

TRATAMENTO DE CARBONITRETAÇÃO A PLASMA DE AÇO 4340 COM ESTRUTURAS BAINÍTICAS E MARTENSÍTICAS¹

Vladimir Henrique Baggio-Scheid²

Antônio Jorge Abdalla²

Paulo Atsushi Suzuki³

Arus Ranieri⁴

Resumo

Neste trabalho foi feita uma caracterização do aço AISI 4340, submetido a diferentes tratamentos térmicos e ao processo de nitrocarbonetação a plasma. Os tratamentos térmicos utilizados foram: normalização; tempera em óleo e revenimento; tratamento isotérmico em banho de sal e resfriamento em água gelada. O tratamento de nitrocarbonetação a plasma foi realizado a uma temperatura de 500 °C durante 3h. As amostras foram caracterizadas através de testes de microdureza, microscopia óptica e difração de raio-X. Os tratamentos térmicos induziram a formação de estruturas multifásicas, predominantemente bainíticas e martensíticas, com durezas variando entre 500 e 580 HV. A nitrocarbonetação a plasma resultou em uma camada de compostos, de aproximadamente 10 µm, com dureza superior a 900 HV, contendo predominantemente a fase ϵ - {Fe₂₋₃N}, e em uma camada difusa, com extensão de 130 µm. Resultados mostrando a influência do tratamento a plasma na microestrutura das amostras são apresentados e analisados.

Palavras-chave: Nitrocarbonetação a plasma; Tratamento térmico; Aço 4340; Estruturas multifásicas.

PLASMA NITROCARBURIZING TREATMET OF 4340 STEEL WITH BAINITIC AND MARTENSITIC STRUCTURES

Abstract

In this work a characterization of the AISI 4340 steel, treated by different heat treatments and by plasma nitrocarburizing process, has been done. Three different heat treatments were used. The steel samples were austenitized; austenitized, quenched in oil and tempered; and austenitized, quenched in salt bath and cooled in water (isothermic). After the heat treatments the samples were plasma nitrocarburized at 500 °C for 3h. The samples were characterized by microhardness test, optical microscopy, and XRD. Multiphase structures predominantly bainitic and martensitic with hardness between 500 and 580 HV have been formed by the heat treatments. The nitrocarburizing process has resulted in a compound layer with 10 µm an hardness higher than 900 HV, containing predominantly the ϵ - {Fe₂₋₃N} phase, as well as, in a diffusion layer with a thickness of 130 µm. The results concerning the influence of the plasma treatment on the microstructures of the samples are presented and analyzed.

Key words: Plasma nitrocarburizing; Heat treatment; 4340 steel; Multiphase structures.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Pesquisador, Dr., Instituto de Estudos Avançados do Centro Técnico Aeroespacial*

³ *Prof., Dr., EEL-USP*

⁴ *Doutorando, FEG-UNESP*

1 INTRODUÇÃO

Os aços estruturais da série AISI 4XXX são amplamente utilizados na fabricação de componentes aeronáuticos e automobilísticos. Por questões econômicas, estes aços de baixa liga têm sido utilizados em aplicações, que anteriormente eram restritas a aços mais nobres como os aços ferramentas. Para atender a estas aplicações mais exigentes, um grande esforço tem sido feito no sentido de melhorar suas propriedades como, por ex., tenacidade, tração, fadiga, desgaste e corrosão.⁽¹⁾ Isto, em muitos casos, requer uma combinação de tratamentos térmicos e de superfícies.

Uma melhoria na tenacidade, na resistência à tração e no aumento da vida em fadiga dos aços da série 4XXX, em especial dos aços 4140 e 4340, tem sido obtida através de tratamentos térmicos envolvendo transformação de fases. As primeiras pesquisas, utilizando o processo de transformação de fases resultaram nos chamados aços bifásicos⁽²⁾ e posteriormente nos aços multifásicos, ou de fases complexas.⁽³⁾ Estas estruturas são obtidas através de tratamentos térmicos intercríticos, isotérmicos ou processamentos termomecânicos e têm sido muito utilizada na indústria.⁽⁴⁾

