

EFEITO DO TRATAMENTO DE SHOT PEENING NO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX DURANTE FADIGA DE MÉDIO CICLO

Peter D. S. Pedrosa¹, João Marcos A. Rebello¹, Maria P. Cindra Fonseca²

¹PEMM/COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Cx Postal 68.505 CEP 21941-972, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, Tel: 21 25628524, Fax: 21 22901615.

²Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia – TEM/PGMEC, Niterói-RJ, Brasil, mcindra@vm.uff.br

RESUMO

Está bem estabelecido que as tensões residuais compressivas aumentam a vida em fadiga dos componentes, entretanto, em um material bifásico cada fase apresenta um comportamento diferenciado em relação ao carregamento cíclico. No presente trabalho foi analisado o comportamento das tensões residuais introduzidas por shot peening, nas fases ferrítica e austenítica presentes no aço inoxidável duplex, tanto na superfície da amostra como nas camadas subsuperficiais, em fadiga de médio e alto ciclos, usando a técnica de tensometria por difração de raios-X. Os resultados indicam que as tensões residuais compressivas introduzidas pelo tratamento de shot peening conduziram a um aumento da vida em fadiga. Entretanto, o carregamento cíclico provocou alívio parcial ou total nos campos de tensões residuais. As superfícies das amostras fraturadas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Palavras-chave: tensões residuais, *shot-peening*, aços duplex, fadiga de médio ciclo, difração de raios-X.

INTRODUÇÃO

A resistência à fadiga das ligas metálicas é fortemente dependente do estado de tensões residuais presente nas camadas superficiais do material, sendo bem estabelecido que tensões residuais compressivas têm efeitos benéficos na vida em fadiga e na corrosão sob tensão, além de inibir a nucleação e a propagação de trincas.

As tensões residuais são tensões auto-equilibradas existentes nos materiais, em condições de temperatura uniforme e sem carregamento externo⁽³⁾.

Está bem estabelecido que a presença de tensões residuais pode influenciar fortemente as propriedades mecânicas do material e, em particular, as suas propriedades em fadiga.

Um excelente método de introdução de tensões residuais, com o objetivo de melhorar a vida em fadiga dos materiais, é o processo de *shot peening*. Entretanto, as tensões residuais introduzidas podem ser reduzidas ou totalmente aliviadas pela aplicação de carregamentos mecânicos ou térmicos, principalmente cíclicos.

Os aços inoxidáveis duplex apresentam uma microestrutura bifásica austeno-ferrítica, sendo que a quantidade exata de cada fase é função da composição química e do tratamento térmico empregado. A principal razão para o uso dos aços inoxidáveis duplex é sua elevada resistência à oxidação, à corrosão e à corrosão sob tensão, associada às boas propriedades mecânicas. Devido a esta combinação original de propriedades eles encontraram aplicação cada vez mais ampla na em diversos setores industriais ⁽¹⁾.

Inúmeros trabalhos, abordando as propriedades mecânicas e físicas dos aços inoxidáveis duplex, tais como limites de escoamento e de resistência, resistência à fadiga, tenacidade à fratura e resistência a corrosão, têm sido extensivamente publicados⁽²⁾. Entretanto, o comportamento das tensões residuais presentes nas diferentes fases destes aços, após *shot peening* e com carregamentos cíclicos, ainda não foi bem estabelecido.

Este trabalho teve como objetivo a investigação do comportamento das tensões residuais introduzidas por *shot peening* em ambas as fases de um aço inoxidável duplex, em fadiga de médio e alto ciclos, usando a técnica de difração de raios-X.

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi utilizado o aço inoxidável duplex UNS S31803 fabricado segundo norma ASTM A240, recebido em forma de chapa com microestrutura composta de 49% de austenita e 51% de ferrita (figura 1), cuja composição química está indicada na tabela 1. O tratamento de *shot peening* foi realizado em duas intensidades Almen, de 0,25 e 0,39 A, utilizando esferas metálicas com diâmetro entre 0,59 e 1,0 respectivamente.

