engenheiro de Desenvolvimento de Produtos e Assistência Técnica, CSN Aços Longos, Volta Redonda, Brasil.

³ D.Sc. Professor Associado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Desenvolvimento de Produtos e Assistência Técnica, CSN Aços Longos, Volta Redonda, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de acompanhar os novos processos de fabricação, onde os equipamentos cada vez mais submetem os aços a maiores deformações associadas a elevadas taxas de deformações, a siderurgia voltada para o segmento de aços longos vem estudando alternativas no desenvolvimento de aços para atendimento a essas demandas contínuas da indústria de processamento de aços.

Na siderurgia de aços longos, os principais produtos laminados a quente são os tubos, perfis, trilhos, barras, vergalhões e fio máquina. O fio máquina, por sua vez, é o principal produto que é submetido a processos de beneficiamento antes de sua aplicação final, gerando produtos tais como arames trefilados, parafusos, porcas, rebites, peneiras, artefatos além de diversas outras aplicações.

Tendo em vista o processo de produção de fio máquina que será realizado na Companhia Siderúrgica Nacional em Volta Redonda – RJ, com a implantação da usina de aços longos, existirá a possibilidade da produção de aços de ultra baixo carbono do tipo IF (Interstitial-Free), que são de grande importância na indústria automobilística no segmento de aços planos.⁽¹⁾

Este trabalho tem como objetivo conhecer e comparar em sucessivos passes de trefilação, o comportamento mecânico do aço ultra-baixo carbono em relação a um aço de baixo teor de carbono produzido também em aciaria LD. Uma vez que a passagem do material pela fieira provoca a redução de sua seção e, como o processo é realizado a frio, ocorre o encruamento com alteração das propriedades mecânicas do material do fio.⁽²⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a realização deste trabalho, foram adotados um aço ultra-baixo carbono (UBC) e um aço baixo carbono (BC), ambos fornecidos pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). A rota de fabricação para a produção dos aços contempla aciaria LD e degaseificador a vácuo, sendo o aço UBC estabilizado ao Ti. Na Tabela 1 estão apresentadas as composições químicas dos aços que foram empregados no presente estudo.

Tabela 1. Composição química dos materiais adotados (% em peso)

AÇO	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Ni	%Cr	%Al	%N	%Ti
BC	0,0530	0,31	0,011	0,016	0,008	0,008	0,003	0,008	0,052	0,0034	0,001
UBC	0,0022	0,11	0,007	0,007	0,010	0,014	0,017	0,018	0,045	0,0038	0,064

Os materiais foram disponibilizados em forma de placas provenientes de lingotamento contínuo, as quais foram cortadas em blocos de seção quadrada de 250 mm, conforme ilustração indicada na Figura 1. Os blocos foram laminados em barras de seção circular de 12,70 mm para permitir o posterior processo de trefilação.

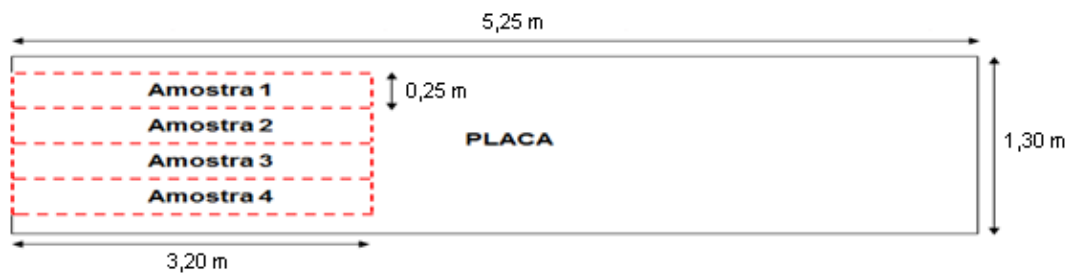


Figura 1. Amostras para laminação a quente.

2.2 Métodos

Os procedimentos experimentais e metodologias foram divididos conforme a sequência a seguir, na qual, foram realizados: (1) experimentos de trefilação da bitola de 12,70 mm para a bitola de 5,50 mm, (2) tratamento térmico de recozimento, (3) trefilação da bitola de 5,50 mm para a bitola de 1,25 mm, (4) ensaios para caracterização experimental e (5) análises metalográficas.

