

ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS EM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX ¹

Isabel Neves Souza²
Joel Regueira Teodósio³
Tetyana Gurova⁴

Resumo

O trabalho a ser apresentado tem como objetivo analisar o aço inoxidável duplex, UNS S31803, estudando a variação do estado de tensões residuais introduzido por *shot peening* durante deformação plástica por tração uniaxial. As tensões residuais foram analisadas em três corpos de prova nos sentidos longitudinal e transversal, nas duas faces dos mesmos, durante o ensaio de tração, e medidas ao longo do ensaio, em deformações plásticas variando de 0% até 19%. Concluiu-se que, para o aço analisado, com uma deformação inicial de 3%, as tensões residuais longitudinais ao eixo de tração, são revertidas de compressivas para trativas, e mantêm-se num acréscimo praticamente até a ruptura, já nas tensões residuais transversais houve variações das tensões residuais de acordo com o corpo de prova trabalhado. O fato pode ser observado tanto na fase austenítica quanto na fase ferrítica.

Palavras-chave: Tensão residual; Shot peening; Deformação plástica; Aço inoxidável duplex.

¹ Contribuição técnica apresentada no 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais;

³ Pós-Doutorado em Engenharia Metalúrgica;

⁴ Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

INTRODUÇÃO

O aço inoxidável duplex possui uma estrutura dupla de austenita e ferrita, combinando geralmente as melhores características de cada fase dos aços inoxidáveis austeníticos e dos ferríticos. Um material bifásico como o aço inoxidável duplex apresenta em cada fase do material uma resposta diferente à tensão aplicada. Um grande número de propriedades mecânicas e físicas do aço inoxidável duplex, como a tração, fadiga, a dureza e a resistência à corrosão, já foram investigadas extensivamente. Entretanto, a informação disponível no estado individual das fases no aço inoxidável duplex é relativamente limitada. Neste trabalho foi realizado uma análise experimental da evolução do estado de tensões residuais no aço inoxidável duplex durante o processo de deformação plástica por a tração uniaxial. O estado inicial de tensões residuais é compressivo e foi introduzido por shot peening.

MATERIAL E MÉTODOS

Material

Os corpos de provas utilizados foram analisados quimicamente e tiveram como resultado de classificação UNS S31803 (no Sistema de Numeração Uniforme), aço inoxidável duplex com a seguinte composição: 0,020% C, 5,44% Ni, 2,49% Mo, 0,16% N, 22,3% Cr, entre outros elementos não tão significativos para a pesquisa.

Métodos

– Processo de *shot peening*

Os corpos de prova 1D, 2D e 3D foram submetidos ao processo de *shot peening*, com o objetivo de obter tensões residuais compressivas mais uniformes na superfície do corpo de prova, já que previamente existiam tensões compressivas provenientes da usinagem.

Os parâmetros de *shot peening*, utilizado para os três corpos de prova, estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de *shot peening* utilizados nos corpos de prova 1D, 2D e 3D.

| Parâmetros do Processo | Dados |
|----------------------------|-----------------|
| Material de jato | granalha de aço |
| Granulometria | S 230 |
| Pressão do ar comprimido | 80 psi |
| Pistola / Bico Modelo | 01011 |
| Bico ejetor | Nº5 |
| Bico injetor | S132 |
| Ajuste da válvula de fluxo | 100% |

– Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados em Máquina INSTRON do PEMM/COPPE. Os três corpos de prova tiveram estado inicial de tensão residual com tratamento de *shot peening*, que introduziu as tensões residuais de compressão. Nos corpos de prova de tração as tensões residuais foram medidas no centro do corpo de prova, nas direções longitudinal e transversal, frente e verso. Ao total foram realizadas oito medições em cada vez que a peça foi tracionada, sendo 4 medições na austenita e

4 medições na ferrita. Podendo-se totalizar aproximadamente ao decorrer de todo experimento 260 medições, nos quatro corpos de prova. Os corpos de prova possuíam as dimensões segundo norma ASTM E8-81 com espessura de 3,0 mm.

Com as tensões residuais em equilíbrio, são possíveis dois tipos gerais de distribuição do estado de tensões. No primeiro tipo, as tensões residuais são compressivas na superfície e trativas no interior. No segundo, o material apresenta tensões residuais trativas na superfície e compressivas no interior.