Os aços multifásicos possuem microestruturas com diferentes morfologias e frações volumétricas das fases. Estas estruturas influenciam significativamente as propriedades mecânicas. Desta forma, com um mesmo aço, pode-se alterar a rota de tratamento térmico e obter diferentes propriedades, conforme a exigência do projeto.⁽⁵⁾ Por exemplo, para melhorar a tenacidade dos aços, a substituição total ou parcial da fase martensita, por bainita ou uma estrutura multifásica, pode ser utilizada. Assim, pode-se manter níveis de resistência elevados, sem que haja uma perda acentuada da ductilidade.⁽⁶⁾ Alguns trabalhos mostram que, além da influência das fases duras (martensita e bainita) e dúctil (ferrita) sobre a tenacidade, a austenita retida também tem um papel importante.⁽⁷⁾ Devido ao efeito TRIP (Transformation Induced Plasticity), a fase austenítica se transforma em martensita durante a deformação plástica, contribuindo tanto para o aumento da ductilidade como da resistência à tração. Tratamentos isotérmicos na região de formação de bainita podem induzir a formação de austenita retida na microestrutura final do aço.⁽⁸⁾

A melhoria das propriedades superficiais, como desgaste, fadiga, corrosão, fricção e também a capacidade para suportar cargas de contato dinâmicas, tem sido obtidas através de tratamentos termoquímicos como a nitretação, nitrocarbonetação e carbonetação.^(9,10) Na nitretação o nitrogênio atômico penetra na superfície do metal e se difunde para o seu interior, formando com os elementos de liga, como cromo e alumínio, finas dispersões de nitretos. Estes precipitados elevam a dureza superficial e introduzem tensões compressivas na superfície, propriedades estas benéficas tanto para redução do desgaste, quanto para o aumento da vida em fadiga.⁽¹¹⁾

Embora tenham sido realizados muitos estudos sobre a melhoria das propriedades dos aços propiciadas pelos tratamentos térmicos e, por outro lado, sobre a melhoria das propriedades superficiais propiciadas pelos tratamentos termoquímicos, o mesmo não se pode dizer sobre a influência dos tratamentos superficiais nas propriedades microestruturais e mecânicas, obtidas por meio dos tratamentos térmicos.

Neste trabalho são apresentados resultados sobre a influência do tratamento de nitrocarbonetação a plasma na microestrutura do aço 4340 submetido a três

tipos de tratamentos térmicos: Tempera e revenimento, Isotérmico e Normalização. Além disto, as propriedades das camadas de compostos e difusa formadas na superfície das três estruturas são apresentadas e analisadas.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram feitos de aço AISI 4340 com a seguinte composição em peso: 0,39% de C, 0,001% de S, 0,017% de P, 0,26% de Si, 0,64% de Mn, 0,80% de Cr, 1,82% de Ni, 0,22% de Mo e Fe em balanço. O Aço foi recebido na forma de chapa laminada com 3 mm de espessura. O material foi cortado em amostras de 10 x 15 cm e submetido aos tratamentos térmicos de normalização, tempera e revenimento e Isotérmico. Os detalhes destes tratamentos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Tratamentos térmicos

