



HAL
open science

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA USINAGEM POR FRESAMENTO DE AMOSTRAS DE AÇO SUPERDUPLEX

Maria Cindra Fonseca, Marcelo F M Barbosa, Rafael N Bartholo, Altino
Marques Jr, Juan Manuel Pardal, Anna Carla Araujo

► **To cite this version:**

Maria Cindra Fonseca, Marcelo F M Barbosa, Rafael N Bartholo, Altino Marques Jr, Juan Manuel Pardal, et al.. ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA USINAGEM POR FRESAMENTO DE AMOSTRAS DE AÇO SUPERDUPLEX. V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2008, Salvador, Brazil. hal-03212839

HAL Id: hal-03212839

<https://hal.science/hal-03212839>

Submitted on 30 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
V NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 22 de agosto de 2008 – Salvador – Bahia - Brasil
August 18 – 21, 2008 - Salvador – Bahia – Brazil

ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA USINAGEM POR FRESAMENTO DE AMOSTRAS DE AÇO SUPERDUPLEX

Maria Cindra Fonseca¹, mcindra@vm.uff.br
Marcelo F. M. Barbosa¹, marcelaofmb@gmail.com
Rafael N. Bartholo¹, rafaelnb@gmail.com
Altino Marques Jr.¹, altino_marques@yahoo.com.br
Juan Manuel Pardal¹, juanmanuelpardal@yahoo.com.br
Anna Carla Araújo², annacarlaaraujo@hotmail.com

¹UFF – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, S/302, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói-RJ, Brasil.
e-mail: mcindra@vm.uff.br

²CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Av. Maracanã, 229 - Maracanã - 20271-110, Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo das tensões residuais geradas no processo de usinagem por fresamento em amostras de aço inoxidável superduplex, de desenvolvimento relativamente recente, utilizado na fabricação de componentes para diversos segmentos industriais. Dois materiais para ferramentas, aço rápido ao cobalto e metal duro, foram usados para os mesmos parâmetros de usinagem (avanço, velocidade e profundidade de corte), a fim de estabelecer uma relação entre o regime de corte, materiais para ferramentas e as tensões residuais. O fresamento foi realizado em máquina convencional, a baixa velocidade de corte e em um centro de usinagem CNC. O conhecimento da influência dos parâmetros de usinagem na magnitude das tensões geradas assume grande importância, pois está estabelecido que tensões residuais trativas diminuem a vida em fadiga, enquanto as tensões compressivas são benéficas à sobrevida em fadiga dos componentes. As tensões residuais superficiais foram medidas por difração de raios-X, pelo método da dupla exposição, utilizando um equipamento portátil. No fresamento em baixa velocidade de corte, para ambos os materiais de ferramenta, as tensões residuais foram compressivas, sendo que os maiores valores foram verificados no fresamento com ferramenta de metal duro. Com o emprego de maior velocidade e pequena profundidade de corte houve o surgimento de tensões residuais trativas em ambas as fases do material usinado. Foram feitas medidas de dureza Vickers em algumas das amostras usinadas.

Palavras-chave: Tensões residuais, fresamento, aço inoxidável superduplex, tensometria por difração de raios-X.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico conquistado na segunda metade do último século, os aços inoxidáveis duplex e superduplex passaram a ocupar uma posição de relativo destaque na indústria, principalmente devido às suas características de elevadas resistência mecânica e à corrosão. Eles são utilizados em estruturas, tubulações e componentes destinados às indústrias petrolífera, química, petroquímica, de produção de energia, de papel e celulose, naval e *offshore* e também em alguns setores da agroindústria, uma vez que apresentam excelente comportamento quando empregados em meios altamente agressivos, comuns nestes setores industriais.

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 de propriedades eles encontraram aplicação cada vez mais difundida na indústria química e petroquímica, na indústria de papel e de geração de energia (Lindgren & Lepisto, 2003).

Os altos valores dos limites de escoamento e de resistência destes aços são devidos à ação de vários mecanismos simultâneos presentes na microestrutura (Reick et al, 1992; Gunn, 2003). São eles: endurecimento por solução sólida intersticial (C, N); endurecimento por solução sólida substitucional (Cr, Mo, Ni, etc.); o efeito no refino do grão pela formação da estrutura duplex em estado sólido; o possível endurecimento causado pela formação da austenita; aumento

da resistência devido à fase ferrítica (α), desde que esta fase tenha composição química semelhante à fase austenítica (γ) e deformação induzida pela contração diferencial entre as duas fases no resfriamento a partir de uma temperatura de solubilização.