Ao se realizar o ensaio de tração uniaxial, as regiões com tensão residual trativa, atingem a deformação plástica com tensão aplicada menor que o limite de escoamento, e o inverso ocorre nas regiões que apresentam tensões residuais compressivas.

Gurova (1) analisou a evolução de tensões residuais compressivas, introduzidas por *shot peening* em aço contendo 5,0%Cr e 0,5%Mo, durante deformação plástica por tração uniaxial. Os principais resultados mostraram que, já no início do processo de deformação plástica, as tensões residuais longitudinais ao eixo de tração são revertidas de compressivas para trativas, e no trabalho (2) foi apresentado o modelo mecânico-matemático explicativo deste comportamento.

O aço inoxidável dúplex possui uma microestrutura austeno-ferrítica que é heterogênea, isto é, cada fase do material pode ter diferentes propriedades mecânicas e físicas, por exemplo, ter comportamento diferente durante a deformação. As tensões iniciais podem crescer ou diminuir durante a deformação, dependendo da reação elástica ou plástica das fases individuais. Por isso, é importante estudar as tensões residuais iniciais em cada fase do material e a sua variação durante a deformação plástica.

– Medições das Tensões Residuais

Foi desenvolvido por Lebrun um método automático de medição das tensões utilizando microcomputador (3). O filme desloca-se através de um microdensitômetro (Figura 1), e obtém-se o traçado dos perfis experimentais dos dois feixes difratados. Em seguida, curvas teóricas são adaptadas aos perfis experimentais e determinados os valores L_1 e L_2 , referentes aos dois perfis experimentais de feixes difratados (Figuras 2 e 3). Com esses valores de L_1 e L_2 , calcula-se a tensão. Tudo isso permite uma rápida interpretação do filme de raios-X.

Na Figura 05 é representado um esquema para mostrar a diferença dos ângulos de difração para ferrita e austenita.



Figura 1. Microdensitômetro

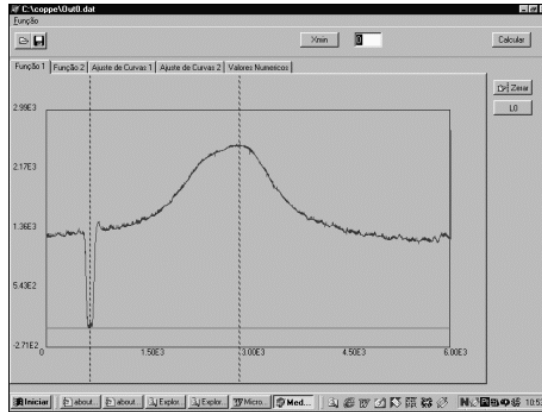


Figura 2. Determinação do máximo (L_0) da raia de 0° para cálculo do valor de tensão.

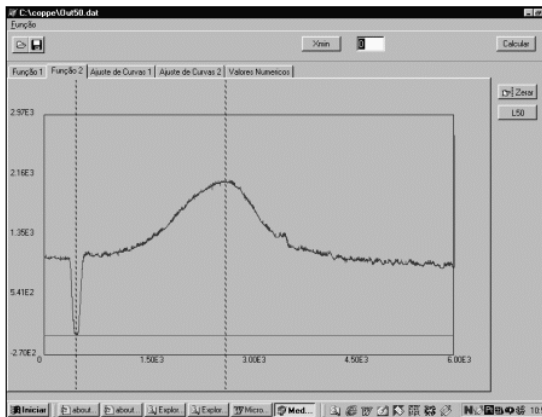


Figura 3. Determinação do máximo (L_{50}) da raia de 50° para cálculo do valor de tensão.

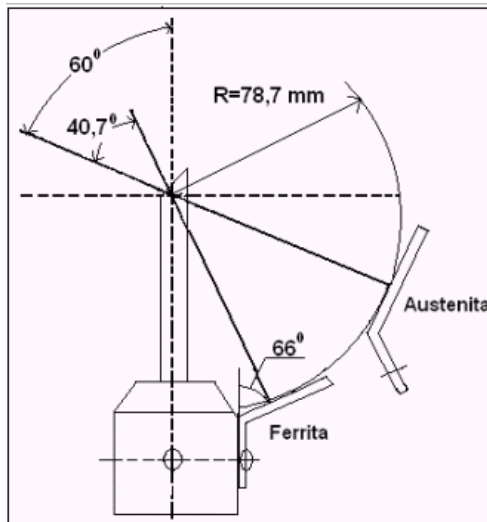


Figura 4. Esquema do colimador para a medição da austenita e da ferrita.