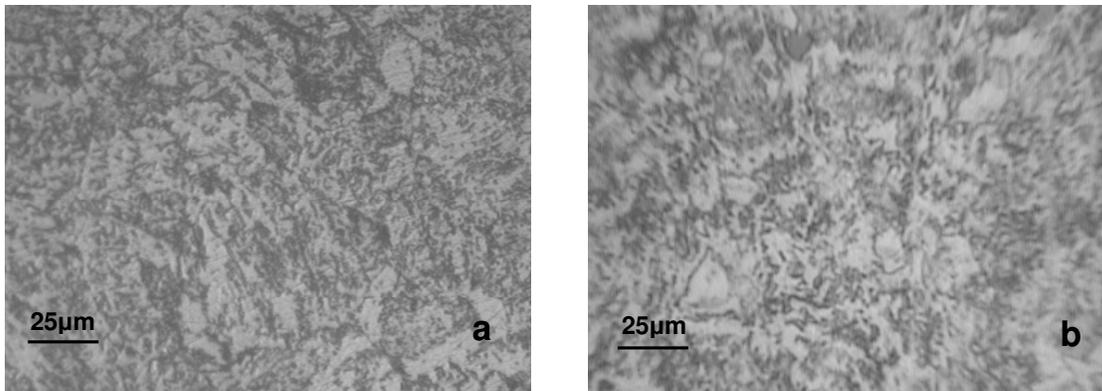
| Tratamento Térmico | Descrição | Estruturas formadas |
|-----------------------|--|-----------------------|
| Normalização | Recozimento a 900°C durante 1h e resfriamento no ar. | Ferrítica, perlítica |
| Tempera e revenimento | Aquecimento a 900°C por 30 min, seguido de tempera em óleo e revenimento a 400°C por 2 h. | Martensítica revenida |
| Isotérmico | Aquecimento a 900°C por 30 min, seguido de tratamento isotérmico em banho de sal a 320°C por 15 min e resfriamento em água gelada. | Bainítica |

Amostras limpas e desengraxadas foram nitretadas no reator a plasma da empresa Metal Plasma, que utiliza uma descarga dc-pulsada. As amostras foram nitretadas a 500°C por 3 h em uma atmosfera contendo, 75% N₂ – 23,5%H₂ – 1,5% CH₄.

As medidas de microdureza foram feitas com cargas de 50 gf. A camada superficial foi examinada por meio da difração de raio-X (DRX), usando-se a radiação CuK α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). A proporção das fases nas amostras foi calculada com o programa FullProf,⁽¹²⁾ baseado no método de Rietveld.⁽¹³⁾ A microestrutura das amostras foi analisada por meio de microscopia óptica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

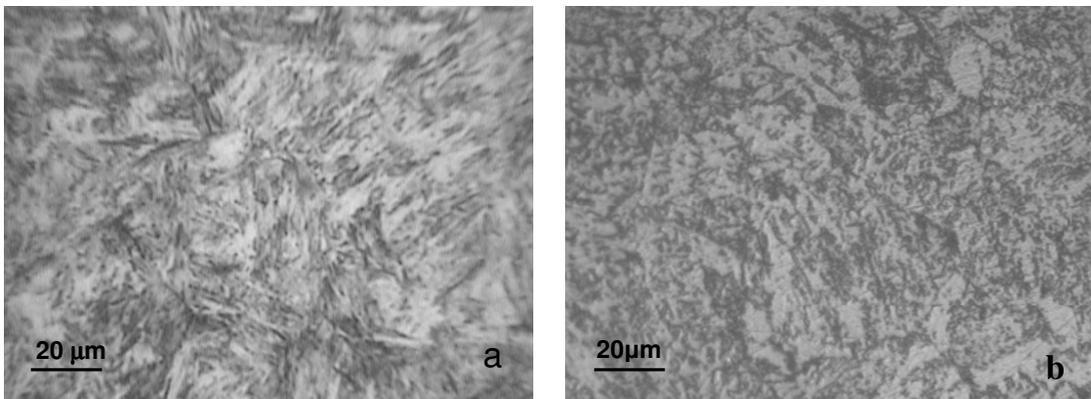
Na Figura 1 são apresentadas as micrografias do aço normalizado (a) e normalizado e nitrocarbonetado (b). Basicamente, observa-se uma estrutura ferrítica (branca) e perlítica (escura), típicas do aço 4340. Não se observam grandes alterações na estrutura de grãos após o tratamento a plasma, mas os grãos tornaram-se mais poligonais.



Fonte: Laboratório de imagens do IEAv/CTA.

Figura 1: Microestrutura do aço 4340 normalizado (a) e normalizado e nitrocarbonetado (b).

