

ESTUDO DE FLUÊNCIA EM AÇOS 4340 COM DIFERENTES MICROESTRUTURAS E TRATAMENTO DE CARBONITRETAÇÃO A PLASMA

A.J.Abdalla^{1*}, I.R.Carrer², M.J.R. Barboza², V. H. Baggio-Scheid²,
C.Moura Neto³, D.A.P.Reis³

^{1*} Instituto de Estudos Avançados – IEAv/DCTA

² Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP

³ Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA/DCTA

* Rod. Tamoios, km 5,5 - 12.228-001 – S.José dos Campos – abdalla@ieav.cta.br

Resumo

A partir de barras do aço AISI 4340 foram confeccionados corpos-de-prova (CDPs) de fluência, estas foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos para a formação de microestruturas multifásicas. Após este tratamento inicial, parte dos CDPs foram ensaiados em fluência. Em um segundo lote de CDPs foi aplicado um tratamento de carbonitretada a plasma, e, posteriormente, foram também ensaiados. A camada carbonitretada e a microestrutura foram caracterizadas com análises de raios-X, microscopia óptica e confocal a laser e ensaios de dureza. Os Testes de dureza mostraram que na estrutura dos aços houve uma redução na dureza, devido ao tratamento termoquímico a 500°C. Foi observada variação no comportamento em fluência devido às diferentes microestruturas formadas. Após o tratamento a plasma, ocorreu uma redução considerável na taxa de fluência e um aumento no tempo necessário para a fratura.

Palavras-chaves: fluência, caracterização microestrutura, aço 4340, carbonitretação a plasma.

INTRODUÇÃO

Bastante populares no meio industrial e comercial, os aços AISI 4340, de ultra alta resistência, suportam elevados níveis de resistência. São de grande interesse para a indústria aeronáutica e espacial por combinarem resistência e tenacidade. Podem alcançar elevados valores nos limites de escoamento e de resistência, dependente da microestrutura, além de apresentarem boa forjabilidade e usinabilidade, facilidade para tratamento térmico e boa resistência à fadiga (Souza, 1998; Souza, et al, 2008). Proteções superficiais, como a nitretação, podem ainda garantir boa resistência a corrosão e ao desgaste (Scheid et al, 2009).

A utilização de diferentes tratamentos térmicos, como os isotérmicos e intercríticos, permite ainda obter microestruturas, com diferentes frações volumétricas de fases, permitindo uma gama de propriedades mecânicas interessantes para variadas aplicações industriais (Tomita e Okawa, 1993). Estes tratamentos térmicos, associados à utilização de pequenos teores de elementos de liga, podem ser empregados também para controlar a morfologia e o tamanho de grão do aço (Abdalla et al, 2004). A microestrutura multifásica combina microconstituintes duros e dúcteis, de forma a permitir ajustes nos níveis de resistência e ductilidade visando melhorar as propriedades mecânicas (Abdalla et al, 2004).

A melhoria das propriedades superficiais, como desgaste, fadiga, corrosão e atrito, têm sido obtidas através de tratamentos termoquímicos como a nitretação, nitrocarbonetação e carbonetação (Abdalla et al, 2010).

A carbonitretação a plasma utiliza a tecnologia da descarga incandescente para substituir os tratamentos tradicionais (Cromo duro – perda na fadiga; carboneto de W e Cd – alto custo e problemas ambientais), para introduzir carbono e nitrogênio na superfície do aço, conferindo uma camada dura e resistente ao desgaste. Esta é uma técnica que tem tido aplicações importantes em peças para veículos e equipamentos mecânicos em geral (Sirin et al, 2008; Podgorinik e Vizintin, 2001)

Em relação ao comportamento dos metais em alta temperatura, de uma forma geral, está intimamente relacionado com a presença de imperfeições cristalinas, devido à maior mobilidade atômica, e conseqüentemente aos processos que envolvem o fenômeno da difusão. Temperaturas elevadas aumentam a capacidade

de movimentação de discordâncias e podem ativar outros mecanismos responsáveis pelo processo de deformação, como a possibilidade de operação de novos sistemas de deslizamento e a deformação localizada ao longo dos contornos granulares. Muitos destes fenômenos iniciam-se na superfície e a formação de filmes protetores, como o formado na nitretação ou nitrocarbonetação, contribuem para melhorar o desempenho do material em fluência.