Para concluir, será mostrado o cálculo dos ângulos desenvolvidos para a ferrita e austenita, tendo como dados base:

$a = 3,571$, tamanho de célula unitária, de um cristal cúbico (4),

$\lambda = 2,291$, comprimento de onda incidente, e (220) sendo o plano da austenita e (211) o plano da ferrita.

E utilizando-se da equação (01)

$$\sin^2 \theta = \left(\frac{\lambda^2}{4.a^2} \right) (h^2 + k^2 + l^2) \quad (01)$$

Fazendo as substituições necessárias para a austenita e posteriormente para a ferrita

$$\sin^2 \theta = \left(\frac{2,291^2}{4.3,571^2} \right) (2^2 + 2^2 + 0^2), \text{ para austenita e,}$$

$$\sin^2 \theta = \left(\frac{2,291^2}{4.3,571^2} \right) (2^2 + 1^2 + 1^2), \text{ para a ferrita,}$$

chega-se aos seguintes ângulos:

$$\theta = 65,1^\circ \text{ para a austenita}$$

$$\theta = 78,1^\circ \text{ para a ferrita.}$$

RESULTADOS

– Tensões Residuais Após o Processo de *Shot Peening*

Os resultados das tensões residuais superficiais na austenita e ferrita após o *shot peening* estão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Resultados das tensões residuais superficiais após tratamento de *shot peening* nos três corpos de prova para austenita.

| Corpo de Prova | Face | Direção | Tensão (MPa) |
|----------------|--------|--------------|--------------|
| 1D | Frente | Longitudinal | -475 |
| | | Transversal | -259 |
| | Verso | Longitudinal | -396 |
| | | Transversal | -302 |
| 2D | Frente | Longitudinal | -302 |
| | | Transversal | -430 |
| | Verso | Longitudinal | -410 |
| | | Transversal | -367 |
| 3D | Frente | Longitudinal | -389 |
| | | Transversal | -410 |
| | Verso | Longitudinal | -353 |
| | | Transversal | -324 |

Tabela 3. Resultados das tensões residuais superficiais após tratamento de *shot peening* nos três corpos de prova para ferrita.

| Corpo de Prova | Face | Direção | Tensão (MPa) |
|----------------|--------|--------------|--------------|
| 1D | Frente | Longitudinal | -495 |
| | | Transversal | -478 |
| | Verso | Longitudinal | -439 |
| | | Transversal | -478 |
| 2D | Frente | Longitudinal | -470 |
| | | Transversal | -531 |
| | Verso | Longitudinal | -396 |
| | | Transversal | -439 |
| 3D | Frente | Longitudinal | -472 |
| | | Transversal | -580 |
| | Verso | Longitudinal | -545 |
| | | Transversal | -630 |

Tabela 4. Resultado das variações das tensões iniciais em comparação as tensões introduzidas com o processo de *shot peening*.

| Microestrutura | Direção | Tensão média inicial | Tensão média com <i>shot peening</i> | Variação Percentual |
|----------------|--------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Austenita | Longitudinal | -276 | -387 | 40,22% |
| | Transversal | -279 | -348 | 24,73% |
| Ferrita | Longitudinal | -322 | -469 | 42,70% |
| | Transversal | -428 | -522 | 22,10% |

- Tensões Residuais Longitudinais e Transversais para a Austenita

As curvas das Figuras 5, 6, 7 mostram os resultados experimentais obtidos para os corpos de prova 1D, 2D e 3D, durante deformação plástica por tração uniaxial, sendo a Figura 8 um detalhamento das curvas do corpo de prova 3D.

