

CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA E COMPORTAMENTO MECÂNICO DE FIOS DE AÇO PERLÍTICO TREFILADOS*

Ana Carolina Ribeiro Duarte¹

Rachel Santos Mendes¹

Manoela Fontana²

Rodrigo Pinto de Siqueira³

Fabiane Roberta Freitas da Silva⁴

Gabriel Gonçalves Pessoa de Castro⁵

Jefferson Fabrício Cardoso Lins⁶

Resumo

A combinação de propriedades apresentada pelos aços perlíticos permite sua aplicação em diversos segmentos. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a microestrutura do aço SAE 1070 deformado via trefilação para a fabricação de fio-máquina. O aço foi trefilado a seco por 12 passes com reduções médias entre 15 e 21%. A caracterização microestrutural foi realizada com o auxílio da técnica de microscopia eletrônica de varredura e microscopia de força atômica. O material teve ainda seu comportamento mecânico avaliado por meio de ensaio de dureza Vickers e ensaio de tração. O material deformado apresentou a estrutura “curling” na seção transversal, enquanto que na seção longitudinal a maioria das lamelas se encontrava alinhadas com a direção de trefilação. Os ensaios de tração e dureza revelaram um aumento considerável da dureza e resistência do material após o processo de trefilação.

Palavras-chave: SAE 1070; Trefilação; Caracterização microestrutural.

MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION AND MECHANICAL BEHAVIOR OF PEARLITIC STEEL WIRE DRAWING

Abstract

The combination of properties of pearlitic steels allows its application in different segments. The objective of the present work was characterizing the microstructure of SAE 1070 steel wire drawing for manufacturing tire cords. The steel was dry drawn for 12 pass with average reductions between 15 to 21%. The microstructural characterization was performed with the aid of the scanning by electron microscopy and atomic force microscopy. The material mechanical behavior was also evaluated by Vickers hardness and tensile test. The deformed material showed a curling structure in cross section, while in longitudinal section, the majority of the lamellas was aligned with drawing direction. Tensile and hardness tests revealed a significant increase in hardness and strength of the material after the drawing process.

Keywords: SAE 1070 steel; Wire drawing; Microstructural characterization.

¹ Eng. de Produção, Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Eng. Metalúrgica, Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

³ Eng. de Materiais, Pós-doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁴ Eng. Metalúrgica, Pós-Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁵ Eng. Mecânico, Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁶ Eng. Químico, D.Sc, Coordenador, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A combinação de propriedades dos aços alto carbono permite aplicação em diversos segmentos tais como cabos para pontes, corda de piano, cabos para pneus, entre outros. A elevada resistência associada com níveis aceitáveis de ductilidade apresentada por estes aços tem sido por muitos anos, tópico de considerável pesquisa científica [1]. A estrutura predominantemente perlítica é responsável por esta combinação de propriedades pois a microestrutura escalonada incorpora o constituinte dúctil no constituinte com elevada dureza, ou seja a morfologia do composto lamelar ferrita-cementita.

O material estudado neste trabalho são fios do aço SAE1070 que constituem a estrutura metálica dos pneus. A fabricação destes fios envolve o processo de trefilação através de vários passes de redução. A evolução microestrutural durante esse processamento envolve diversos mecanismos diretamente relacionados com a estrutura lamelar, ou seja, a deformação dos aços perlíticos apresenta características específicas e particulares.

O processo de fabricação de fios por trefilação, e as consequentes alterações na microestrutura e nas propriedades dos aços perlíticos, tem sido objeto de estudo de diversos autores. Zelin [2] em seu trabalho apresenta a relação entre a deformação aplicada durante a trefilação com alterações microestruturais tais como, a espessura das lamelas de cementita e ferrita, a fração volumétrica das interfaces interlamelas e a distribuição não uniforme de deformação plástica. Outros estudos ainda relacionam determinados parâmetros microestruturais com as propriedades mecânicas dos aços perlíticos. Segundo Embury [3] e Langford [4] a resistência do aço é inversamente proporcional à raiz quadrada do espaçamento interlamelar de acordo com a relação de Hall-Petch.

Neste contexto, este trabalho tem por objeto avaliar a estreita relação entre os parâmetros de processamento, as alterações microestruturais e as propriedades mecânicas dos aços perlíticos durante o processo de trefilação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O Material

As amostras que foram utilizadas neste trabalho são provenientes de um material comercial fornecido por uma empresa. As amostras são do aço SAE 1070 sob a forma de fios de espessura que variam de 5,50 a 1,55 mm com tamanho aproximado de 25 cm de comprimento. O material de partida são fios com 5,50 mm de diâmetro que foram produzidos por meio de laminação a quente com resfriamento contínuo não possuindo acabamento por usinagem ou deformação a frio. As amostras do material trefilado foram fornecidas segundo as características apresentadas no item 2.2.1.