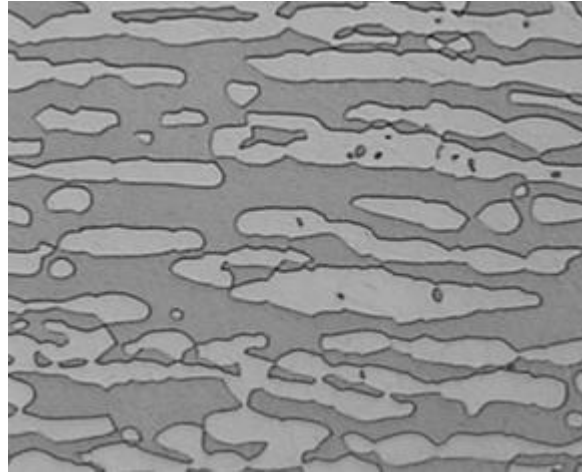


Figura 1. Microestrutura bifásica do aço duplex (500X com ataque).

Tabela 1. Composição química do aço UNS S31803 (em % de peso).

Fe	C	Ni	Mo	N	Cr
Balanço	0,020	5,44	2,49	0,16	22,30

As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X pelo método de dupla exposição utilizando um equipamento portátil (figura 2).

A remoção de finas camadas para o estudo da variação do estado de tensões residuais através da espessura, a fim de avaliar a profundidade da camada atingida pelo tratamento de *shot peening*, foi realizada utilizando polimento eletrolítico e aferida por relógio comparador digital.

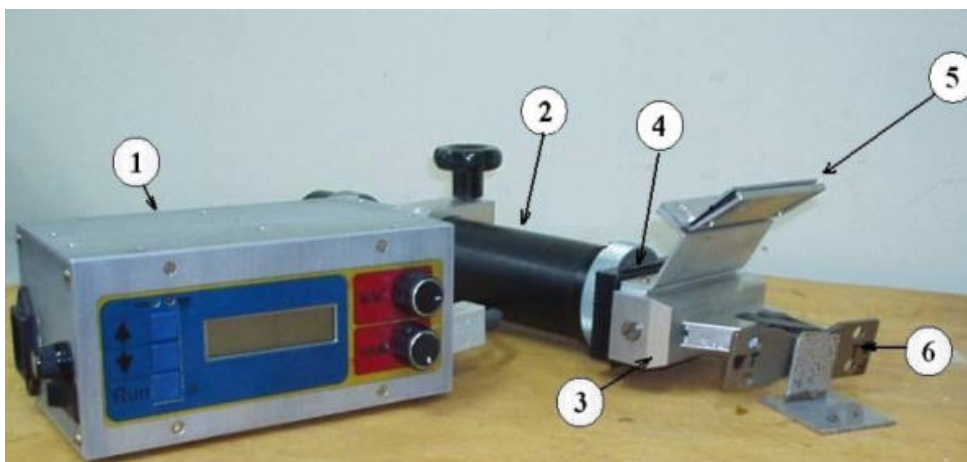


Figura 2 – Equipamento portátil para medição de tensões:

- 1- unidade de controle, 2- fonte de alta tensão; 3- colimador; 4- tubo de raios-X;
5- porta-filme (cassete); 6- amostra analisada.

Ensaio de tração foram realizados, para verificação da influência do tratamento de *shot peening* nas propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex, com taxa de deformação de 10^{-3} s^{-1} , em amostras nas condições como-recebida e naquelas que receberam tratamento de *shot peening* com intensidade Almen de 0,39. Os corpos-de-prova foram confeccionados segundo a norma ASTM A370.

Os ensaios de fadiga foram executados em uma máquina de ensaios por flexão alternada, à temperatura ambiente, sob amplitude de carga constante e carregamento senoidal de 60Hz e razão de carga $R = -1$. Corpos de prova polidos e nas duas intensidades de *shot-peening* (0.25A e 0.39A) foram ensaiados e curvas S-N foram plotadas para cada uma dessas condições.

Foram realizadas medições de tensões residuais na direção longitudinal (L) e transversal (T) do corpo-de-prova. As tensões residuais foram medidas na superfície e também através da espessura. Para esta finalidade, foram executados polimentos eletrolíticos em cada amostra e medidas as tensões residuais a cada polimento nas duas fases do aço (austenita e ferrita), até a profundidade de 0,45 mm.

Análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram feitas nas superfícies transversais das amostras fraturadas em fadiga de médio e alto ciclo. Também foram observadas amostras não fraturadas, nas duas intensidades de *shot peening* (0,39A e 0,25A), sem fadiga.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em três partes. Na primeira parte, o objetivo principal foi o de estudar o efeito das duas diferentes intensidades de *shot peening* nas propriedades mecânicas, principalmente na resistência à fadiga do aço inoxidável duplex UNS S 31803. Na segunda, foram também avaliadas como as tensões residuais compressivas, oriundas do processo de *shot peening*, se comportaram após carregamento cíclico de 10^6 e 10^7 ciclos, em ambas as fases presentes no aço, austenita e ferrita, nas direções longitudinal e transversal. Na terceira etapa, foi analisada a eficácia do processo de *shot peening* na recuperação da vida em fadiga, correlacionado com os pontos de iniciação de trincas, após *shot peening* e após *shot peening* e carga cíclica de até 10^6 e 10^7 ciclos. A tabela 2 apresenta os valores obtidos de limite de escoamento, limite de resistência e

alongamento percentual nas amostras na condição como-recebido e com intensidade de *shot peening* de 0,39A.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço antes e após *shot peening*.

Condição do material	σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	ϵ (%)
Como-recebido	505	530	35,3
Tratado com <i>shot peening</i> 0,39	758	784	24

A figura 4 mostra que os valores de limite de escoamento e limite de resistência aumentam com o tratamento de *shot peening* e que o alongamento diminui. Este comportamento é devido, principalmente, ao encruamento da superfície das amostras provocado pelo tratamento.

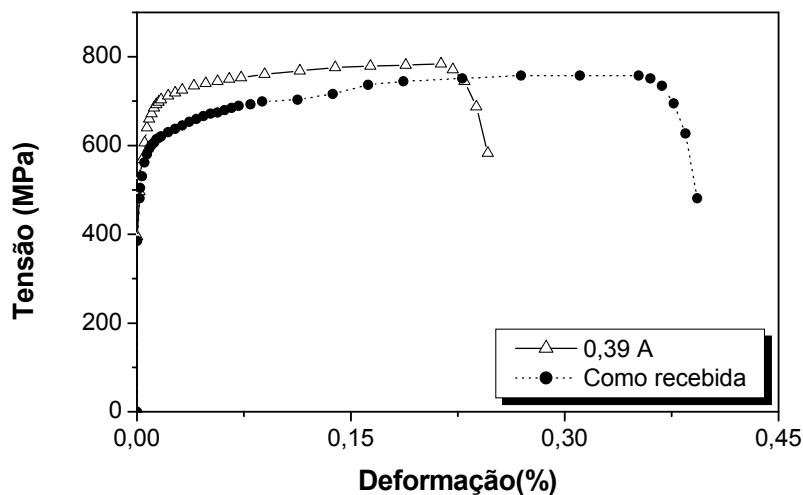


Figura 4 – Curva tensão vs deformação das amostras como-recebida e com *shot peening* de intensidade 0,39 Almen.

A figura 5 apresenta a curva S x N obtida das amostras na condição como-recebida e tratadas com *shot peening* nas intensidades de 0,25 e 0,39 Almen (A).

Pode ser observado que o tratamento de *shot peening* aumentou a vida em fadiga nos regimes de baixo e médio ciclos nas duas condições de *shot peening* (0,39A e 0,25A). Entretanto, para o regime de alto ciclo, as amostras que receberam a menor intensidade de *shot peening* tiveram a sua vida em fadiga diminuída em relação às amostras como-recebidas. Este comportamento pode estar ligado ao fato de que as amostras que receberam menor intensidade de *shot peening* induziram

tensões residuais compressivas totais máximas principalmente na superfície, nas duas fases, conforme pode ser observado nas figuras 6 e 7.