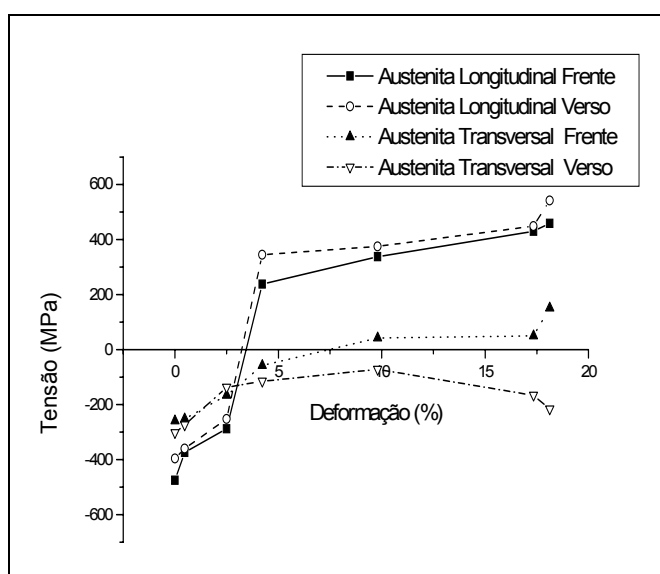


Figura 5. Variação das tensões residuais com deformação plástica no corpo de prova 1D na austenita.

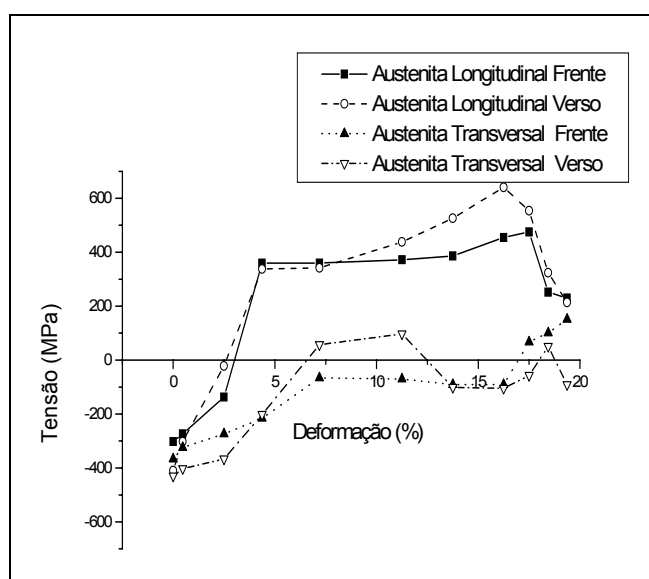


Figura 6. Variação das tensões residuais com deformação plástica no corpo de prova 2D na austenita.

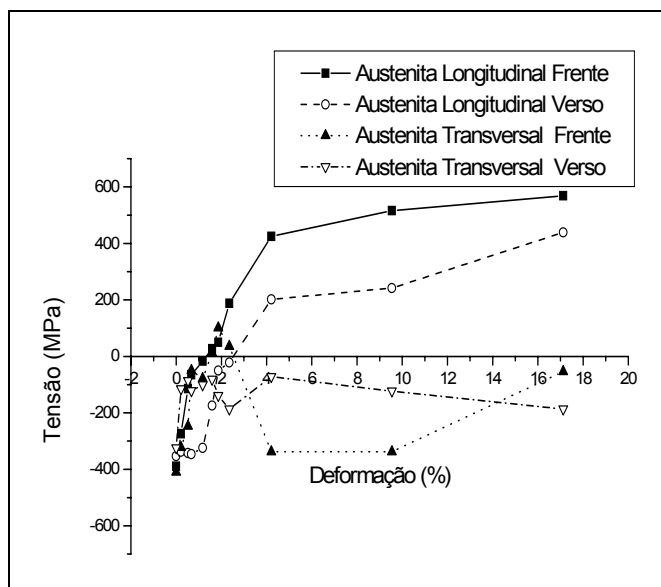


Figura 7. Variação das tensões residuais com deformação plástica no corpo de prova 3D na austenita

