



HAL
open science

**ANÁLISE DAS FORÇAS DE CORTE E DA
INTEGRIDADE SUPERFICIAL NO
MICROFRESAMENTO DO AÇO SUPERDUPLEX
32750**

Adriane Lopes Mougo, Fábio de Oliveira Campos, Vanessa Pinheiro, Anna
Carla Araujo

► **To cite this version:**

Adriane Lopes Mougo, Fábio de Oliveira Campos, Vanessa Pinheiro, Anna Carla Araujo. ANÁLISE DAS FORÇAS DE CORTE E DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL NO MICROFRESAMENTO DO AÇO SUPERDUPLEX 32750. 8^o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015, Salvador, Brazil. hal-03226774

HAL Id: hal-03226774

<https://hal.science/hal-03226774>

Submitted on 18 May 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.

ANÁLISE DAS FORÇAS DE CORTE E DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL NO MICROFRESAMENTO DO AÇO SUPERDUPLEX 32750

Adriane Lopes Mougo, adriane.mougo@gmail.com^{1,2}
Fabio de Oliveira Campos, fo.campos@mecanica.coppe.ufrj.br¹
Vanessa da Silva Pinheiro, vanessapinheiro@poli.ufrj.br¹
Anna Carla Araujo, anna@mecanica.ufrj.br¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, COPPE, BL G, SL 204

²Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Estrada de Adrianópolis, 1.317, Santa Rita, Nova Iguaçu/ RJ

Resumo: A força de corte é uma das variáveis mais representativas do processo de usinagem. No microfresamento, a força de corte depende fortemente dos parâmetros de corte, da geometria da ferramenta e da microestrutura da peça de trabalho e, conseqüentemente, a integridade da peça e o desgaste da ferramenta também são influenciados por esta variável. Os aços superduplex são largamente utilizados na indústria de petróleo e gás devido as suas propriedades de resistência mecânica e de corrosão associados à microestrutura bifásica de ferrita e austenita. Apesar de conferir elevada resistência ao material, cada estrutura possui características e propriedades particulares e são distribuídas aleatoriamente na peça, induzindo em vibrações durante o corte e aumentando ainda mais os problemas relacionados à usinagem. Os estudos relatados sobre a microusinagem deste aço partem do processo de EDM com atenção voltada à taxa de remoção do material para fabricação de filtros biomédicos e, portanto, a microusinagem deste aço ainda é um campo pouco explorado. Assim, o objetivo deste trabalho é verificar a influencia da força de corte na rugosidade da peça, na formação de rebarbas e no desgaste da ferramenta no microfresamento do aço superduplex 32750. O planejamento experimental utilizou dois níveis de velocidade de corte (30 e 50 m/min) e seis níveis de avanço (1,2, 3, 5, 7, 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$), mantendo a profundidade de corte constante e a refrigeração com fluido de corte Quakercool 7595 VEG BF. Os resultados mostram a maior influência do avanço nas forças de corte e, conseqüentemente, na rugosidade e na formação de rebarbas. O desgaste da ferramenta foi quantificado pela diminuição do diâmetro de corte, pelo aumento do raio da aresta de corte e pela variação das forças de corte com o tempo de usinagem.

Palavras-chave: microfresamento, superduplex 32750, forças de corte, integridade superficial, desgaste da ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

O processo de microusinagem é semelhante ao processo de usinagem convencional no que diz respeito à cinemática e as características gerais do processo. Suas similaridades permitem a aplicação do conhecimento adquirido na escala macro para a escala micro. A primeira diferença que é percebida na redução da escala é a percepção do operador sobre as condições de corte. Desde a aproximação da peça, que necessita de ampliação ótica e de sensores de contato, até a distinção de situações de instabilidade e esforços excessivos na ferramenta.

Por causa do tamanho minúsculo da ferramenta, é muito difícil perceber as arestas de corte danificadas e até mesmo o eixo quebrado. Muitas horas de usinagem podem ser perdidas se a falha da ferramenta não for detectada a tempo (Bao e Tansel, 2000). Portanto, para o controle das condições de operação é necessária muitas vezes a utilização de sensores e equipamentos capazes de detectar sinais relacionados a alguma descontinuidade do processo.