Tabela 1. Composição química do aço SAE 1070 (teores expressos em % em peso)

S	C	Mn	P	Si	Al	Cr	Cu	Ni	Mo	N
0,010	0,712	0,489	0,007	0,225	0,003	0,016	0,009	0,006	0,005	0,010

2.2 Métodos

2.2.1 Processo de trefilação

As amostras de fios do aço SAE 1070 de espessura de 5,50 mm tiveram a carepa removida de forma mecânica e, em seguida, foram trefiladas em 12 passes com taxa de redução média de 15 a 21% até atingir o diâmetro de 1,55 mm. No processo foram utilizadas fiéis de carboneto de tungstênio e a lubrificação foi realizada por meio do sabão a seco de estearato de sódio.

2.2.2 Caracterização microestrutural

As amostras foram cortadas em pedaços de aproximadamente 7 mm e embutidas em resina fenólica. Em seguida passaram pelas etapas de lixamento com as lixas de carvão de silício de 320, 400, 600, 1000 e 1200. O polimento foi realizado com pasta de diamante com granulometria de 6, 3 e 1 μm nos panos Top, Ram e Supra do fabricante Arotec respectivamente. Para o polimento final a solução de Sílica Coloidal diluída em água foi utilizada. A microestrutura foi revelada através do ataque químico feito com a solução de Nital 1%. As amostras foram então, observadas no microscópio eletrônico de varredura EVO MA10 da Zeiss e no microscópio de força atômica EasyScan 2 Flex AFM.

2.2.3 Ensaios mecânicos

2.2.3.1 Dureza de Vickers

O ensaio mecânico de dureza de Vickers foi realizado a fim de se determinar a energia armazenada, de maneira indireta, na seção longitudinal das amostras. Para o ensaio um microdurômetro da Shimadzu modelo HVM-2T.

2.2.3.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados com o objetivo de verificar o comportamento elastoplástico do material assim como alongamento em função da carga aplicada. Este ensaio foi realizado na máquina de ensaio eletromecânico EMIC com célula de carga de 1 ton.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O material na condição inicial sob a forma de fios com diâmetro de 5,5 mm apresenta a microestrutura predominantemente perlítica com a presença de ferrita pró-eutetóide. Essas características são compatíveis com o processo de laminação a quente ao qual o material foi submetido. A Figura 1 foi obtida com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura com sinal de elétrons secundários permitindo a visualização de forma nítida da estrutura lamelar apresentada pelos aços perlíticos. É possível identificar os grãos de ferrita pró-eutetóide que se apresentam com tamanho menor e topografia plana se comparado com as colônias de lamelas, alguns destes grãos de ferrita estão sinalizados através de círculos tracejados. A quantidade de grãos ferríticos é reduzida devido ao fato que o aço SAE 1070 apresenta uma concentração de carbono bem próxima ao ponto eutetóide. Nota-se também, que as colônias que são compostas por lamelas alternadas, apresentam diferentes orientações macroscópicas [5].

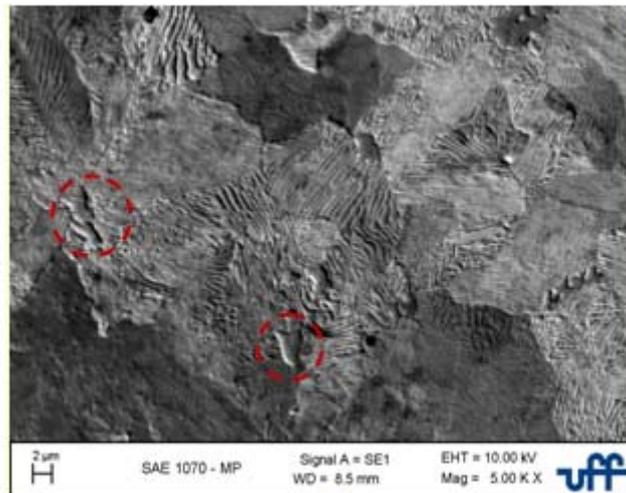


Figura 1. MEV. Seção Transversal do aço SAE 1070 na condição inicial.