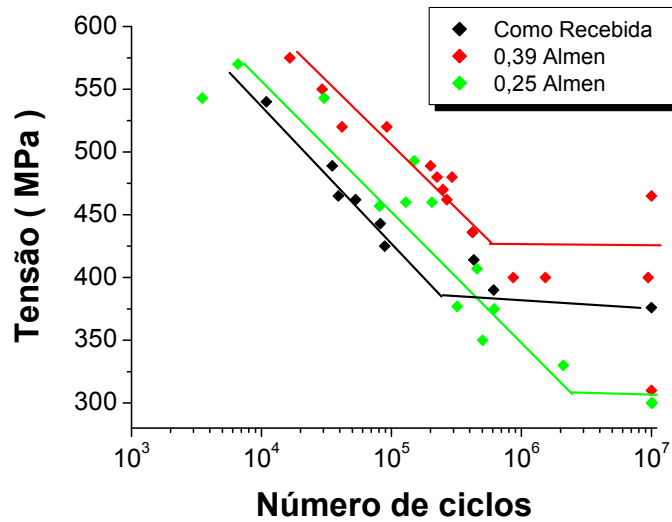


Figura 5 – Curva comparativa S-N do aço duplex como-recebido e com *shot peening* de 0,25A e 0,39A.

As figuras 6 e 7 apresentam um perfil em profundidade das tensões residuais compressivas totais (TRCT) para as duas condições de *shot peening* utilizadas, nas direções longitudinal e transversal do corpo-de-prova, nas duas fases, austenita e ferrita, antes da fadiga.