2.2.1 Trefilação

Tendo como referência os processos de laminação a quente para produção de fio máquina, usualmente, a menor bitola disponível no mercado brasileiro é de 5,50 mm, sendo a bitola mais demandada para processos de trefilação de arames finos. Para manter a referência nesta bitola, as barras laminadas a quente obtidas na seção de 12,70 mm foram trefiladas em arames de 5,50 mm em 6 passes de trefilação para ambos os aços em estudo e posteriormente em 10 passes para bitola de 1,25 mm, conforme sequência apresentada na Figura 2.

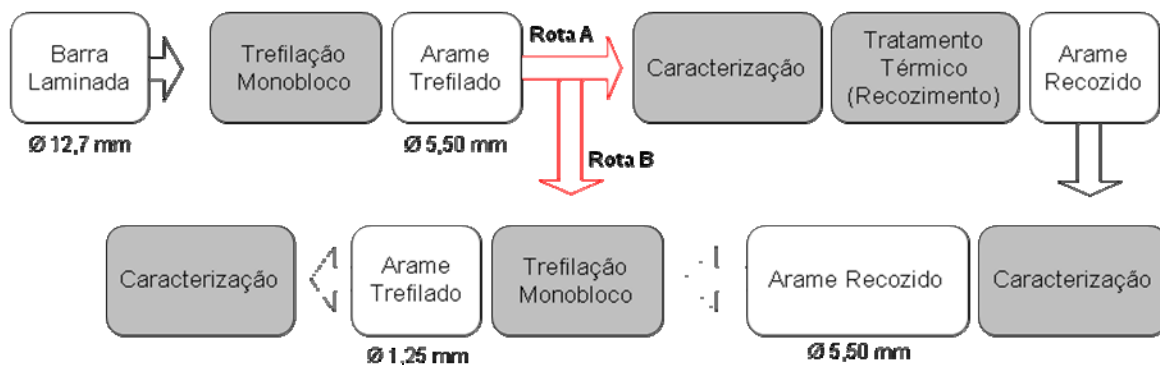


Figura 2. Fluxo de processamento dos materiais.

O equipamento de trefilação utilizado para realização dos ensaios foi uma trefila do tipo monobloco vertical, contendo um passe de redução, onde o material de entrada pode se apresentar na forma de barra ou rolo, passado por uma caixa contendo sabão sólido (estearato de cálcio) que possui uma fieira de carboneto de tungstênio acoplada na saída da mesma, sendo na sequência enrolado no bloco tracionador.

Após cada passe de trefilação, retirou-se uma amostra com aproximadamente 1 m de comprimento, possibilitando a realização de até 3 ensaios de tração uniaxial, medições de dureza, corte e preparação de amostras para análises metalográficas. A cada retirada de amostra, o material previamente trefilado foi novamente apontado e, em seguida, o ferramental da caixa de fieira foi substituído para realização do próximo passe. A Tabela 2 indica o plano de passes utilizado para obtenção da

bitola de 5,50 mm a partir da bitola de 12,70 mm. A Tabela 3 apresenta o plano de passes utilizado para obtenção da bitola de 1,25 mm a partir da bitola de 5,50 mm.

Tabela 2. Plano de passes da primeira etapa de trefilação

1º Passe	2º Passe	3º Passe	4º Passe	5º Passe	6º Passe
11,05 mm	9,65 mm	7,95 mm	7,08 mm	6,25 mm	5,50 mm

Tabela 3. Plano de passes da segunda etapa de trefilação

1º Passe	2º Passe	3º Passe	4º Passe	5º Passe	6º Passe	7º Passe	8º Passe	9º Passe	10º Passe
4,50 mm	3,73 mm	3,12 mm	2,65 mm	2,27 mm	1,97 mm	1,73 mm	1,53 mm	1,38 mm	1,25 mm

2.2.2 Tratamento térmico

Para atender a proposta do estudo, foram realizados tratamentos térmicos na bitola de 5,50 mm de ambos os aços, com o objetivo de restauração das propriedades mecânicas dos materiais deformados a frio para as condições do estado laminado a quente. Para realização dos ensaios foi utilizado um forno de aquecimento por resistência elétrica do fabricante Brasimet, os tratamentos térmicos consistiram de recozimento isotérmico dos corpos de prova nas temperaturas de 800 e 820 °C durante 5 minutos para os aços BC e UBC, respectivamente.⁽³⁾

Os corpos de prova utilizados para o ensaio de recozimento foram endireitados manualmente com auxílio de madeiras e martelo de borracha, bem como cortados com comprimento adequado, para possibilitar posterior ensaio de tração, medição de dureza e caracterização microestrutural.