A combinação desses mecanismos explica os altos valores de resistência mecânica dos aços inoxidáveis duplex e superduplex. Entretanto, é importante enfatizar o papel particular do teor de nitrogênio. Este elemento endurece por solução sólida intersticial a fase austenítica ao ponto de tornar esta fase mais dura do que a ferrita (Gunn, 2003; Tseng, 2003). Segundo Gunn (2003), para teores menores de 0,1% N, a austenita tem um limite de escoamento menor do que a ferrita, entretanto para teores maiores que 0,2% N, a ferrita se torna menos resistente.

Por apresentarem diferentes coeficientes de expansão térmica, inevitavelmente são encontradas tensões residuais de origem térmica em equilíbrio entre as duas fases constituintes dos aços duplex. Entretanto, durante carregamentos mecânicos, as propriedades individuais de cada fase podem levar a um carregamento não uniforme compartilhado entre as fases, resultando em tensão de fase (Jia et al. 2006).

Muitos trabalhos têm sido publicados 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. Entretanto, o estado das tensões residuais geradas pelos processos de usinagem em cada fase e no material como um todo, ainda não foi bem estabelecido. As tensões residuais são tensões internas auto-equilibradas existentes nos materiais em condições de temperatura uniforme e sem carregamento externo, sendo originadas durante os processos de fabricação ou por esforços sofridos ou realizados pelo material (Macherauch & Kloos, 1987).

A resistência à fadiga das ligas metálicas é fortemente dependente do estado de tensões residuais induzido nas camadas superficiais, estando bem estabelecido que as 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, enquanto as tensões trativas podem se somar às tensões de trabalho e provocar a ruptura prematura do componente.

Conseqüentemente, a avaliação das tensões residuais constitui um importante método de controle da qualidade na fabricação de estruturas e componentes. Existem diversos métodos para medição de tensões residuais. A tensometria por difração de raios-X, sendo um método não-destrutivo e confiável, é um dos mais extensamente aplicados (Lindgren & Lepisto, 2003).

Os parâmetros de corte, principalmente velocidade de corte e avanço, influenciam de forma relevante as propriedades superficiais das peças usinadas, tais como, dureza, tensões residuais e rugosidade (Bouزيد Sai et al, 2000)

A Associação Internacional do Molibdênio (IMOA, 1999) indica que as ferramentas de corte de aço rápido apresentam desempenho superior às de metal duro na usinagem de aços inoxidáveis duplex.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi estudado um aço inoxidável superduplex UNS S 32750, fornecido pela Multialloy Metais em barra redonda laminada e solubilizada, com 33,5mm de diâmetro. A composição química do material, em peso, está apresentada na Tab. 1.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável superduplex UNS S 32750 (% peso).

C	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	N	Si
0,029	1,090	24,80	6,580	3,120	0,032	0,090	0,240	0,240	0,380

A caracterização do material por microscopia ótica, (Fig. 1), foi realizada em um microscópio da marca Zeiss, modelo Neophot 32. Para esta análise foi feito o Ataque Behara (80 ml de água, 20 ml de ácido clorídrico (HCl) e 0,3 g de metabissulfato de potássio ($K_2S_2O_5$), aquecido a 40°C). O ataque teve a duração de cerca de 20 segundos, sendo a amostra lavada com álcool etílico e seca em ar quente após o mesmo.

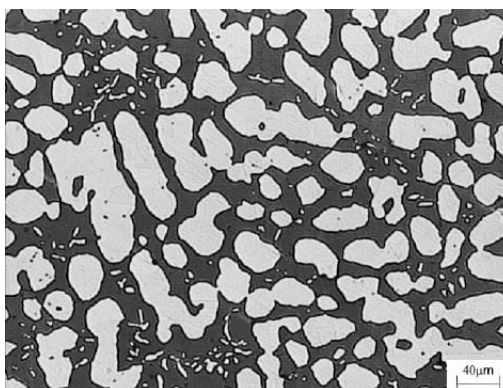


Figura 1. Microestrutura do aço estudado.