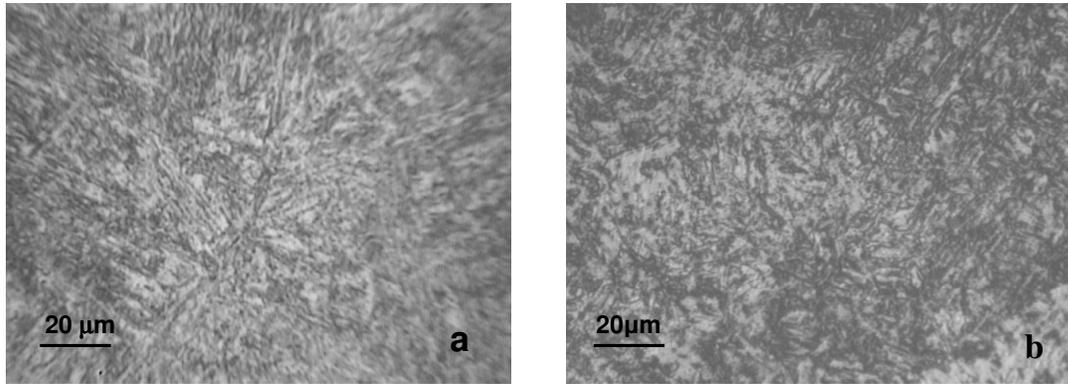
A Figura 2 mostra a estrutura da martensita revenida obtida pelo processo de tempera e revenimento antes (a) e após o tratamento a plasma (b). Observa-se uma redução na tetragonalidade dos grãos martensíticos com provável precipitação de carbonetos. Nota-se também que as agulhas de martensita desaparecem devido à redução das tensões internas.



Fonte: Laboratório de imagens do IEAv/CTA.

Figura 2: Microestrutura do aço 4340 temperado e revenido (a) e temperado e revenido e nitrocarbonetado (b).

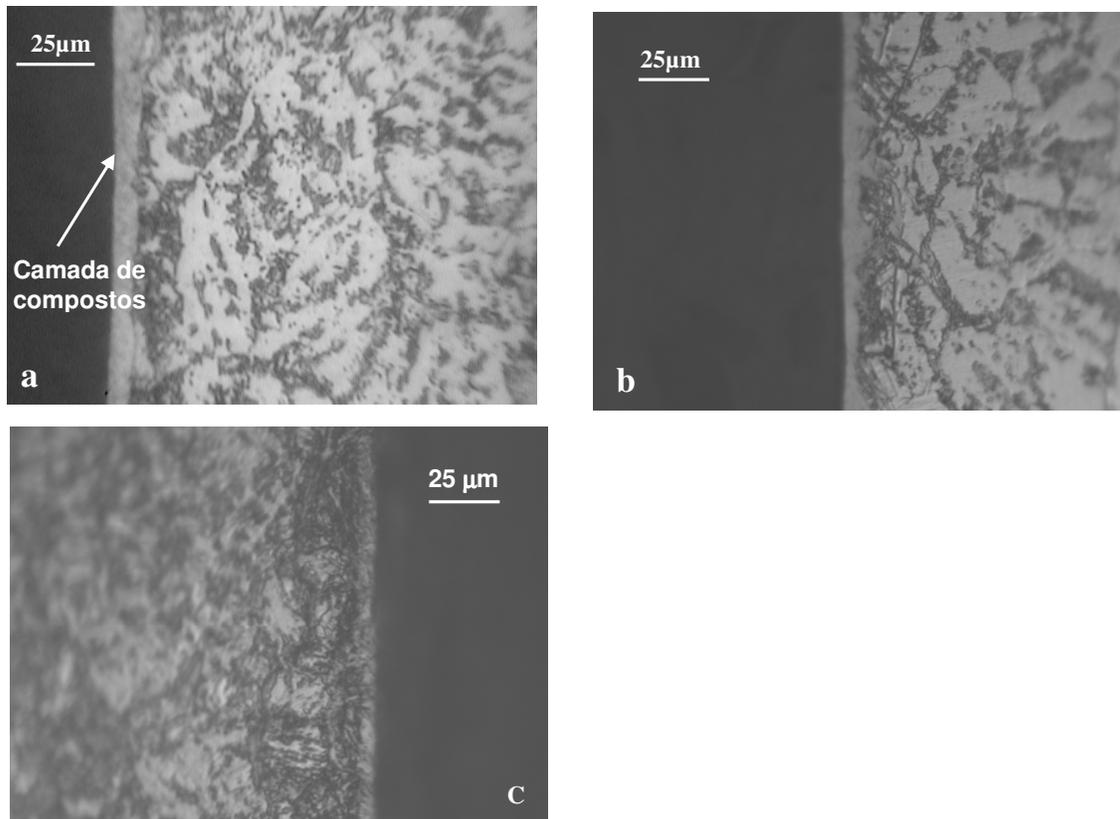
Na Figura 3 pode ser vista a estrutura bainítica formada com o tratamento isotérmico antes (a) e após o tratamento a plasma (b). O tratamento a plasma a 500°C provocou outro revenimento no aço bainítico, reduzindo as tensões internas e o aspecto de cisalhamento da microestrutura.