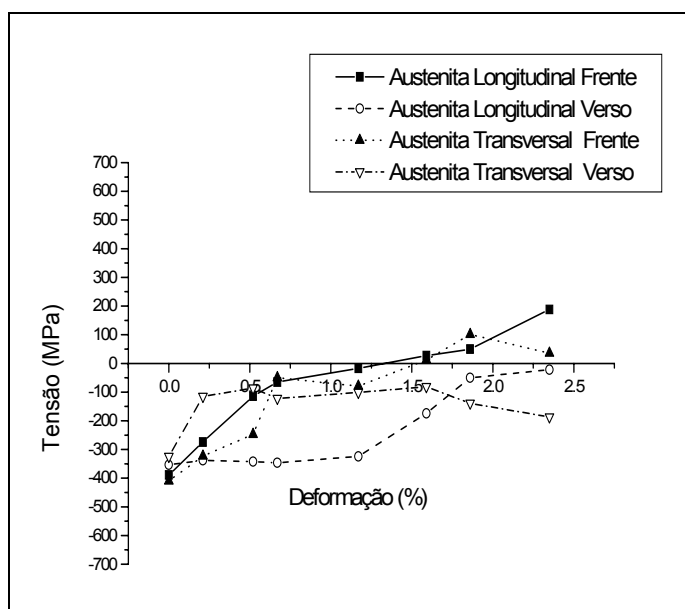


Figura 8. Variação das tensões residuais com deformação plástica no corpo de prova 3D na austenita, detalhamento na deformação inicial.

- Tensões Residuais Longitudinais e Transversais para a Ferrita

As curvas nas Figuras 9, 10 e 11, mostram os resultados experimentais obtidos para os corpos de prova 1D, 2D e 3D, respectivamente para a fase ferrítica, sendo a Figura 12 um detalhamento das curvas do corpo de prova 3D.

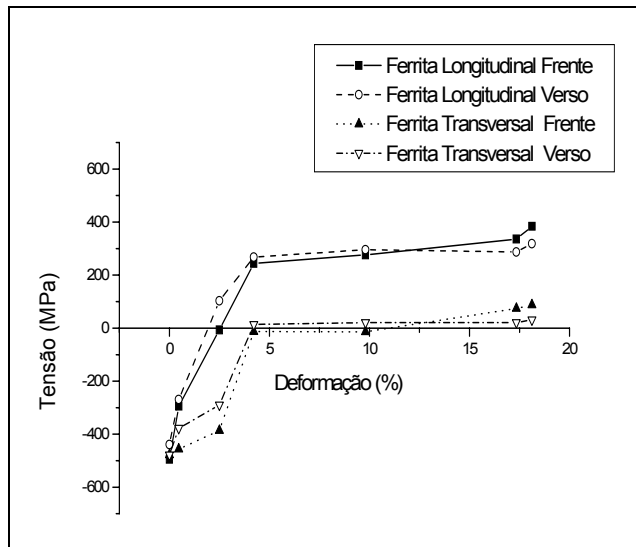


Figura 9. Variação das tensões residuais com deformação plástica no corpo de prova 1D na ferrita.

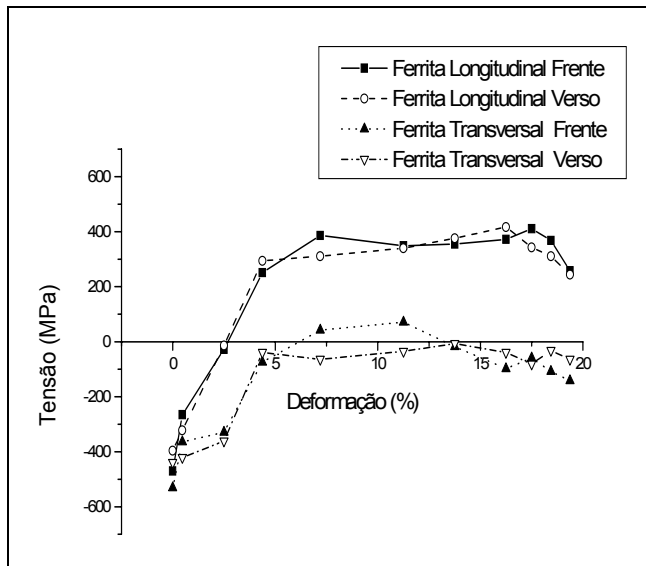


Figura 10. Variação das tensões residuais com deformação plástica no corpo de prova 2D na ferrita.