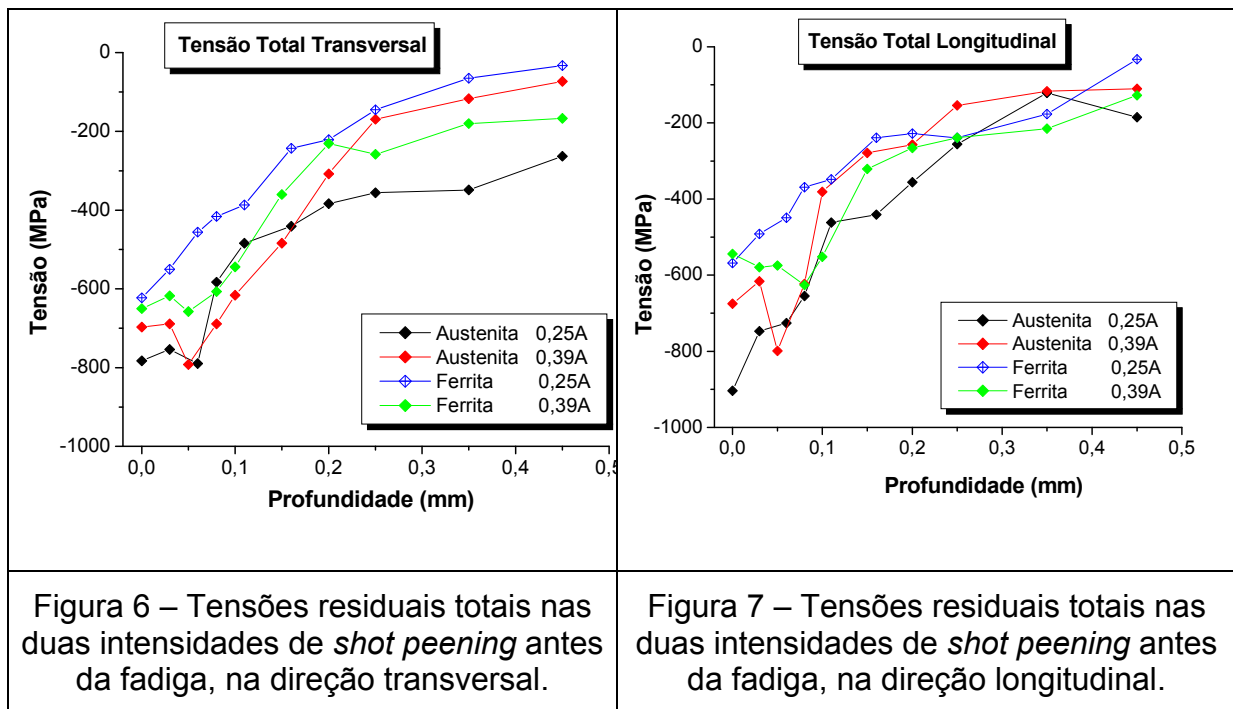


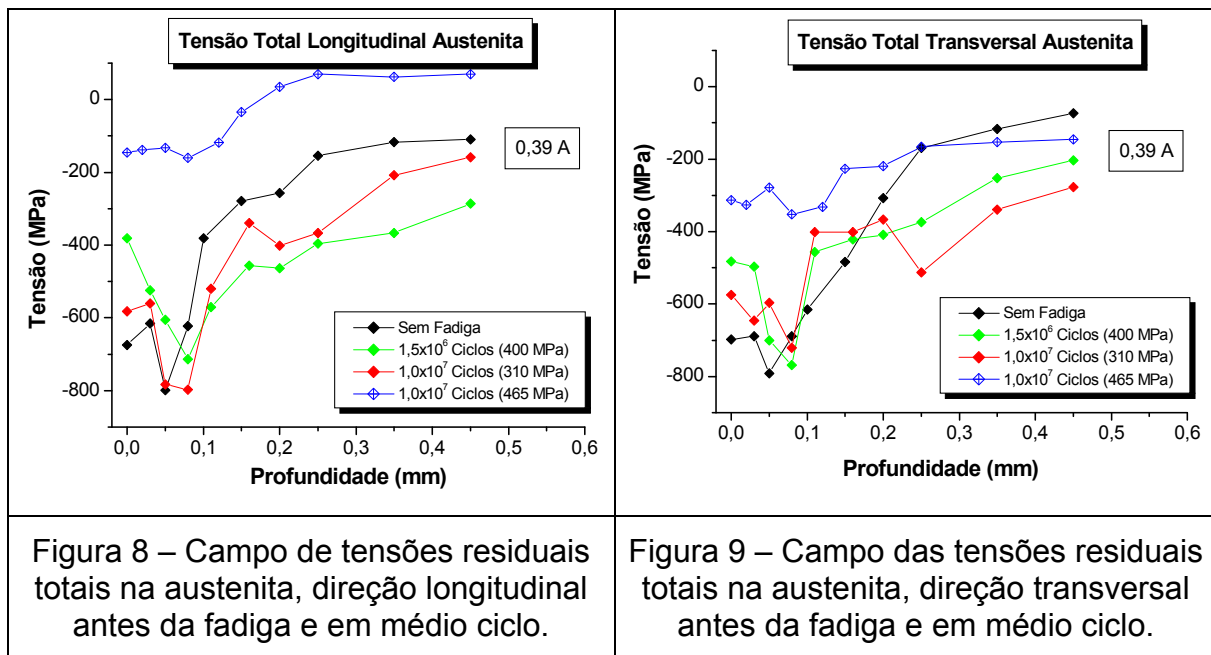
Figura 6 – Tensões residuais totais nas duas intensidades de *shot peening* antes da fadiga, na direção transversal.

Figura 7 – Tensões residuais totais nas duas intensidades de *shot peening* antes da fadiga, na direção longitudinal.

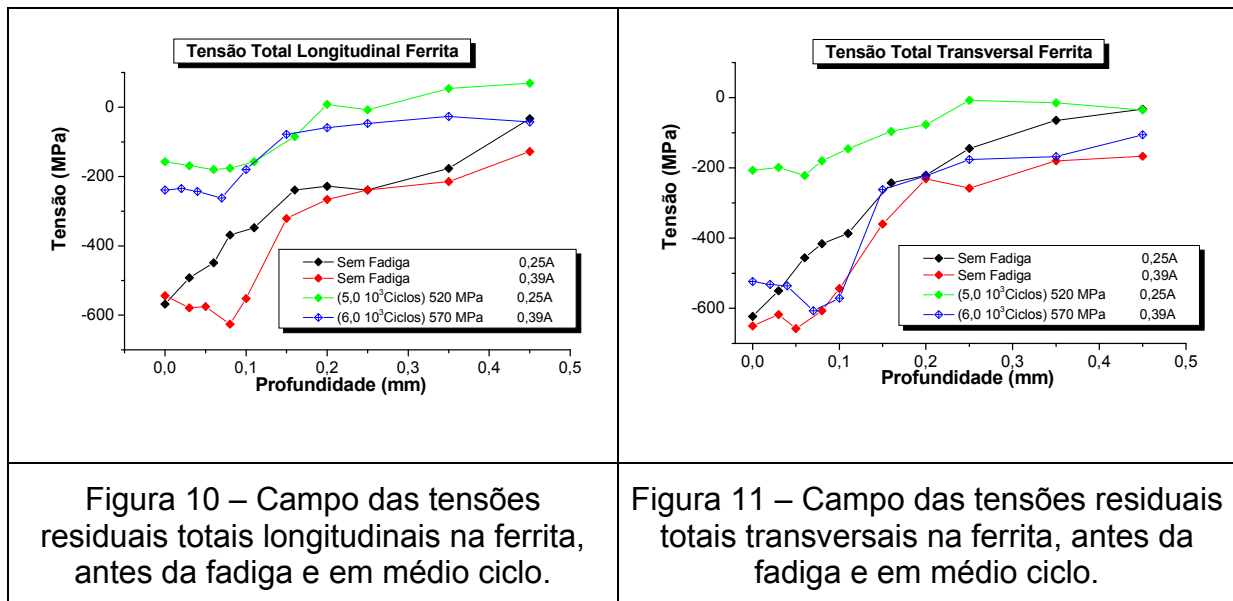
Outro ponto que merece ser discutido, como provável explicação para os resultados de fadiga da figura 5, envolve o maior endurecimento da fase austenítica, comparativamente à fase ferrítica, tanto em carregamento monotônico quanto em fadiga^(7,8). Com efeito, o valor do limite de resistência de 758MPa para amostras após *shot peening* de 0,39A e de 505MPa do material como-recebido, já evidencia este fato, particularmente para o carregamento monotônico, e para as amostras como um todo.