Fonte: Laboratório de imagens do IEAv/CTA.

Figura 3: microestrutura do aço 4340 isotérmico (a) e isotérmico e nitrocarbonetado (b).

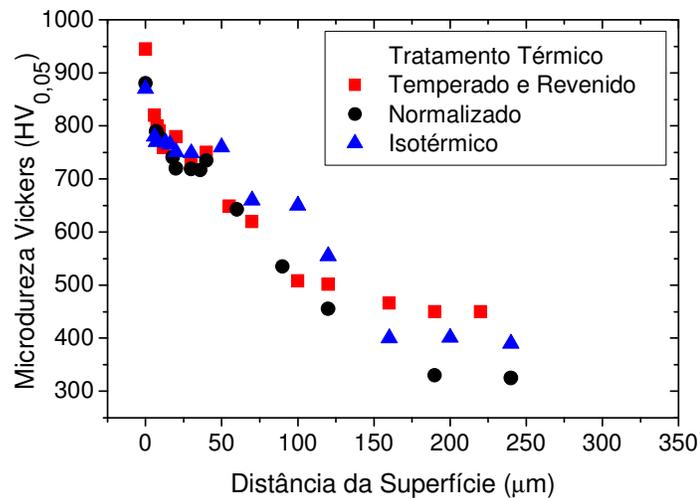
A camada de compostos na superfície das amostras normalizada, isotérmica, temperada e revenida são mostradas nas micrografias da Figura 4. Uma camada com cerca de 10 μm se formou sobre a superfície do aço normalizado. Há uma ligeira redução, de aproximadamente 2 μm na espessura da camada no caso dos outros dois tratamentos térmicos, indicando que a superfície da estrutura ferrítica-perlítica é capaz de incorporar mais nitrogênio.



Fonte: Laboratório de imagens do IEAv/CTA.

Figura 4: Camada de compostos do aço 4340 nitrocarbonetado nas condições de tratamentos térmicos normalizado (a), temperado e revenido (b) e isotérmico (c).

Os perfis de microdureza obtidos após a nitrocarbonetação, nas três condições de tratamentos térmicos são mostrados na Figura 5. O maior valor de dureza foi medido na superfície do aço na condição temperado e revenido, 945HV_{0,05}. Uma dureza um pouco inferior, em torno de 875 HV_{0,05}, foi observada nas outras condições de tratamentos térmicos. A camada difusa se estende até uma profundidade de 130 μm. A variação de dureza observada entre 25 μm a 50 μm de profundidade é um indício de que houve uma migração de carbono nesta região, induzida pelo tratamento a plasma.



Fonte: Laboratório de tratamento e análise de superfícies do IEAv/CTA.

Figura 5: Perfis de microdureza do aço 4340 nitrocarbonetado nas três condições de tratamentos térmicos.