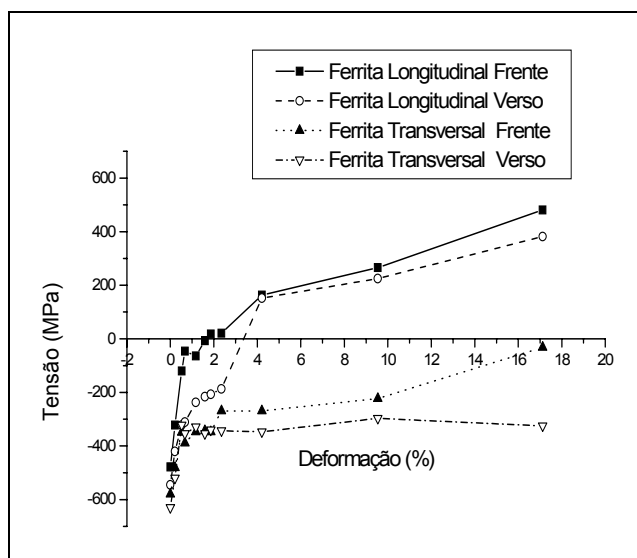


Figura 11. Variação das tensões residuais com deformação plástica no corpo de prova 3D na ferrita.

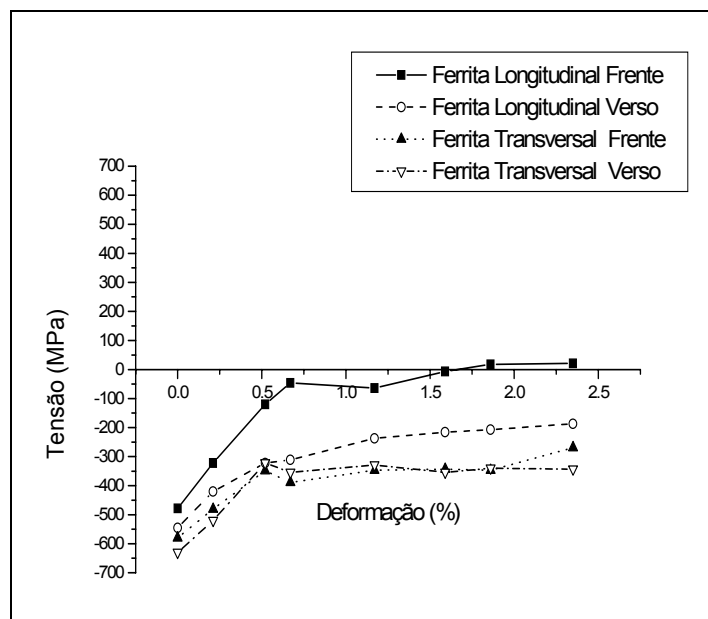


Figura 12. Variação das tensões residuais com deformação plástica no corpo de prova 3D na ferrita, detalhamento na deformação inicial.

DISCUSSÕES

– Tensões Residuais Após o Processo de *Shot Peening*

As Tabelas 2 e 3 indicam que:

- Após *shot peening*, as tensões residuais superficiais compressivas na ferrita, são em geral mais elevadas que na austenita;
- As tensões residuais superficiais compressivas, após *shot peening*, são mais elevadas na austenita, do que estas tensões no corpo de prova que apenas foi usinado (comparação nas Tabelas 2 e 3);
- Após *shot peening* as tensões residuais superficiais, tanto na ferrita como na austenita, não são uniformes nas duas faces dos corpos de prova e nas direções longitudinal e transversal. Por outro lado, também não são uniformes entre os três corpos de provas. Cabe salientar que para aços monofásicos, estas tensões são uniformes nas suas faces e nas suas direções no centro dos corpos de prova. (1).

A partir dos resultados da Tabela 4 podemos concluir que a variação percentual é significativa e coerente para os corpos de prova estudados, sendo de aproximadamente 40% na direção longitudinal e em torno de 23% na direção transversal, tanto para a fase austenítica quanto para a fase ferrítica.