MATERIAIS E MÉTODOS

O aço 4340 foi recebido em forma de barrar com 1 polegada de diâmetro, a composição química está descrita na Tabela 1.

Tab. 1 - Composição química do aço 4340 (% em peso).

| Elementos | C | S | P | Si | Mn | Cr | Ni | Mo |
|-----------------|------|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 4340 (%) | 0,39 | 0,0010 | 0,01 | 0,2 | 0,6 | 0,8 | 1,8 | 0,2 |

Foram preparados corpos-de-prova (CDPs) para os ensaios de tração e de fluência foram confeccionados segundo as normas ASTM para cada tipo.

Todos os corpos-de-prova foram inicialmente submetidos ao tratamento térmico de recozimento em forno a vácuo, permanecendo a 900°C por 2 horas, com resfriamento controlado até 300°C, posteriormente resfriado ao ar.

Os CDPs foram divididos em 03 lotes:

- a) No primeiro os CDPs foram mantido Normalizados(N), sem novo tratamento;
- b) *Têmpera e Revenimento* (T&R) - austenitização a 900°C por 20 minutos, têmpera em óleo e revenimento a 300°C por 2 horas;
- b) Isotérmico (IT) - austenitização a 900°C por 20 minutos, permanecendo por 20 minutos à temperatura isotérmica de 320°C, com resfriamento final em água.

Após os tratamentos térmicos, os corpos-de-prova foram lixados até granulação 600, resultando em uma rugosidade superficial Ra em torno de 0,1 µm.

Após estes tratamentos térmicos iniciais, metade dos CDPs de cada lote foi submetida à nitrocarbonetação a plasma no reator a plasma da empresa Metal Plasma, que utiliza uma descarga dc-pulsada. As amostras foram nitrocarbonetadas a 500°C por 3h em uma atmosfera contendo, 75% N₂ – 23,5% H₂ – 1,5% CH₄. Para a caracterização da camada de compostos formadas, foram realizadas medidas de dureza por microindentação (0,05 Kgf) e análises por meio da difração de raios-X

(XRD), usando-se a radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). A microestrutura das amostras foi analisada por microscopia confocal a laser.

Para realização dos ensaios de fluência foram utilizados os fornos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA/DCTA, da marca MAYES. Nos fornos foram adaptados sistemas elétricos e controladores, desenvolvidos pela BSW Tecnologia, Indústria e Comércio Ltda, segundo as exigências da norma ASTM E139/83.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os tratamentos térmicos aplicados produziram microestruturas com diferentes morfologias diferenciadas devido às alterações nos tempos e temperaturas utilizados nos roteiros dos tratamentos. A partir da estrutura ferrítica perlítica do aço normalizado (N), foram formadas as estruturas martensíticas (têmpera e revenimento – T&R) e, com predomínio bainítico (tratamento isotérmico a 320°C - IT).

A Tab.2 mostra as alterações observadas na dureza do material (substrato), para o aço nas três condições de tratamento térmico e o valor da dureza na camada tratada por carbonitretação a plasma. A permanência do material na temperatura de 500°C , devido o tratamento a plasma, provocou uma redução na dureza do substrato.

Tab.2 – Dureza do Aço 4340 com Diferentes Microestruturas

| Tratamentos Térmicos e Carbonitretação a Plasma (Aço 4340) | | Dureza do Substrato (HV) | Dureza da Camada de Compostos (HV) |
|---|------------|---------------------------------|---|
| Normalizado | sem plasma | 341 ± 8 | - |
| | com plasma | 330 ± 7 | 860 ± 18 |
| Têmpera e Revenimento | sem plasma | 505 ± 12 | - |
| | com plasma | 450 ± 11 | 950 ± 21 |
| Isotérmico | sem plasma | 498 ± 15 | - |
| | com plasma | 400 ± 9 | 887 ± 13 |

Apesar da elevada dureza atingida na camada de compostos formadas, ocorre uma redução de dureza no material base.