Oito amostras cilíndricas foram cortadas, por eletroerosão, para obtenção de seções quadradas (Fig. 2), que foram posteriormente usinadas por fresamento usando dois tipos de ferramentas: pastilhas de metal duro (MD), com cobertura de nitreto de titânio (TiN) montadas em suporte de 16mm de diâmetro para duas pastilhas e fresas inteiriças de aço rápido ao cobalto (AR, 8%Co) com diâmetro de 16mm. O fresamento foi realizado em dois tipos de máquinas-ferramenta: uma fresadora vertical convencional da marca Petersen, modelo VPV2 e uma fresadora ferramenteira CNC, da marca Nardini, com os parâmetros de corte da Tab. 2 e 3, respectivamente.

Durante o fresamento, tanto na fresadora convencional, como na fresadora CNC, todos os passes foram dados em uma única direção (da direita para a esquerda), com alimentação contínua de fluido de corte (emulsão a 40%), com o objetivo de arrefecer o sistema ferramenta/peça e, desta forma, evitar o excessivo desgaste da ferramenta.

Foram também realizadas medidas de dureza Vickers, usando um durômetro universal, com carga de 30 kgf, mantida constante durante um período de 25 segundos em cada medição realizada, a fim de verificar possíveis modificações nas superfícies de algumas amostras após a usinagem com as diferentes ferramentas e parâmetros de corte, comparando com a dureza inicial obtida após o corte por eletro-erosão.

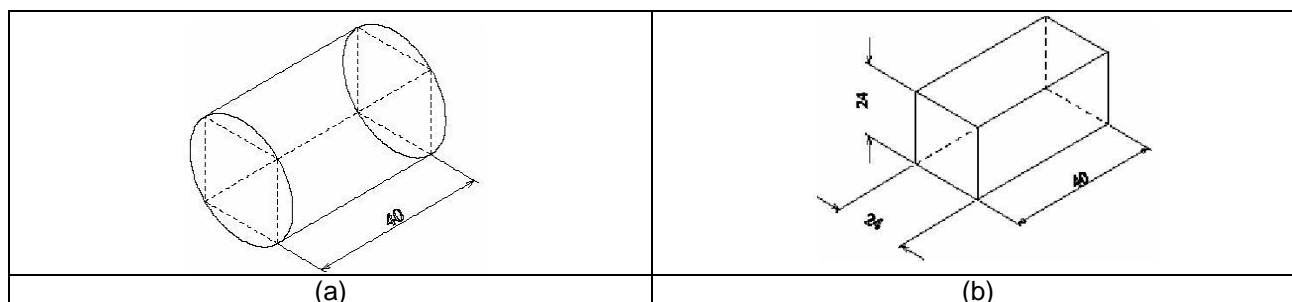


Figura 2. Preparação das amostras: (a) Corte por eletro-erosão. (b) Dimensões antes do fresamento (em mm).

Tabela 2. Parâmetros de corte usados no fresamento de topo convencional.

Ferramenta	Amostra	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot.)	Profundidade de Corte (mm)	Número de Passes	Velocidade de Corte (m/min)
Inserto de MD, em suporte de \varnothing 16mm com 2 insertos.	1	680	6	0,5	3	34
	2				3	
	3				3	
	4				4	
Fresa de topo de Aço Rápido (AR), com \varnothing 16mm e 4 navalhas.	1	680	6	0,5	3	34
	2				3	
	3				3	
	4				2	

Tabela 3. Parâmetros de corte usados na usinagem no centro de usinagem CNC.

Ferramenta	Amostra	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)	Velocidade de corte (m/min.)	Profundidade de corte (mm)	Número de Passes
Metal Duro (MD)	1	2000	25	100	0,5/0,2/0,1	3
	2					3
	3					3
	4					3

As tensões residuais foram medidas após a usinagem, por difração de raios-X, usando um equipamento portátil, pelo método da dupla exposição (Fig. 3). As medidas foram feitas no mesmo sentido da direção do fresamento.