- Tensões Residuais Longitudinais e Transversais para a Austenita

Diferentes níveis de tensão nos três corpos de prova de tração, são atribuídos a não uniformidade de distribuição das tensões residuais superficiais conseqüentes do processo de usinagem, como também ao processo de *shot peening*. Pois, após o tratamento realizado as peças retornaram deformadas (em forma de arco) em diferentes proporções, chegando a uma variação de 1,9 mm. Os arcos formados foram de 4,15 mm (corpo de prova 2D), 4,35 mm (corpo de prova 1D) e 6,05 mm (corpo de prova 3D), incluindo a espessura de 3 mm dos corpos de prova.

Na direção longitudinal, nos dois corpos de prova e em ambas as faces, frente e verso, a evolução das tensões residuais compressivas foi rápida para aproximadamente 3% de deformação plástica, onde as tensões iniciais compressivas tornaram-se nulas. Porém, nas Figuras 7 e 8 (detalhe), podemos

observar este comportamento a partir de 1% de deformação plástica para corpo de prova 3D. Pode-se observar fato similar na pesquisa no aço austenítico desenvolvida por Souza Junior (5), onde a evolução das tensões compressivas ocorreu em torno de 1,6% de deformação plástica.

A seguir com cerca de 4% de deformação plástica estas tensões passam a ser trativas, na ordem de +250MPa a +400 MPa, onde em Souza (5) a ordem foi de +600MPa a +700MPa, alcançando um máximo de +856MPa.

Nos corpos de prova 1D e 3D, as tensões residuais longitudinais trativas mantêm um crescimento até +500 MPa, onde ocorre a ruptura dos corpos de prova. No corpo de prova 2D, as tensões residuais também mantiveram um crescimento até atingir o limite de escoamento da peça, em torno de +500 MPa, mas logo após houve um decréscimo das tensões na peça.

As Figuras 5, 6 e 7 também indicam três tipos de ocorrências nas tensões residuais transversais. No verso dos corpos de prova 1D e 3D, as tensões residuais permanecem compressivas até sua ruptura. Nos corpos de prova 1D e 2D, frente, as tensões residuais passam a ser trativas com valor de tensão aproximada de +100MPa. E por último, os corpos de prova 2D e 3D apresentaram oscilações entre as tensões compressivas e trativas, verso e frente respectivamente. Geralmente estas oscilações ocorreram para mesmos valores da deformação plástica onde ocorreu inversão das tensões compressivas para trativas no sentido longitudinal e próximo da ruptura.

Comparando os resultados com Souza (5), pode-se observar que o aço inoxidável duplex teve um comportamento inicial similar, porém a inversão ocorreu com maior valor da deformação plástica (em torno de 5% a mais). Citando-se que Souza (5) trabalhou somente na direção longitudinal e a maior oscilação entre as tensões trativas e compressivas no aço inoxidável duplex ocorreram no sentido transversal. Estas diferenças observadas podem ser justificadas pelo fato de o aço de Souza (5) ser somente austenítico com limite de escoamento de 360MPa e o aqui analisado ser austenítico e ferrítico com o limite de escoamento de 420MPa

- Tensões Residuais Longitudinais e Transversais para a Ferrita

Na direção longitudinal, nos três corpos de prova, Figuras 9, 10 e 11, em ambas as faces, frente e verso, a evolução das tensões residuais iniciais compressivas ocorreu rapidamente. Com aproximadamente 2,5% de deformação plástica, as tensões iniciais compressivas tornaram-se nulas. Em Gurova (1), para aço ferrítico, o mesmo ocorreu com apenas 0,5% de deformação plástica. A seguir, com uma deformação plástica em torno de 4%, estas tensões passaram a ser trativas, de aproximadamente +200MPa, em Gurova (1) a tensão de +110MPa passou a ser trativa entre 1% a 4% de deformação plástica. Logo após as tensões residuais longitudinais trativas nos corpos de prova 1D e 3D permanecem aproximadamente constantes até a ruptura, com valores próximos entre si, nas duas faces. Porém, deve-se observar um pequeno decréscimo das tensões no corpo de prova 2D, possivelmente ocasionado pelo maior número de tracionamentos no intervalo entre 15% e 20% da deformação plástica. Podendo-se concluir que a variação dos estados de tensões, com deformação plástica por tração uniaxial é reproduzível na direção longitudinal, como em Gurova (1).