As Fig.1a, b ilustram imagens obtidas por microscopia confocal a LASER (CL) da camada de nitretos formada após o tratamento de nitretação a plasma, e a Fig.c

mostra detalhe desta camada para a estrutura recozida, a camada tem cerca de 10µm e uma dureza bastante elevada (~900HV).

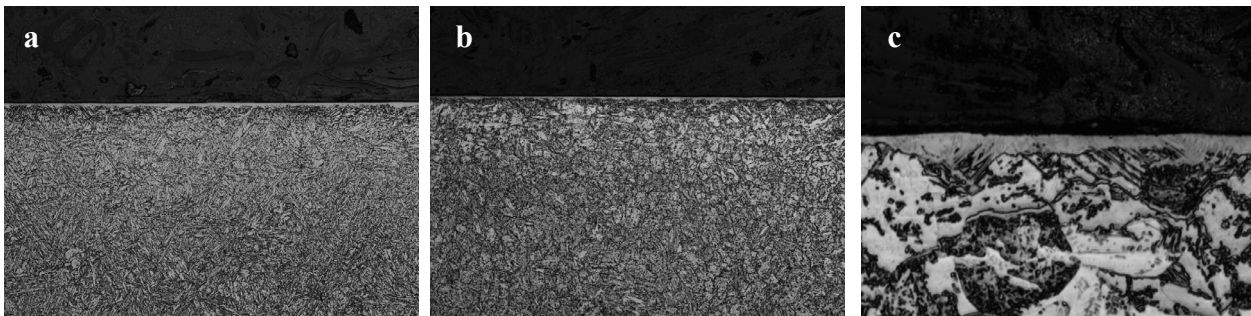


Figura 1 – (CL) – Mostrando a Camada de nitretos formada na superfície do aço 4340, com estruturas: a) martensita revenida, b) ferrítica-perlítica e, c) detalhe da camada.

Observa-se que, próximo à camada de nitretos, na região de difusão atômica, ocorreu uma maior precipitação de nitretos e carbonetos, aumentando a dureza da região até cerca de 130 µm.

Foram realizadas as análises por raios-X das superfícies tratadas a plasma, as superfícies nitrocarbonetadas nas três condições de tratamentos térmicos mostraram a ocorrência das fases ϵ - $[Fe_{2-3}N]$, γ' - $[Fe_4N]$ e α -Fe, semelhante a outros autores (Sirin et al, 2008).

O perfil de dureza por microindentação mostra elevada dureza da camada formada e a abrangência da zona difusa, o gráfico da Fig.2 ilustra esta ocorrência.

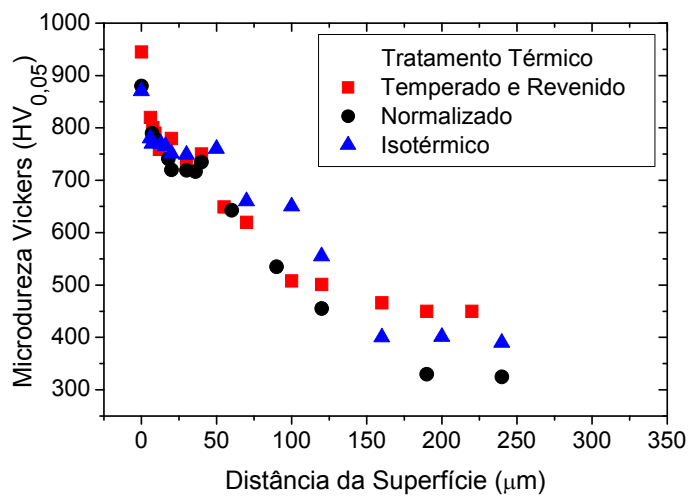


Figura 2 – Dureza Vickers (HV) em função da distância da superfície carbonitretada.

Os gráficos das Fig.3 e Fig.4 mostram as curvas de fluência obtidas para a temperatura de 600°C e tensão de 200MPa, com e sem a formação da camada de compostos devido a carbonitretação a plasma.