Considerando que o aço estudado é um material bifásico, austeno-ferrítico, em proporção de aproximadamente 50% de cada fase e que as fases presentes no aço têm reticulados cristalinos distintos – a ferrita ($F_e-\alpha$) é cúbica de corpo centrado, ao passo que a austenita ($F_e-\gamma$) é cúbica de face centrada –, é usual medir as tensões presentes separadamente em cada fase do material, que são diferentemente deformadas durante a usinagem e, conseqüentemente apresentam estados de tensões residuais diferenciados, para depois analisar o material como um todo. Foram utilizados dois tubos, um de Cr e outro de Cu, para a análise da ferrita e da austenita, respectivamente.

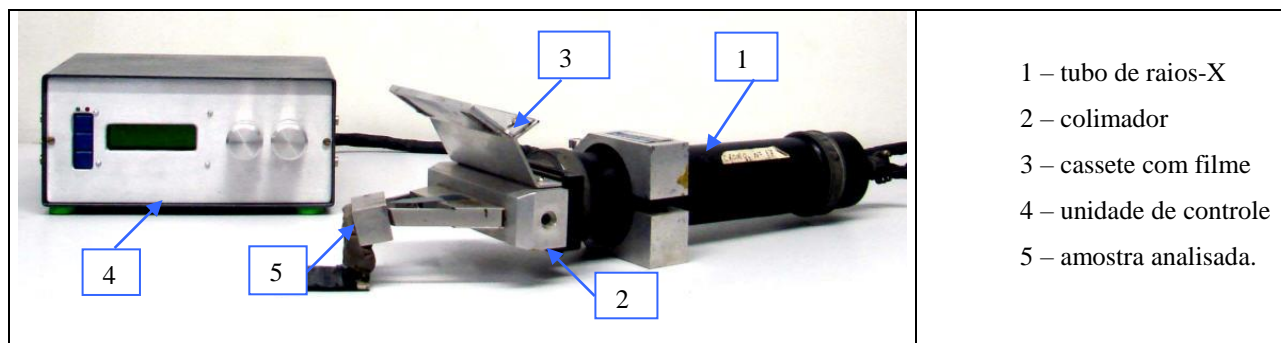


Figura 3. Medidor portátil de tensões por difração de raios-X.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Tensões Residuais e Dureza após o Fresamento em Baixa Velocidade

As tensões residuais foram medidas antes e após a usinagem, nos mesmos pontos, no centro de cada amostra, no sentido longitudinal (coincidente com a direção do fresamento) e em ambas as fases: austenita e ferrita. Na Tab. 4 estão mostrados os resultados obtidos após a usinagem na fresadora vertical convencional. No fresamento com pastilhas de metal duro, as maiores magnitudes de tensão residual foram observadas em ambas as fases da amostra 4, que foi submetida a um número maior de passes do que as demais, 4 passes. E, no caso do fresamento com aço rápido, os menores valores de tensão residual foram os obtidos também na amostra de número 4, que teve o número de passes reduzido (2 passes) em virtude da baixa resistência do material da ferramenta, mesmo à baixa velocidade de corte, o que pode indicar a influência que o número de passes tem na usinagem desta classe de material.

Tabela 4. Tensões residuais superficiais nas amostras usinadas em baixa velocidade de corte.

Ferramenta	Amostra	Tensão Residual na Ferrita (MPa)	Tensão Residual na Austenita (MPa)	Tensão Residual Total (MPa)	Tensão Residual Média (MPa)
Metal Duro (MD)	1	-750	-730	-740	-770
	2	-760	-810	-780	
	3	-720	-770	-750	
	4	-780	-850	-820	
Aço Rápido (AR)	1	-710	-700	-710	-550
	2	-680	-680	-680	
	3	-490	-280	-390	
	4	-330	-480	-410	

Os resultados apresentados na Tab.4 permitem ainda verificar que o fresamento com pastilhas de metal duro introduziu nas superfícies usinadas tensões residuais compressivas mais elevadas, além da ferramenta apresentar um desempenho muito superior ao do aço rápido, o que está em desacordo com a literatura (IMO,1999). Entretanto, comparando os dois processos de fresamento, foi observado que a utilização do aço rápido como ferramenta de corte, embora tenha apresentado problemas quanto à vida da ferramenta, propiciou um melhor acabamento superficial das amostras usinadas.

A dureza Vickers foi medida nas amostras 1 e 2 antes do fresamento e após fresamento em cada condição de ferramenta de corte. Os resultados, Tab. 5, são coerentes, pois houve endurecimento com o processo de fresamento, sem, entretanto, apresentar diferença nos resultados obtidos com MD e AR.