2.2.3 Caracterização experimental

Para o estudo do comportamento mecânico dos materiais submetidos aos passes de trefilação, foram realizados ensaios de tração uniaxial e ensaios de microdureza entre os passes de trefilação, considerando uma amostra para cada passe de trefilação. Para realização dos ensaios foi utilizada uma máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 250 kN, do fabricante Instron, modelo 5585H com sistema de vídeo extensometria, onde o registro do deslocamento das marcações da base de medida é realizado por uma câmera, ou seja, sem contato com a amostra. A célula de carga utilizada possui capacidade de 30 kN e precisão de 10 N. Para caracterização da evolução da dureza em função do encruamento provocado pelos passes de trefilação, foram realizados ensaios de microdureza entre os passes de trefilação, considerando uma amostra para cada passe.

Na caracterização microestrutural foram utilizadas as mesmas amostras preparadas para realização do ensaio de microdureza Vickers, onde as superfícies polidas sofreram ataque químico com solução de Nital 3% durante 10 s e ataque de Klemms (1 g de metabisulfito de potássio e 50 ml de tiosulfato de sódio saturado) durante cerca de 2 a 3 minutos, para os aços BC e UBC, respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização da laminação a quente para obtenção das barras de 12,7 mm de diâmetro, foram realizados ensaios mecânicos de tração uniaxial, medidas de dureza, exame de inclusões e caracterização microestrutural. Estes resultados estão apresentados nas Tabelas 4 e 5. Observou-se um elevado nível de limpeza nos aços disponíveis para realização dos trabalhos de trefilação.

Tabela 4. Propriedades mecânicas dos aços laminados a quente

AÇO	LE (MPa)	LR (MPa)	Redução de Área (%)	Alongamento (%)	Dureza (HRB)
BC	258	328	82	38	63
UBC	190	282	93	41	42

Tabela 5. Propriedades mecânicas dos aços laminados a quente

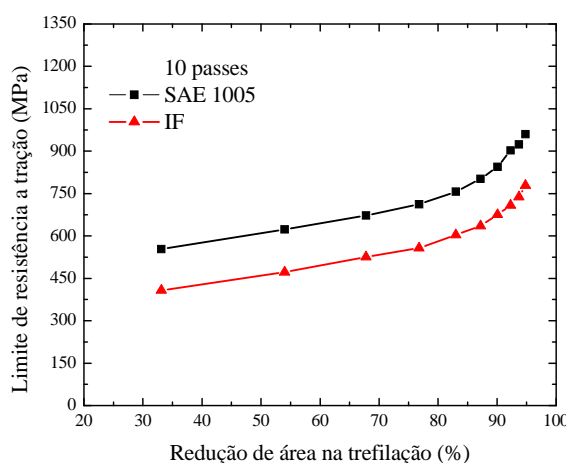
AÇO	Sulfetos	Aluminatos	Silicatos	Óxidos		Tamanho de Grão (μm)
				Fino	Grosso	
BC	-	-	-	1	-	15
UBC	-	-	-	1	-	19

O recozimento isotérmico realizado nas amostras previamente trefiladas na bitola de 5,50 mm apresentaram resultados satisfatórios em relação ao objetivo do ensaio, uma vez que as propriedades mecânicas e condições de microestrutura apresentaram valores próximos ao do material que iniciou o processo de trefilação na bitola de 12,70 mm. Os resultados das propriedades mecânicas obtidas nas amostras após o tratamento térmico de recozimento estão indicados na Tabela 6.