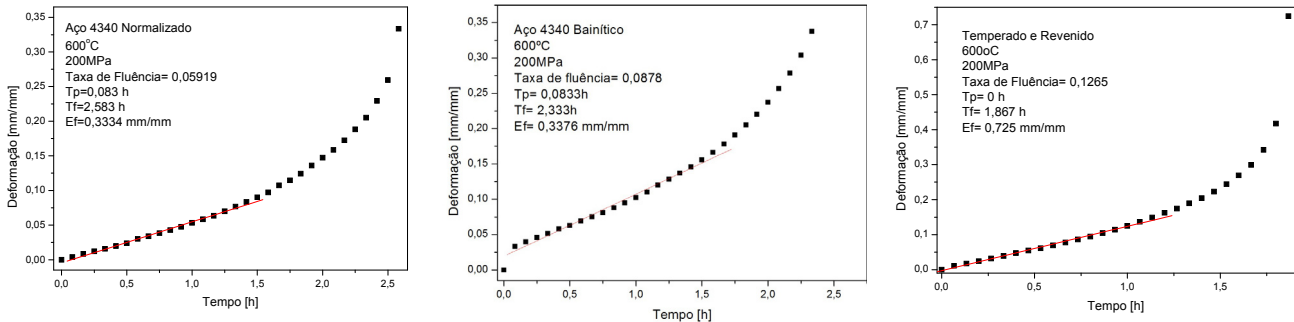


Figura 3 – Curvas de Fluência a 600°C e 200 MPa, antes do tratamento de carbonitretação a plasma, para as condições: a) Normalizada, b) estrutura bainítica e, c) martensita revenida.

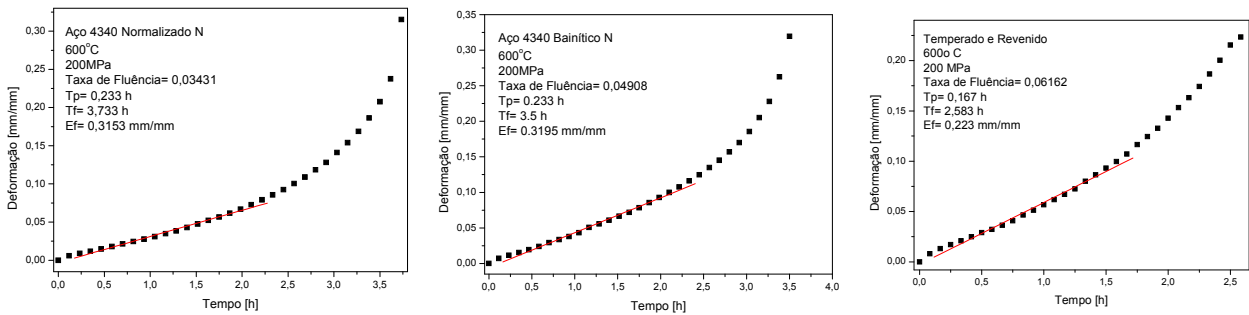


Figura 4 – Curvas de Fluência a 600°C e 200 MPa, após o tratamento de carbonitretação a plasma, para as condições: a) Normalizada, b) estrutura bainítica e, c) martensita revenida.

A Tab.3 mostra os principais parâmetros observados nos ensaios de fluência nos aços com e sem a formação da camada de nitretos.

Tabela 3 – Parâmetros dos Ensaios de Fluência (600°C e 200 MPa) com e sem tratamento de nitretação a Plasma.

| Tratamentos Térmicos e (Aço 4340) | Carbonitretação a Plasma | Taxa de Fluência $\dot{\epsilon}_s$ [1/s] | Tempo Fratura t_f [s] | Deformação ϵ_f [mm/mm] |
|-----------------------------------|--------------------------|---|-------------------------|---------------------------------|
| Normalizado | Antes plasma | 0,05919 | 9.240 | 0,3334 |
| | Depois do plasma | 0,03431 | 13.439 | 0,3153 |
| Isotérmico | Antes plasma | 0,08760 | 8.388 | 0,3376 |
| | Depois do plasma | 0,04908 | 12.600 | 0.3195 |
| Temperado e Revenido | Antes plasma | 0,12650 | 6.721 | 0,7250 |
| | Depois do plasma | 0,06162 | 9.299 | 0,2230 |

Comparando-se o comportamento em fluência para as três microestruturas observa-se que na temperatura de 600°C a estrutura normalizada apresenta menor taxa de fluência e maior tempo necessário para a fratura. Após a formação de da camada de compostos, ocorreu um aumento no tempo para a ruptura e uma redução na taxa de fluência. Observa-se também uma grande diminuição na deformação no aço na condição temperada após o tratamento a plasma.