Na direção transversal, as Figuras 9, 10 e 11, que representam os corpos de prova 1D, 2D e 3D, respectivamente, em ambas as faces, frente e verso, a evolução das tensões residuais transversais indicam ocorrências diferentes em cada corpo de

prova. No corpo de prova 1D nas duas faces, frente e verso, houve um crescimento constante das tensões, terminando com tensão residual trativa em torno de +80MPa. No corpo de prova 2D ocorreram pequenas oscilações entre as tensões residuais trativas e compressivas, mas na fase final perdurou a tensão residual compressiva em torno de -150MPa. Já no corpo de prova 3D ocorreu uma estabilidade de tensão residual compressiva durante a deformação plástica até sua ruptura. Geralmente estas variações ocorreram nos mesmos pontos, ou logo após, aos que houve inversão das tensões compressivas para trativas no sentido longitudinal e próximo da ruptura.

O comportamento das tensões residuais, comparando-se a austenita com a ferrita, foi similar nos mesmos corpos de prova 1D, 2D e 3D, o que pode ser comprovado através das análises comparativas entre as Figuras que mostram as variações das tensões residuais com deformação plástica. Pela análise comparativa podemos citar no corpo de prova 1D as Figuras 5 e 9, no corpo de prova 2D as Figuras 6 e 10 e, no corpo de prova 3D as Figuras 7 e 11.

Pode-se observar que ocorreram comportamentos diferentes das tensões na seção transversal dos corpos de prova nos resultados obtidos por Gurova (1). Deve-se salientar, porém que no trabalho aqui realizado, foram utilizados três corpos de prova idênticos, mas que os mesmos sofreram flambagens (não previstas) diferentes no processo de *shot peening*, o que pode ter ocasionado a diferença observada, visto que os níveis das tensões residuais transversais iniciais são semelhantes para os três corpos de prova.

CONCLUSÕES

Foi analisado o comportamento das tensões residuais em um aço inoxidável duplex UNS S31803, com tratamento superficial de *shot peening*, ao ser submetido à deformação plástica por tração uniaxial até a ruptura dos corpos de prova. Os resultados experimentais permitem concluir que:

- Os corpos de prova apresentaram um estado inicial de tensão residual compressiva, em ambas as faces.
- O processo de *shot peening* aumentou a tensão inicial residual compressiva em torno de 40% no sentido longitudinal e 23% no sentido transversal, ao eixo de tração, em ambas as faces.
- Para todos os corpos de prova, a variação das tensões residuais, tanto na fase austenítica quanto ferrítica, foi semelhante na direção longitudinal ao eixo de tração. As tensões residuais inicialmente compressivas, tornam-se trativas no início do processo de deformação plástica, em torno de 2,5%, apresentando após um contínuo crescimento e atingindo um valor máximo em torno de 17% de deformação plástica, permanecendo como tensões trativas até a ruptura.
- Na direção transversal ao eixo de tração, houve uma variação de comportamento das tensões, desde oscilações entre as tensões residuais compressivas e trativas.
- O desenvolvimento das tensões residuais, comparando-se a austenita com a ferrita, foi similar nos mesmos corpos de prova 1D, 2D e 3D, o que pode ser comprovado através das análises comparativas entre as Figuras que mostram as variações das tensões residuais com deformação plástica.

REFERÊNCIAS

- 1 GUROVA, T., Variação do Estado de Tensões Residuais Introduzidas por Shot peening, Durante Deformação Plástica por Tração Uniaxial, em Aços. TESE DE D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.
- 2 GUROVA, T., TEODOSIO, J. R., REBELLO, J. M., and MONIN, V. I, Model for the Variation of Residual Stress During Plastic Deformation Under Uniaxial Tension, **Journal of Strain Analysis**, v. 33, n. 5, p. 367-372, 1998.
- 3 LEBRUN, J. L. and INAL, K. Proc. 45th Annual Denver X-Ray Conference, Denver, CO, **Plenum Press**, New York, 1995.
- 4 HALL, E., **Yield Point Phenomena in Metals & Alloys**. Londres, Inglaterra, Macmillan, 1970.
- 5 SOUZA JUNIOR, C. M., Evolução do Estado de Tensões Residuais Introduzidas pôr Shot Peening durante Tração Uniaxial e Ciclos de Fadiga em Aço Inoxidável Austenítico.. TESE DE M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.