A partir da redução do tamanho das ferramentas de corte e das dimensões da peça de trabalho, surgiu a necessidade do estudo do Efeito de Escala, que é um conjunto de fenômenos capazes de descrever o comportamento de um material durante a fabricação em escala reduzida (Bissacco *et al.*, 2006; Aramcharoen *et al.*, 2009; Mian *et al.*, 2011). Segundo Vollertsen *et al.* (2009) este Efeito de Escala pode ocorrer durante a fabricação de qualquer tipo de material, mas é comumente observado em materiais metálicos devido a sua deformação plástica.

O Efeito de escala em usinagem trata principalmente da relação entre o raio de arredondamento da aresta de corte (r_c) e a espessura do cavaco indeformado (t_c) e da microestrutura da peça de trabalho. Como na microusinagem t_c passa a ter a mesma magnitude de r_c , e muitas vezes $r_c > t_c$, o ângulo de saída do cavaco passa a ser negativo, gerando deformações plásticas na superfície da peça que irão comprometer seu acabamento e diminuir a vida útil da ferramenta de corte.

Somado a isto, para que ocorra a formação do cavaco, é necessário que t_c seja maior que uma espessura mínima para formação do cavaco (t_{cm}). Isto porque, quando $t_c < t_{cm}$ o material é "empurrado" à frente da aresta de corte por um mecanismo conhecido por *ploughing* ou riscamento, que é um processo de conformação e não de usinagem (Ramos *et al.*, 2012). Se $t_c \ll t_{cm}$ o cavaco não será formado e a superfície da peça será deformada elasticamente, recuperando sua forma após a passagem da ferramenta (Vogler *et al.*, 2005; Malekian *et al.*, 2012). Deste modo, a atenção na

microusinagem deve ser voltada, no primeiro instante, à medição de r_c e à determinação de t_{cm} , seguida da seleção adequada dos parâmetros de corte.

O mecanismo de corte na microusinagem pode ser apresentado em três etapas distintas: na Fig. (1a) ocorre a remoção do material predominantemente por cisalhamento e uma pequena ocorrência de *ploughing* pode ser também observada; na Fig. (1b) a ocorrência de *ploughing* é mais evidente, onde parte do material é removido e outra parte sofre recuperação elástica (t_{re}) e deformação plástica; na Fig. (1c) predomina a deformação plástica ou esmagamento do material pelo efeito *ploughing*, sem a formação do cavaco.

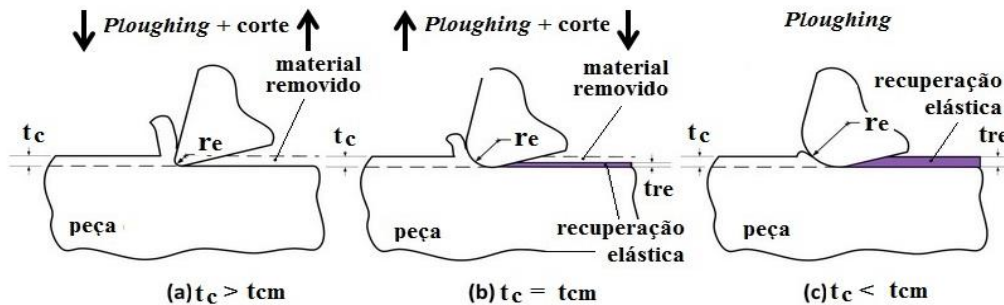


Figura 1. Mecanismo de corte na microusinagem adaptado de Arai (2008).

A principal consequência do Efeito de Escala na fabricação por microfresamento é o aumento das forças de corte com o aumento de t_c (Vollertsen *et al.*, 2009). O aumento destas forças é causado pelo aumento da área do cavaco removido, o que influencia na integridade da peça e no desgaste da ferramenta. Mian *et al.* (2011) afirmam que estes últimos fatores podem ser utilizados para identificação do efeito de escala em processos de microusinagem.

Outra característica importante abordada pelo Efeito de Escala é o efeito da microestrutura da peça de trabalho. Na microusinagem a quantidade de material removido a cada passagem da aresta de corte pela superfície da peça é muito menor que na usinagem convencional, sem alterar o tamanho dos grãos. Assim, se para o processo convencional a formação do cavaco compreende a união de vários grãos, no microfresamento o cavaco pode ser composto de poucos grãos ou mesmo de um único grão. Quando o corte ocorre dentro de um único grão, as tensões aplicadas à ferramenta são dependentes de vários fatores do material, como a orientação cristalográfica, polimorfismo e fases presentes, causando oscilações de alta frequência das forças de corte (Bissacco *et al.*, 2006). Esta oscilação irá influenciar no desempenho do processo e no acabamento da peça de trabalho.