A suposição é que este encruamento da austenita, ocorrendo em fadiga de baixo ciclo, contribua e explique o melhor desempenho das amostras com *shot peening* elevado, pois os níveis de carregamento são altos. Para as amostras de *shot peening* baixo, este endurecimento monotônico seria baixo, e em fadiga, face ao carregamento igualmente baixo, a vida em fadiga seria menor, pois essas amostras não estariam sendo beneficiadas pelo encruamento da austenita, verificado para as amostras com maior intensidade de *shot peening*.

As figuras 8 e 9 mostram os CTTRC da austenita, nas amostras com a maior intensidade de shot peening (0,39A), em regime de alto ciclo. Pode ser observado na direção longitudinal que a amostra sujeita a maior carga cíclica e maior número de ciclos, foi a única que apresentou relaxação do CTTRC. As outras duas amostras, sujeitas a cargas cíclicas menores, apresentaram apenas alívio TTRC na superfície e próximo a ela, até a profundidade de 0,08mm aproximadamente.



As figuras 10 e 11 mostram que os CTRCT da ferrita nas amostras com a menor intensidade de *shot peening* (0,25A) em regime de baixo ciclo, sofreram relaxação, tanto na direção longitudinal como transversal. Entretanto para as amostras com a maior intensidade de *shot peening* (0,39A), ocorreu tão somente relaxação do CTRCT na direção longitudinal, enquanto que na direção transversal apenas o alívio da tensão residual compressiva total na superfície e próxima a ela, até a profundidade de 0,08 mm.



Analisando as figuras 8 a 11 é possível verificar que o CTRCT é mais estável para a maior intensidade de *shot peening* (0,39A). Este comportamento é justificado, já que uma maior energia é exigida para indução do CTRCT nesta intensidade, logo também será necessária uma maior energia para a remoção deste campo de tensões originalmente criado pelo jateamento.

Assim sendo, é esperado que uma menor energia deva ser usada para remover o CTRCT para a menor intensidade de *shot peening* (0,25A).

A austenita apresentou um CTRCT mais estável, ou seja, somente foi observado alívio de tensões residuais compressivas totais (TRCT) na superfície e abaixo dela até a profundidade de 0,08 mm, principalmente na direção longitudinal, que coincide com a direção de carregamento cíclico. Este comportamento pode ser atribuído ao endurecimento mais fácil da fase austenítica do que da fase ferrítica devido ao carregamento cíclico maior ou igual ao limite de escoamento do material.

Foram realizadas observações com microscópio eletrônico de varredura, (MEV), com ataque, em amostras ensaiadas após *shot peening* nas duas condições. Estas observações mostram que o processo de *shot peening* introduz microtrincas dentro da fase ferrítica próximo à superfície das amostras e que este efeito é mais pronunciado no *shot peening* de 0,39A (figuras 8 e 9). Contudo nas amostras com menor intensidade de *shot peening* (0,25A) microtrincas foram também observadas em algumas amostras, porém em menor escala (figuras 10 e 11).

As figuras 12 a 15 mostram a superfície das amostras na direção transversal, no meio do seu comprimento, após a aplicação de *shot peening*, no local onde foram realizadas as medições de tensões residuais e a maior carga cíclica aplicada.