CONCLUSÕES

- A aplicação do tratamento termoquímico a plasma formou uma camada com alta dureza com cerca de 10 µm e uma camada difusa de cerca de 130 µm.
- Após o tratamento a plasma o substrato sofreu uma redução de dureza, devido ao tempo de permanência na temperatura de 500°C durante o tratamento.
- O tratamento a plasma aplicado e a camada de compostos formada, contribuíram para a redução na taxa de fluência e o aumento no tempo necessário para a fratura durante o ensaio a 600°C, para todas as condições microestruturais estudadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FEG/UNESP, IEAv/CTA, EEL/USP e ao apoio dos órgãos de incentivo à pesquisa FAPESP, CAPES, CNPq e FUNCATE.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A. J.; HASHIMOTO, T. M., MOURA NETO, C., PEREIRA, M. S.; SOUZA, N. S.; MENDES, F. A., Alterações nas propriedades mecânicas em aços 4340 e 300M através de tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. In: CONG ANUAL ABM, 59, São Paulo, 2004. **Anais do 59º Congresso da ABM**, São Paulo: ABM, 2004, 8p. (em CD-ROM).
- ABDALLA, A.J., BAPTISTA, C.A.R.P., SCHEID, V.H.B., Barboza, M.J.R., Fatigue life changing in rolled carbon steel after plasma thermochemical treatments, **Procedia Engineering**, v.2, série 1, 2010, p.1853-61.
- ANAZAWA, R.M., ABDALLA, A.J., Aumento do Limite de Escoamento de um aço Multifásico devido ao Envelhecimento por Deformação e Efeito TRIP, **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v.1, p.19-23, 2008.
- SCHEID, V.H.B., ABDALLA, A.J., VASCONCELOS, G., Plasma Nitrocarburizing and Laser Hardening Duplex Treatment of AISI 4340 Steel, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

METALLURGICAL COATING AND THIN FILMS, Anais do CMCOTF-2009, San Diego, EUA, 2009.

•Sirin, S.Y., Sirin, K., Kaluc, E., **Materials Characterization** **59**, p. 351 - 358, 2008.

SOUZA, G.A., LUCENTE, A.B.F., ABDALLA, A.J., HASHIMOTO, T.M., PEREIRA, M.S., Microstructural characterization of hard bainite in a medium - carbon and low-alloy steel, **SAE Technical Paper Series**, S.Paulo, pg.01-06, 2008.

•SOUZA, R. C., **Estudo do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com carbeto de tungstênio pelo sistema HVOF/HP**. 1998, 158p.

Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG/UNESP, Guaratinguetá.

•THOMPSON, S. W., COLVIN, D. J., KRAUSS, G. **Metallurgical and Material Transactions A**, v.27, p. 1557-1571, 1996.

•TOMITA, Y., OKAWA, T. Effect of microstructure on mechanical properties of isothermally bainite-transformed 300M steel. **Materials Science and Engineering A**, v.172, p.145-151, 1993.

STUDY CREEP IN 4340 STEELS WITH DIFFERENT MICROSTRUCTURE AND PLASMA CARBONITRIDING PROCESSING

From the AISI 4340 bars specimens were made-for-test of creep, they were subjected to different heat treatments for the formation of multiphase microstructures. After this initial treatment, a lot of the specimens were tested in creep. One second batch of specimens was treated with a plasma carbonitriding, and later, were also tested. The carbonitriding layer and microstructure were characterized with X-ray analysis, laser confocal microscopy and hardness testing. Tests showed that the hardness in the steel was reduced due to thermochemical treatment at 500 ° C. We observed variation in creep behavior due to different microstructures formed. After the plasma treatment, there was a considerable reduction in the rate of creep and an increase in the time required for fracture.

Key-word: 4340 steel, microstructural characterization, plasma nitrocarburizing, creep.