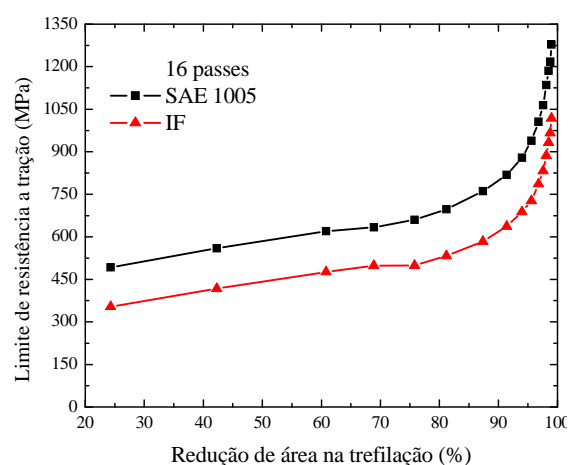
Tabela 6. Propriedades mecânicas após recozimento

AÇO	LE (MPa)	LR (MPa)	Redução de Área (%)	Alongamento (%)	Dureza (HRB)
BC	258	347	81	38	60
UBC	180	285	92	40	35

Considerando os valores de limite de resistência a tração, obtidos a cada passe de trefilação e relacionando o respectivo valor de redução de área devido ao passe de trefilação, a Figura 3 mostra essa relação para cada passe de trefilação subsequente. A taxa de endurecimento para um arame trefilado é definida como o aumento no limite de resistência a tração dado pela quantidade de redução de área após o trabalho a frio.⁽⁴⁾



(a)



(b)

Figura 3. Evolução da resistência a tração em função da redução de área em trefilação. (a) 10 passes; (b) 16 passes.

Considerando os valores de resistência a tração obtidos em cada passe de trefilação e seu respectivo valor de redução de área registrado no ensaio de tração, a Figura 4 mostra essa relação a cada passe de trefilação subsequente.

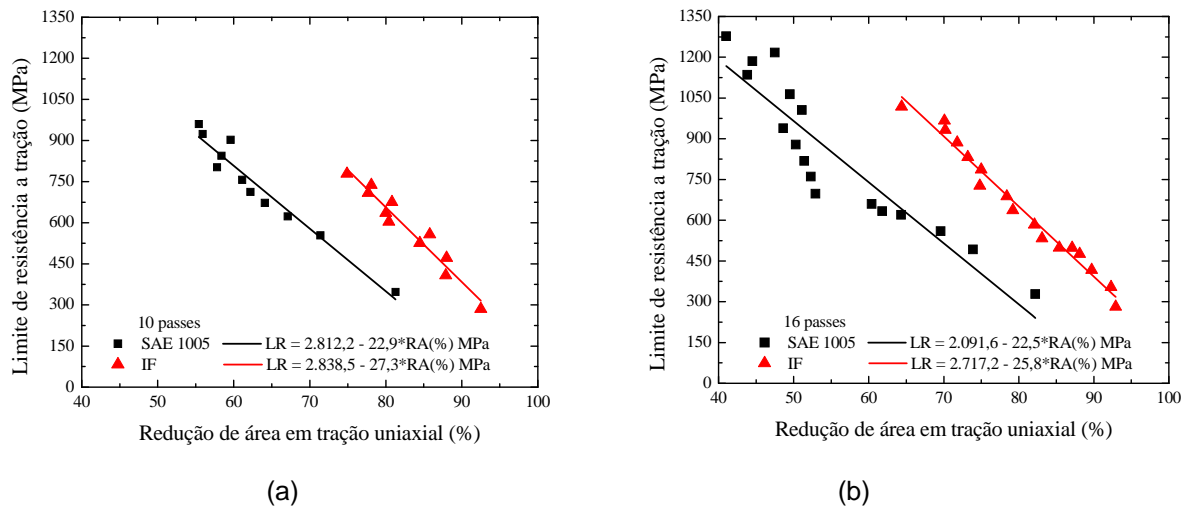


Figura 4. Evolução da resistência a tração em função da redução de área em tração uniaxial. (a) 10 passes; (b) 16 passes.