Tabela 5 – Dureza Vickers antes e após o fresamento em fresadora vertical.

Amostra	Dureza Vickers (HV)		
	Antes do fresamento	Fresamento com MD	Fresamento com AR
1	230	280	280
2	230	280	280

3.1. Tensões Residuais e Dureza após o Fresamento em Máquina CNC

A usinagem com pastilhas de metal duro (MD) foi realizada em 3 passes, com diferentes profundidades de corte (0,5; 0,2; e 0,1mm), a fim de verificar a influência deste parâmetro nas tensões residuais geradas na superfície fresada, sob o uso contínuo e abundante de fluido de corte (emulsão a 40%).

Na Tab.6 estão apresentados os resultados das tensões residuais obtidos nas fases ferrítica e austenítica de todas as amostras. As amostras foram medidas após cada passe com diferente profundidade de corte. A fase ferrítica, tendo maior capacidade de deformação, deforma-se antes da austenita durante o amassamento da superfície provocado pela usinagem. Isto explica os altos valores de tensão residual atingidos nas amostras 1 e 3, enquanto que nas amostras 2 e 4 a deformação na ferrita foi menor, restou ainda capacidade de deformação nesta fase antes que a austenita pudesse ser deformada, o que justifica os valores em ambas amostras (Tab.6). Na fase austenítica, as tensões residuais foram medidas em cada amostra somente na profundidade de corte de 0,5mm. A Fig. 4 apresenta o comportamento das tensões residuais na fase ferrítica em relação às profundidades de corte.

Dos resultados apresentados na Tab. 6 e Fig. 4 é possível verificar que o fresamento com menores profundidades de corte provocaram tensões residuais compressivas de baixa magnitude ou trativas nas superfícies usinadas, o que deve ser consequência, além da influência da profundidade de corte, do menor tempo de contato ferramenta/peça e conseqüente menor esmagamento da superfície usinada. Após o terceiro passe, com a profundidade de corte de 0,1 mm, todas as amostras apresentaram tensões residuais trativas, com magnitude de até 160MPa na amostra 4, com exceção da amostra 3, onde as tensões residuais foram relaxadas (0 MPa).

Não foi possível realizar o fresamento com ferramenta de aço rápido, pois mesmo usando rotação de 1000rpm (50% menor do que a usada com MD), a ferramenta não suportou, tendo falhado prematuramente, antes de concluir um passe.

Tabela 6. Tensões residuais superficiais nas amostras usinadas em máquina CNC.

Profundidade de Corte (mm)	Tensão Residual na Fase Ferrítica (MPa)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
0,5	-510	-170	-520	-160
0,2	-120	-140	-110	-60
0,1	15	100	0	160
Profundidade de Corte (mm)	Tensão Residual na Fase Austenítica (MPa)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
0,5	-110	13	-60	130
	Tensão Residual Total (MPa)			
	-620	-160	-580	-30

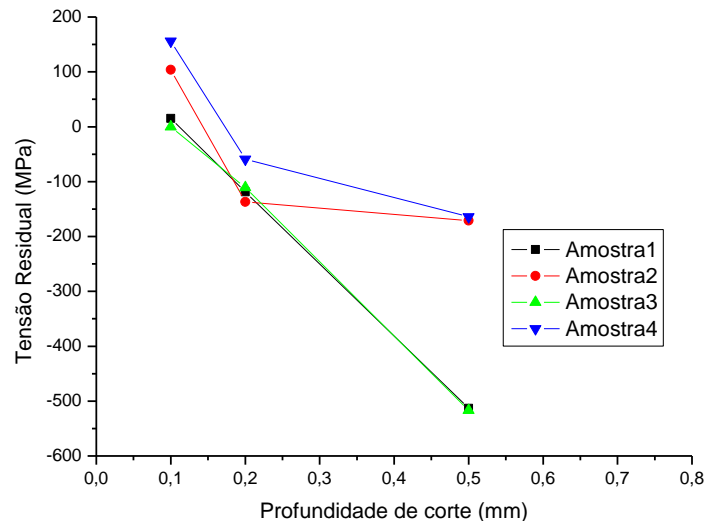


Figura 4. Tensões residuais geradas na ferrita pelo fresamento com ferramenta de MD em máquina CNC.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram estudadas as tensões residuais geradas pelo processo de usinagem por fresamento de amostras de aço inoxidável superduplex UNS S32750. Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

1. A usinagem realizada em baixa velocidade de corte, com ferramenta de aço rápido gerou menores níveis de tensões residuais compressivas (média de -550 MPa), quando comparada com a operação que utilizou pastilha de metal duro (média de -770 MPa).