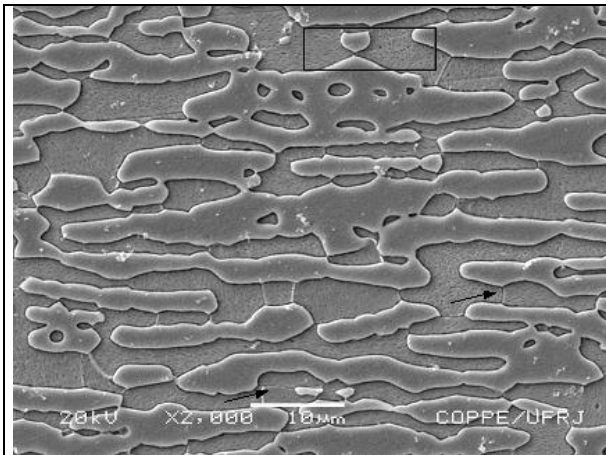


Figura 12 – MEV. Microtrincas dentro da ferrita na superfície transversal após *shot peening* de 0,39A.

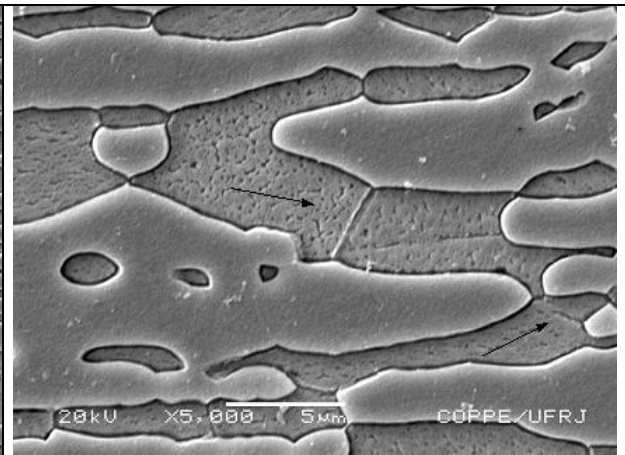


Figura 13 – MEV. Microtrincas dentro da ferrita na superfície transversal após *shot peening* de 0,39A.

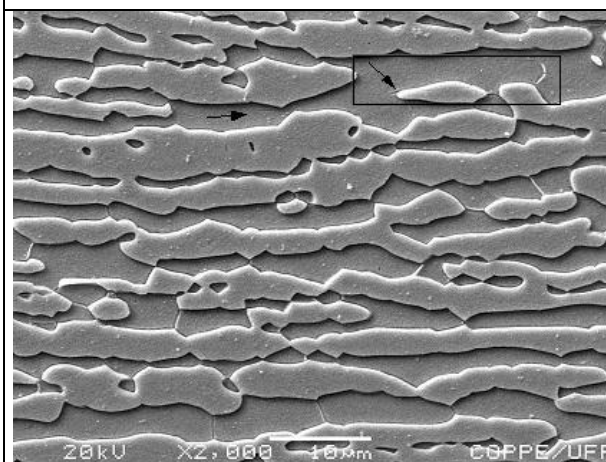


Figura 14 – MEV. Microtrincas dentro da ferrita na superfície transversal após *shot peening* de 0,25A.

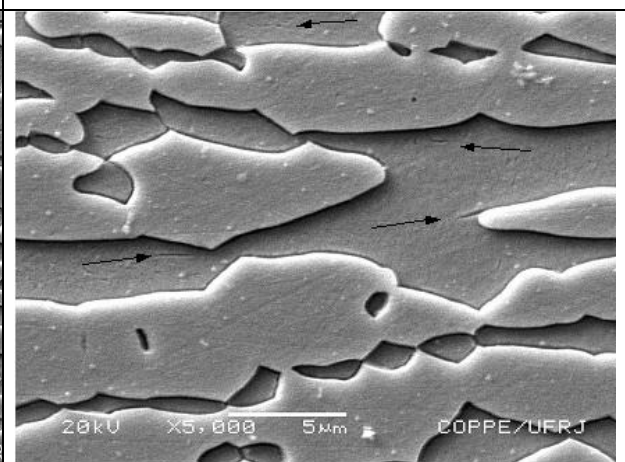


Figura 15 – MEV. Microtrincas dentro da ferrita na superfície transversal após *shot peening* de 0,25A

As microtrincas encontradas após *shot peening* são em sua grande maioria da ordem de 0,5mm. Entretanto, foram também observadas dentro da fase ferrítica, microtrincas da ordem de 1,5mm de comprimento em quantidades bem menores. Na fase austenítica não foram observadas microtrincas em nenhuma das amostras.