3.2 Material Deformado

O material trefilado foi submetido a um elevado grau de deformação que implicou em alterações morfológicas em seus constituintes. A Figura 2 apresenta a microestrutura do fio de aço trefilado a uma deformação de 2,52. É possível observar, na seção transversal do fio, que há a formação de uma estrutura comumente denominada de “*curling*” devido à fratura das lamelas de cementita e a torção das lamelas de ferrita [5,6]. A fragmentação e a dissolução da cementita durante a deformação é resultado da interação entre as discordâncias e os átomos de carbono [7]. Entretanto, Nematollahi [8] e seus colaboradores afirmaram que as lamelas de cementita estão fragmentadas em partículas nanométricas em decorrência do desencontro substancial entre as curvaturas das duas fases. Esse desencontro de curvatura é explicado pelo fato que a fase cementita é mais dura e resistente que a ferrita, o que leva a comportamentos distintos durante a deformação.

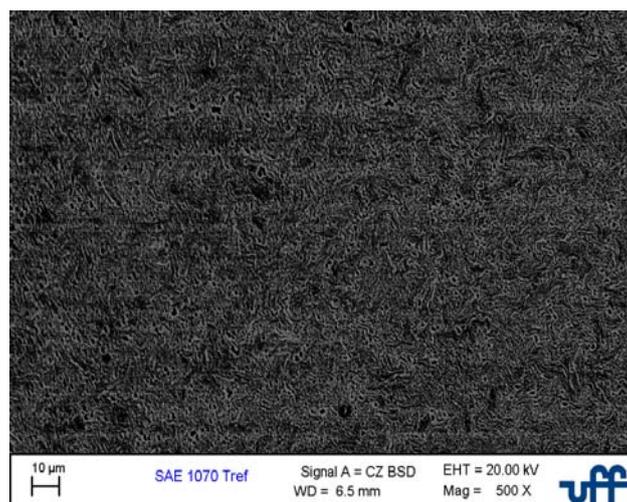


Figura 2. MEV. Seção Transversal do aço SAE 1070 deformado a frio com deformação acumulada de 2,52.

A estrutura perlítica quando deformada, não apresenta as mesmas características microestruturais nas seções longitudinal e transversal. Esse comportamento anisotrópico pode ser observado na Figura 3.

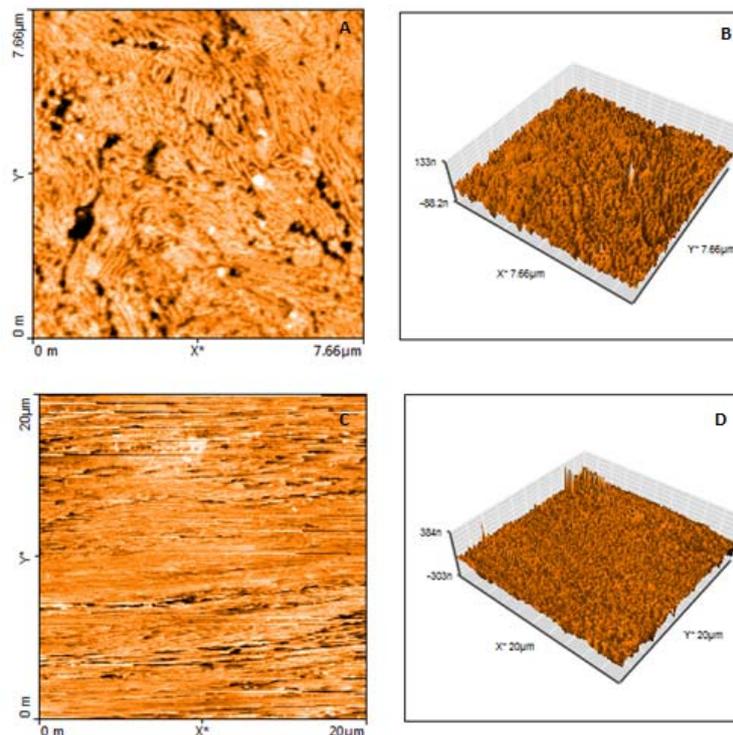


Figura 1. AFM. Micrografia do aço SAE 1070 deformado a frio com deformação acumulada de 2,52 (A) seção transversal e (C) seção longitudinal. Topografia do aço SAE 1070 deformado a frio com deformação acumulada de 2,52 (B) seção transversal com área analisada de 58,6756 μm^2 e (D) seção longitudinal com área analisada de 400 μm^2 .