A Figura 5 mostra a evolução da dureza dos aços que sofreram recozimento intermediário em função da deformação verdadeira a cada passe de trefilação. Os resultados obtidos indicam que o aço BC possui maiores valores de dureza que o aço UBC, apresentando uma diferença média de dureza em cada passe da ordem de 45 HV, onde o perfil de incremento de dureza em relação as reduções realizadas se aproxima de um comportamento linear e se comporta de forma similar ao aço UBC.

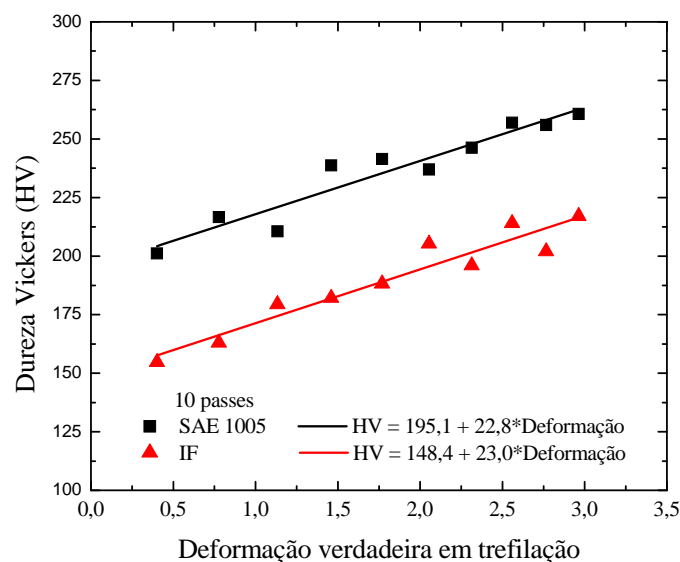


Figura 5. Evolução da dureza dos aços BC e UBC.

As Figuras 6 e 7 apresentam as micrografias na bitola de 1,25 mm do aço UBC e BC que sofreram recozimento intermediário, apresentando deformação

verdadeira de 3,0 (95% de redução de área). Nestas figuras foi possível observar a acentuada deformação ocorrida nos grãos, de forma a se tornarem mais alongados a medida que os passes de trefilação foram realizados.

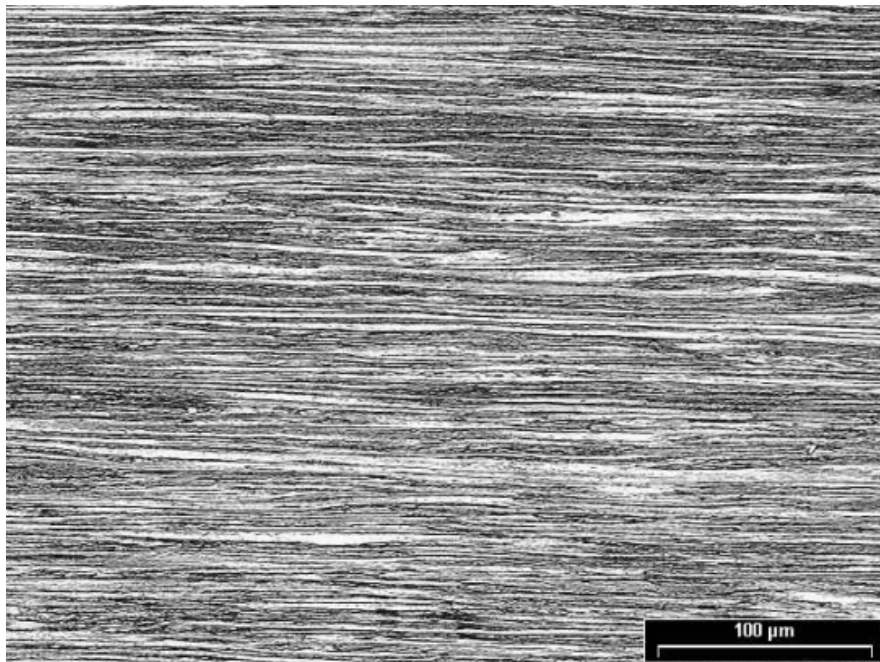


Figura 6. Micrografia aço UBC – Bitola 1,25 mm.