2. Em relação ao acabamento superficial das amostras, verificou-se que aquelas que foram fresadas com ferramenta de aço rápido em baixas velocidades de corte apresentaram um melhor acabamento superficial.
3. A usinagem com maior velocidade de corte (100m/min) e menor profundidade de corte (0,1mm), usando pastilhas de metal duro, resultou na geração de tensões residuais superficiais trativas nas amostras usinadas.

5. REFERÊNCIAS

- Bordalo, S.N., Ferziger, J.H. and Kline, S.J., 1989, "The Development of Zonal Models for Turbulence", Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44.
- Bouزيد Sai, W.; Ben Salah, N.; Lebrun, J.L., 2001, "Influence of machining by finishing milling on surface characteristics", International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, pp. 443-450
- Gunn, R., 2003, "Duplex stainless steels. Microstructure, properties and applications". Cambridge - England: Abington Publishing, 204 p.
- International Molybdenum Association (IMOA), 1999, "Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels", Londres, 47 p.
- Jia, N.; Lin Peng, R.; Wang, Y.D.; Chai, G.C.; Johansson, S.; Wang, G.; Liaw, P.K., 2006, "Interactions between the phase stress and the grain-orientation-dependent stress in duplex stainless steel during deformation", Acta Materialia, 54, pp. 3907-3916.
- Lindgren M.; Lepisto T., "Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel", 2003, NDT&E International, 36, pp. 279-288.
- Macherauch, E.; Kloos, K. H., 1987, "Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress in Science and Technology". Ed. by Macherauch, V. Hauk, DGM Verlag.
- Reick, W.; Pohl, M.; Padilha, A.F., 2004, "O desenvolvimento dos aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos com microestrutura duplex". In Proceedings: Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, Belo Horizonte MG, Brasil, Vol 48, nº 409.
- Tseng, C.M.; Liou, H.Y.; Tsai, W.T., 2003, "The Influence of Nitrogen Content on Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior of Duplex Stainless Steel", Materials Science and Engineering, A344, pp.190-200.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no presente trabalho.

STUDY OF RESIDUAL STRESSES GENERATED IN MACHINING BY MILLING OF SUPERDUPLEX STEEL SAMPLES

Maria Cindra Fonseca¹, mcindra@vm.uff.br
Marcelo F. M. Barbosa¹, marcelaofmb@gmail.com
Rafael N. Bartholo¹, rafaelnb@gmail.com
Altino Marques Jr.¹, altino_marques@yahoo.com.br
Juan Manuel Pardal¹, juanmanuelpardal@yahoo.com.br
Anna Carla Araújo², annacarlaaraujo@hotmail.com

¹UFF – Universidade Federal Fluminense/PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D, S/302, CEP 24210-240, São Domingos, Niterói-RJ, Brazil.

e-mail: mcindra@vm.uff.br

²CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Av. Maracanã, 229 - Maracanã - 20271-110, Rio de Janeiro - RJ - Brazil

Abstract: The present work introduces a residual stresses study in superduplex stainless steel samples by milling machining process. This material has a recente development and has been used in manufacturing of many industrial segments components. For the machining, two different types of tools materials (HSS and cabides) were used with the same cutting parameters (feed rate, speed and depth of cut) trying to obtain a relation between cutting parameters, tools materials and residual stresses. The knowledgement of the cutting parameters influence in magnitude of generated residual stresses becomes very important, because it is established that tensile residual stresses decrease the fatigue life, while compressive stresses are benefic to the fatigue life of the components. The superficial residual stresses were measured using X-ray diffraction, by double exposure technique, using a portable apparatus. In case of milling with low cutting velocity the generated residual stresses had been compressive, and the biggest values had been verified in the milling with carbides tool. With increasing of cutting velocity residual stresses became tensiles. Vickers hardness measurement is carried out for many samples.

| Key-Words: Residual stresses; milling; superduplex stainless steel, X-ray diffraction technique.