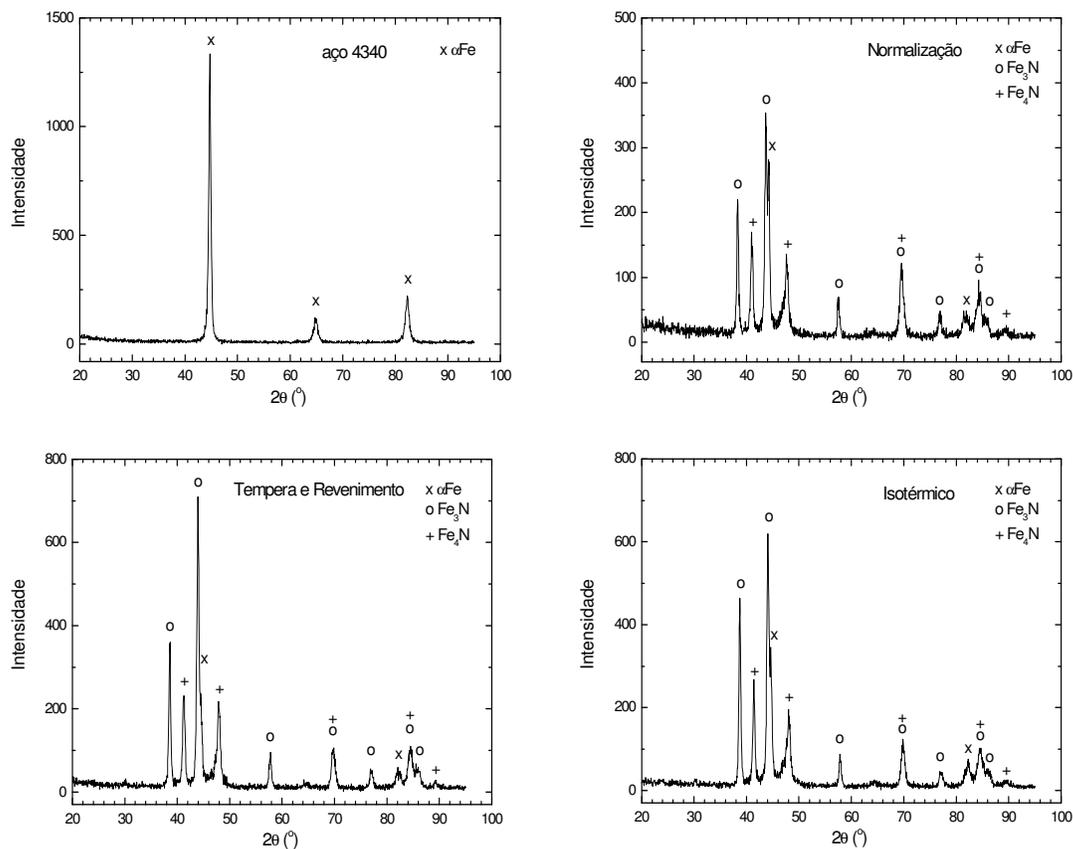
Há uma redução de dureza do substrato (microdureza medida para profundidades além de 120 μm) após o tratamento a plasma. Isto ocorre porque durante o processo de nitrocarbonetação a 500 °C o aço é submetido a outro ciclo de revenimento. A maior redução de dureza, cerca de 100 HV, ocorreu para o tratamento isotérmico com estrutura bainítica, como pode ser visto na Tabela 2. Lee et al observaram uma queda de dureza ainda maior em amostras nas condições de tempera a partir de 850 °C e revenimento por 2h a 500 °C após o tratamento de nitretação a plasma realizado também a 500 °C.⁽¹⁴⁾

Tabela 2: Variação de dureza do substrato após o tratamento a plasma

| Tratamento a plasma | Dureza do substrato (HV _{0,05}) | | |
|---------------------|---|-----------------------|------------|
| | Normalização | Tempera e revenimento | Isotérmico |
| Sem tratamento | 341 | 505 | 498 |
| Nitrocarbonetação | 330 | 450 | 400 |

Os picos do diagrama de difração de raios-X do aço AISI 4340 foram identificados como sendo provenientes da estrutura α-Fe, como pode ser visto na Figura 6. Os diagramas de DRX das superfícies nitrocarbonetadas nas três condições de tratamentos térmicos mostraram a ocorrência das fases ε - [Fe₂₋₃N], γ

- $[\text{Fe}_4\text{N}]$ e $\alpha\text{-Fe}$. Na condição temperada e revenida a proporção entre as fases ε , γ e $\alpha\text{-Fe}$ foi de 59%, 29% e 12%, respectivamente. Portanto, o processo de nitrocarbonetação a 500 °C durante 3h resultou em uma camada de compostos com predominância da fase ε . Resultados semelhantes foram obtidos com a nitretação deste mesmo aço em condições similares, porém com uma incidência menor da fase ε .⁽⁹⁾ Os diagramas de DRX das amostras nitrocarbonetadas nas três condições de tratamentos térmicos também são apresentados na Figura 6.