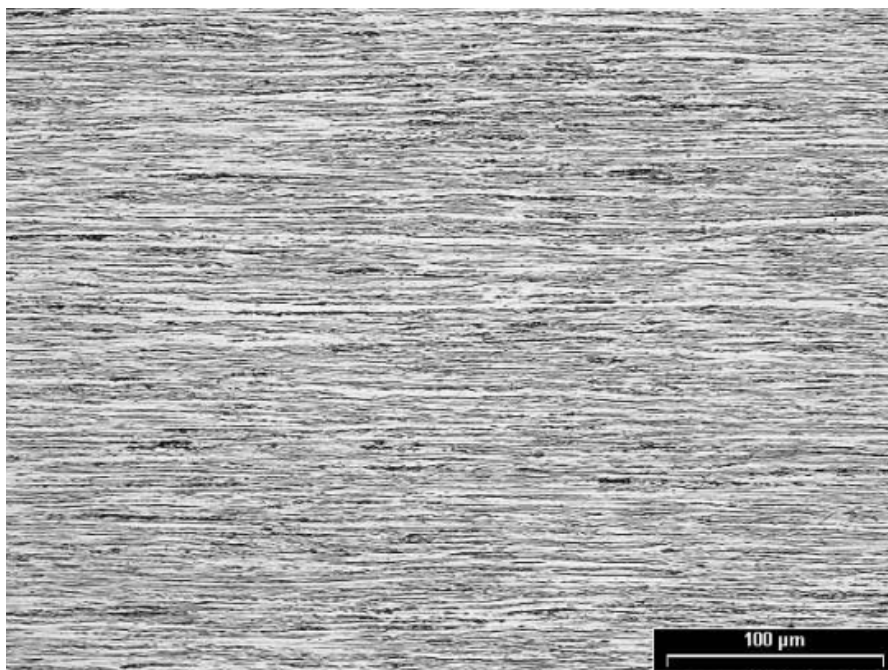


Figura 7. Micrografia aço BC – Bitola 1,25 mm.

A Figura 8 mostra a evolução do expoente de encruamento dos aços que sofreram recozimento intermediário em função da deformação verdadeira a cada passe de trefilação. Os resultados obtidos indicam que os aços em estudo possuem comportamento similar quanto aos valores encontrados a cada passe de trefilação. No entanto, foi observada uma variação significativa entre o valor de expoente de encruamento para o material no estado recozido e após a trefilação. Os valores de “n” no estado recozido para os aços BC e UBC são 0,27 e 0,32, respectivamente.

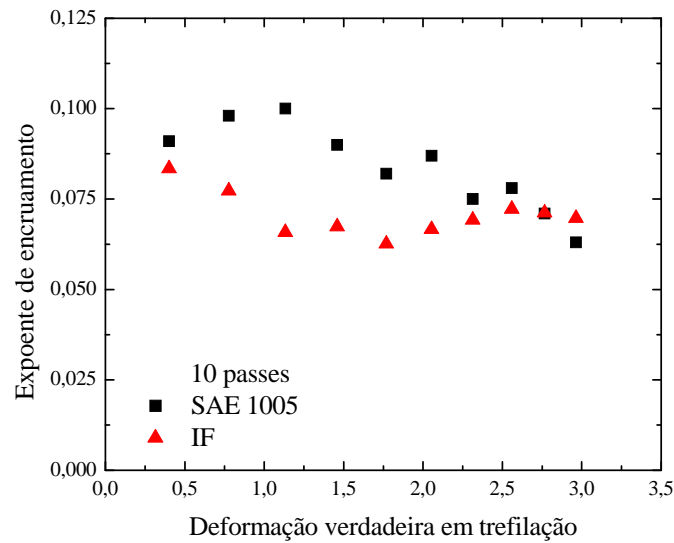


Figura 8. Exponente de encruamento “n” em função da deformação verdadeira em trefilação.

A Figura 9 a seguir mostra a evolução do coeficiente de resistência “K” dos aços que sofreram recozimento intermediário em função da deformação verdadeira a cada passe de trefilação. Os resultados obtidos indicam que os aços em estudo possuem um ganho significativo do valor deste coeficiente ao passo que são submetidos aos passes de trefilação.