A seção transversal apresenta a estrutura “curling” conforme discutido anteriormente e na seção longitudinal é possível observar que as lamelas encontram-se completamente alinhadas com a direção de trefilação. A aparente contradição entre, a estrutura com torção e fragmentação das lamelas apresentada na seção transversal e as lamelas alongadas em direção uniaxial observada na seção longitudinal é atribuída à diferença de deformação das colônias de perlita com orientações espaciais distintas e as deformações localizadas [4]. Comportamento semelhante foi encontrado em [9] no qual uma deformação de 2.7 ocasionou a rotação de todas as lamelas de cementita para próximo da direção de trefilação. É possível observar também que, em ambas as seções, a espessura das lamelas de cementita e o espaçamento interlamelar diminuíram drasticamente levando a um aumento considerável da fração volumétrica de interfaces. Considerando que as interfaces ferrita-cementita agem como barreiras ao movimento das discordâncias, pode ocorrer desta forma, a tendência de orientação das estruturas de discordâncias como mostra alguns estudos [10]. Desta forma, o aumento da fração volumétrica de interfaces contribui consideravelmente para o endurecimento do aço perlítico, bem como para a distribuição não uniforme de deformação.

3.3 Propriedades Mecânicas

Com a deformação ao longo do processo de trefilação, alterações consideráveis também ocorrem nas propriedades mecânicas do aço. O aço SAE 1070 apresentou

um aumento significativo em sua dureza após os doze passes de trefilação. A dureza medida para o material deformado é de 538 Vickers, um aumento de quase 70% com relação ao material de partida. Os ensaios de tração também permitiram acompanhar o encruamento dos fios de aço após a trefilação. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de tração e dureza para o material na condição inicial e após a trefilação.

Tabela 2. Propriedades Mecânicas dos fios de aço SAE 1070

Propriedade Mecânica	Material de Partida	Material Deformado	Unidade
Dureza	319	538	Vickers
Limite de Resistência	1028	1900	MPa
Limite de Escoamento	532	1377	MPa
Alongamento	11,4	4,5	%

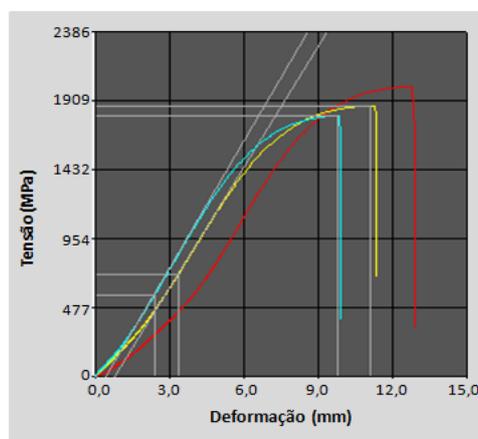


Figura 4. Gráfico Tensão x Deformação do aço SAE 1070 trefilado com deformação acumulada de 2,52.

Os testes de tração confirmam o endurecimento do material mostrado pelos ensaios de dureza. O limite de resistência quase que dobrou se comparado com o material de partida, já o limite de escoamento apresentou um aumento ainda mais acentuado. Ou seja, o material quando deformado aumenta sua resistência e, principalmente se deforma elasticamente a níveis de tensão bem mais elevados. Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos [11-13]. A perda de ductilidade do material também fica evidente com a redução de 60% do alongamento comparado com o material na condição inicial.

O comportamento da curva tensão x deformação revela que o aço SAE 1070 apresenta uma fratura frágil. Segundo Li e Huang [14], num ensaio de tração de um aço alto carbono a cementita, que é a fase dura e frágil, fratura primeiro sob uma carga elevada, conforme a carga vai aumentando as lamelas de cementita vão se fraturando até o ponto que a fratura da amostra ocorre. A curva da Figura 4 ainda permite observar que a tensão entre o limite de escoamento e o limite de resistência são relativamente próximas, indicando que a capacidade de deformação plástica do material é reduzida. Este comportamento era esperado uma vez que o material já havia sido submetido ao processo de trefilação com uma taxa de deformação elevada. A perda de ductilidade acompanhada pelo aumento da resistência do material trefilado pode ser explicada por um conjunto de alterações microestruturais. De acordo com a abordagem de alguns estudos o endurecimento de fios de aço perlítico ocasionado durante a deformação via trefilação foi considerado como um

efeito aditivo e não um complexo mecanismo microestrutural [3]. Segundo Zhang [6], existem três mecanismos que contribuem para o endurecimento da estrutura perlítica trefilada: endurecimento ocasionado devido aos contornos e as discordâncias e o endurecimento por solução sólida.