Fonte: EEL-Usp.

Figura 6: Difratomogramas de DRX do aço 4340 nitrocarbonetado nas três condições de tratamentos térmicos.

4 CONCLUSÃO

- O tratamento de nitrocarbonetação a plasma realizado a 500 °C por 3h introduz alterações na microestrutura do aço 4340, tratado termicamente, uma vez que ele atua como outro ciclo de revenimento.
- Como resultado das alterações microestruturais introduzidas pelo tratamento a plasma, há uma redução de dureza do substrato. A menor variação, aproximadamente, 20 HV, ocorreu para a estrutura ferrítica-perlítica, resultante do tratamento de normalização, enquanto que a maior, em torno de 100 HV, ocorreu para a estrutura bainítica, resultante do tratamento isotérmico.
- A influência das diferentes estruturas nas fases, espessura e dureza da camada de compostos é pequena. Entretanto, a camada mais espessa, com cerca de

10µm, se formou sobre a superfície do aço normalizado, indicando que a superfície da estrutura ferrítica-perlítica é capaz de incorporar mais nitrogênio.

- Uma variação de dureza observada entre 25 a 50 µm de profundidade, mais acentuada no tratamento isotérmico, é um indício de que houve uma migração de carbono nesta região, induzida pelo tratamento a plasma.
- A influência das diferentes estruturas na espessura da camada difusa não é perceptível, indicando que a difusão do nitrogênio dentro do substrato é idêntica nos três casos estudados.

REFERÊNCIAS

- 1 Bhshan, B., Gupta, B.K., Handbook of Tribology – Materials, Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill, New York, 1991
- 2 Hayami, J., Furukawa, T., Microalloying, Vanitech, p.78 – 87, 1975.
- 3 Souza, G.A., Elisei, C.C.A., Abdalla, A.J., Hashimoto, T.M., Pereira, Anais do 63º Congresso Anual da ABM, CDROM, p. 2791 - 2799, 2008.
- 4 Andrade, S.L.; Batista, J.F.; Taiss, J.M.; Rosa, L.K.; In: 57th Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2002.
- 5 Sakuma, Y., Matsumura, O., Takechi, H., Metallurgical Transaction, v.22A, 1991.
- 6 Abdalla, A.J., Hashimoto, T.M., Moura Neto, C., Monteiro, W.A, Proceedings of 8º Int. Fatigue Congress, v.4, p. 2263 - 2270, 2002.
- 7 Matsumura, O.; Sskuma, Y; Takechi, H.; Transactions ISIJ, v. 27, n. 7, p. 570 - 579, 1987.
- 8 Sakuma, Y.; Matlock, D. K.; Rauss, G. K., Metallurgical Transactions, v.23 A, p. 1221 - 1232 ,1992.
- 9 Sirin, S.Y., Sirin, K., Kaluc, E., Materials Characterization 59, p. 351 - 358, 2008.
- 10 Podgornik, B., Vizintin, J., Material Science and Engineering A315, p. 28 - 34, 2001.
- 11 Nicoletto, G., Tucci, A., Esposito, L., Wear 197, p. 38 - 44, 1996.
- 12 Rodriguez-Carvajal, J., Reference Guide for the computer program Full-Prof, Laboratoire Leon Brillouin, CEA-CNRS, Saclay, France, 1996.
- 13 H. M. Rietveld, A profile refinement method for nuclear and magnetic structures, J. Appl. Cryst., v.2 p.65 - 71, 1969.
- 14 Lee, W.S., Su, T.T., Journal of Materials Processing Technology, v. 87, p.198 -206, 1999.