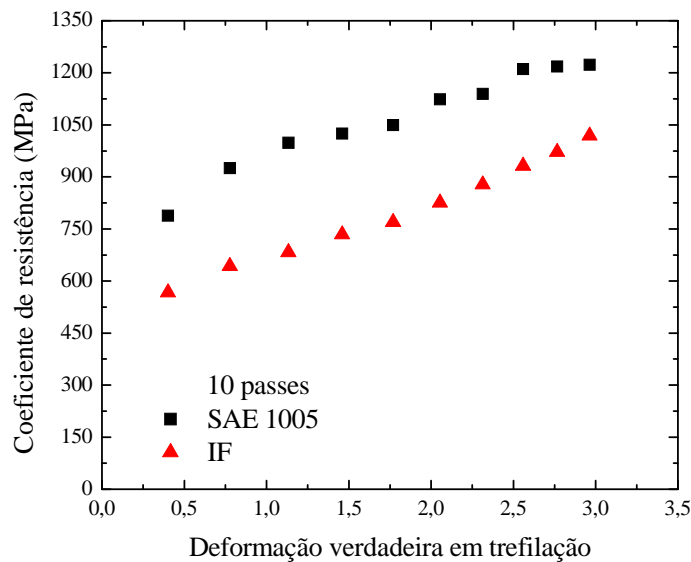


Figura 9. Coeficiente de resistência “K” em função da deformação verdadeira em trefilação.

4 CONCLUSÕES

Com base nos experimentos de trefilação e nos ensaios de tração uniaxial, medidas de dureza e análises metalográficas realizadas em amostras de aços UBC e BC, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- 1) ambos os aços atingiram deformação verdadeira da ordem de 4,6 sem apresentarem defeitos ou falta de capacidade de trefilação;
- 2) para atingir uma mesma resistência, o aço UBC deve sofrer mais encruamento;
- 3) a relação entre a redução de área observada no ensaio de tração e a resistência do material possui uma relação linear;
- 4) o aço UBC apresentou maior capacidade de deformação a frio em comparação ao aço BC;
- 5) o aço UBC possui menores valores de dureza que o aço BC, apresentando uma diferença média de dureza em cada passe da ordem de 45 HV;
- 6) o aço UBC possui expoente de encruamento “n” superior ao do aço BC em condição laminada a quente, no entanto, após a realização dos experimentos de trefilação, ambos os aços apresentaram valores similares;
- 7) o comportamento do coeficiente de resistência “K” dos aços BC e aço UBC em função da deformação realizada possui uma relação linear;
- 8) foi possível estabelecer um modelo de previsão de resistência do arame trefilado em função do plano de trefilação;
- 9) o aço UBC pode ser aplicado em trefilação de arames finos e possivelmente eliminar etapas de recozimento intermediário em aplicações onde se utilizam aços com resistência superior.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a empresa Messa & Messa pelo apoio na realização dos ensaios de trefilação, à Companhia Siderúrgica Nacional pelos recursos disponibilizados. LPM agradece a Faperj pelo custeio das ferramentas de trefilação (Programa JCNE 2012) e ao CNPq (Bolsa de Produtividade em Pesquisa). BMG agradece ao Prof. Sérgio Tonini Button (FEM, Unicamp) pelas sugestões e indicações para realização das etapas de trefilação dos aços analisados.

REFERÊNCIAS

- 1 Meira, R. R. - Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas; Dissertação de mestrado, cap. 1, p. 13 - Belo Horizonte, 2006.
- 2 Ettore Bresciani Filho, Iris Bento da Silva, Gilmar Ferreira Batalha e Sérgio Tonini Button - Conformação Plástica dos Metais, 6ª Edição - Campinas 2011.
- 3 Carvalho, C. R. G. - Estudo da cinética de recristalização num aço IF estabilizado ao titânio com adição de silício; Dissertação de mestrado, cap. 3, p.63-64 - São Paulo, 2004.
- 4 Bhaskar Yalamanchili, Peter M. Power and Dan Lanham - A technical review of industrial practices for decreasing the strain hardening rate of low carbon steel wire - Wire Journal International 38 nº 7 2005.