CONCLUSÕES

No estudo da variação das tensões residuais induzidas pelo *shot peening* na vida em fadiga do aço inoxidável duplex, pode-se concluir que:

- 1) Em todo regime cíclico estudado ocorreu relaxação do CTTRC nas direções longitudinal e transversal, nas duas fases presentes no aço inoxidável duplex. Entretanto, este alívio do CTTRC foi mais pronunciado na direção longitudinal, o que deve estar relacionado ao fato do carregamento cíclico ter sido aplicado nesta direção.
- 2) O shot peening mais intenso empregado (0,39A) foi o que conduziu ao melhor resultado em fadiga.
- 3) As amostras que tiveram as tensões residuais compressivas máximas abaixo da superfície foram as que apresentaram melhor resultado em fadiga.
- 4) O processo de shot peening induziu a formação de microtrincas apenas na fase ferrítica.
- 5) As maiores variações nos campos das tensões totais residuais compressivas ocorreram dentro da fase ferrítica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento CNPq, CAPES e FAPERJ pelo apoio concedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MACHERAUCH, E., KLOOS, K. H., "Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress in Science and Technology", Ed. By E. Macherauch, V. Hauk, **DGM VERLAG**, 1987.

2. LINDGREN, M., LEPISTO, T., Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel, **NDT&E International**, 36, 2003, pp. 279-288.
3. JOHANSSON J., ODÉN M., et al “Evolution of Residual Stress State in a Duplex Stainless Steel During Loading”, **Acta Materialia**, pp 2669-2684, vol 47, 1999.
4. ALMER, J.D., COHEN, J.B., WINHOLTZ, R. A “The Effects of Residual Macro stresses and Micro stresses on the Fatigue Crack Propagation”, **Metallurgical and Materials Transactions A**, pp 2127-2136, Aug. 1998.
5. ALMER, J.D., COHEN, J.B., MORAN, B. “The Effects of Residual Macro stresses and Micro stresses on the Fatigue Crack Initiation”, **Materials Science and Engineering A**, pp 268-279, vol 284, 2000.
6. BENNING.O.I. “Non-destructive determination of load and residual stresses by the X-ray stress method”, **The Rigaku Journal**, vol 6, nº 2, pp 15-20, 1989.
7. CHAI G, “Fatigue behaviour of duplex stainless steels in the very high cycle regime”, **International Journal of Fatigue**, vol 28, pp 1611-1617, 2006.
8. INAL K, GERGAUD P, FRANÇOIS M, “X-ray diffraction methodologies of macro and pseudo-macro stress analysis in a texture duplex stainless steel”, **Scandinavian Journal of Metallurgy**, pp 139-150, vol 28, 1999.

EFFECT OF SHOT PEENING TREATMENT IN THE BEHAVIOR OF RESIDUAL STRESS IN DUPLEX STAINLESS STEEL DURING MEDIUM CYCLE FATIGUE

Peter D. S. Pedrosa¹, João Marcos A. Rebello¹, Maria P. Cindra Fonseca²

The lifetime of duplex stainless steel parts experiencing cyclic fatigue is directly influenced by the residual stresses present in the ferrite and austenite phases. The motivation for this work was to analyze the behaviour of the residual stresses fields introduced by shot peening treatment in both phases, in the sample surface as in the subsurface layers, in low fatigue cycles, using the X-rays diffraction technique. The results shows that the compressive residual stresses introduced by the shot peening treatment in both phases improved fatigue life of the material. However, the cyclical loads produce partial or total relief in these residual stresses fields. It was verified that the shot peening process induced the formation of microcracks only in the ferrite phase. The largest variations in the total compressive residual stresses fields also occurred in this phase. The samples surfaces were analyzed by scanning electron microscopy (SEM).

Key words: residual stresses, duplex steel, fatigue, X-ray diffraction technique