Durante a deformação plástica, as lamelas que constituem a fase perlita se tornam estreitas e alongadas formando uma estrutura fibrosa. Essas lamelas como contorno de grão, agem como barreiras ao movimento das discordâncias [15]. A densidade de discordância também por si só, representa um fator de endurecimento, uma vez que dificulta o deslizamento, que representa o principal mecanismo de deformação plástica. Nos fios trefilados a concentração de discordâncias é elevada tanto nas lamelas de ferrita quanto na interface ferrita-cementita [6]. Com o aumento crescente de deformação, ao longo dos passes de trefilação, a cementita começa a se decompor, levando a um enriquecimento de carbono na fase ferrita [16], esse fenômeno leva o endurecimento do material uma vez que a elevada concentração de discordâncias presentes na fase ferrita interage com os átomos de carbono.

4 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho permitiram acompanhar as alterações microestruturais sofridas pelos fios de aço SAE 1070 durante o processo de trefilação, relacionando com as propriedades mecânicas medidas através de ensaio de tração e dureza. A caracterização microestrutural do material deformado revelou uma anisotropia entre as seções longitudinal e transversal. A estrutura denominada de “*curling*”, constituída por lamelas torcidas e fragmentadas foi observada na seção transversal enquanto que na seção longitudinal a grande parte das lamelas encontrava-se alinhadas com a direção de trefilação. As propriedades mecânicas medidas por meio de ensaio de tração e dureza Vickers evidenciaram o aumento considerável da dureza e da resistência do material deformado, esse aumento tão expressivo é atribuído aos diversos mecanismos de endurecimento dos aços perlíticos.

Agradecimentos

À Capes e ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

- 1 Borchers, C.; Lehmborg, A.; Deutges, M.; Cizek, J.; Kirchheim, R. Effect of annealing on point defect population in cold-drawn pearlitic steel wires. *Scripta Materialia*. 2014; 86: 17 – 19.
- 2 Zelin, M. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing. *Acta Materialia*. 2002; 50: 4431 – 4447.
- 3 Embury, J. D.; Fisher, R. M. The structure and properties of drawn pearlite. *Acta Metallurgica*. 1966; 14: 147-159.
- 4 Langford, G. Deformation of pearlite. *Metallurgical Transactions A*. 1977; 8: 861-875.
- 5 Zhang, X.; Godfrey, A.; Hansen, N.; Huang, X. Hierarchical structures in cold-drawn pearlitic steel wire. *Acta Materialia*. 2013; 61: 4898 – 4909.
- 6 Zhang, X.; Godfrey, A.; Hansen, N.; Huang, X. Microstructure and strengthening mechanisms in cold-drawn pearlite steel wire. *Acta Materialia*. 2011; 59: 3422 – 3430.
- 7 Languillaume, J.; Kapelski, G.; Baudalet, B.; Evolution of the tensile strength in heavily cold drawn and annealed pearlitic steel wires. *Materials Letters*. 1997; 33: 241 – 245.

- 8 Nematollahi, G.; Pezold, J.; Neugebauer, J.; Raabe, D. Thermodynamics of carbon solubility in ferrite and vacancy formation in cementite in strained pearlite. *Acta Materialia*. 2013; 61: 1773-1784.
- 9 Zhang, X.; Godfrey, A.; Hansen, N.; Huang, X. Evolution of cementite morphology in pearlitic steel wire during wet wire drawing. *Materials Characterization*. 2010; 61: 65 – 72.
- 10 Toribio, J.; Matos, J.; Gonzalez, B. Micro and macro approach to the fatigue crack growth in progressively drawn pearlitic steels at different R-ratios. *International Journal of Fatigue*. 2009; 31: 2014 – 2012.
- 11 Nishida, S.; Yoshie, A.; Imagumbai, M. Work Hardening of Hypereutectoid and Eutectoid Steels during Drawing. *ISIJ International*. 1998; 38:177 – 186.
- 12 Goto, S.; Kirchheim, R.; Al-Kassab, T.; Borchers, C. Application of cold drawn lamellar microstructure for developing ultra-high strength wires. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2007; 17: 1129 – 1138.
- 13 Toribio, J. Relationship between microstructure and strength in eutectoid steels. *Materials Science and Engineering A*. 2004; 387: 227 – 230.
- 14 Li, F.; Huang, H. Analysis on the deformation and fracture behavior of carbon steel by in situ tensile test. *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2006; 13: 504 – 507.
- 15 Eshelby, J. D.; Frank, F. C.; Nabarro, F. R. The equilibrium of linear arrays of dislocations. *Philosophical Magazine*. 1951; 42: 351 - 364.
- 16 Languillaume, J.; Kapelski, G.; Baudalet, B. Cementite dissolution in heavily cold drawn pearlitic steel wires. *Acta Materialia*. 1997; 45: 1201 – 1212..