Grande parte das peças miniaturizadas é fabricada de materiais próprios à aplicação na área médica, biomédica e odontológica, como as ligas de titânio e materiais com memória de forma. No entanto, os aços em geral também vêm sendo estudados na microusinagem pela sua microestrutura heterogênea e para ampliar seu campo de aplicação industrial. Dentre estes aços, os inoxidáveis duplex e superduplex são fortes candidatos à microfabricação, pois alia excelente resistência à corrosão com altos valores de resistência mecânica, devido sua microestrutura bifásica (Pardal, 2012).

A estrutura bifásica encontrada neste material pode influenciar a vida útil da ferramenta de corte e a integridade da superfície usinada, dependendo também dos parâmetros de corte associados ao processo. Sua baixa usinabilidade é associada à alta dureza e à baixa condutividade térmica, podendo formar aresta postiça de corte na ferramenta e aumentar a rugosidade da superfície usinada. Além desta característica, é importante observar que a geometria de corte na microusinagem é da mesma ordem de grandeza do tamanho médio dos grãos da peça. Assim, a microestrutura heterogênea pode causar variação na dinâmica de corte durante a passagem do dente ora por uma fase mais dúctil ora por uma fase mais frágil, ocasionando a variação das forças de corte.

O trabalho na área de microusinagem de um aço superduplex que sem tem conhecimento até a presente data foi apresentado por Saravanan *et al.*, 2012. Os autores realizaram a usinagem da peça pelo processo por microusinagem eletroquímica com atenção voltada à taxa de remoção do material para fabricação de filtros biomédicos. Portanto, a microusinagem deste aço ainda é um campo pouco explorado, podendo apresentar as mesmas problemáticas já estudadas para outros materiais heterogêneos. Assim, torna-se importante conhecer as características microestruturais do material, suas propriedades mecânicas, a influência dos parâmetros e condições de corte e os principais fatores influentes na estabilidade do processo de microusinagem.

Para contribuir neste campo de pesquisa, este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo experimental do microfresamento do aço superduplex UNS S 32750 e verificar a influência da velocidade de corte e do avanço por dente na força de corte, na rugosidade média dos canais microfresados e na formação de rebarba. Foram utilizados dois níveis de velocidade de corte e seis níveis de avanço por dente, permanecendo a profundidade de corte constante.

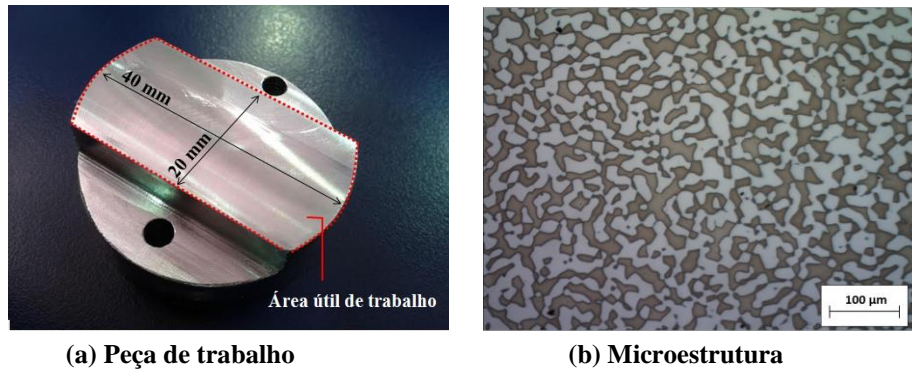
2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento experimental deste trabalho.

2.1. Material e Aparato Experimental

O corpo de prova utilizado neste trabalho foi fornecido pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro (CEFET/RJ) e consiste de uma barra de aço superduplex UNS S32750 com área útil para usinagem de 40 mm x 20 mm, como apresentado na Fig. (2a). Inicialmente, foi realizado o preparo metalográfico da peça para possibilitar a análise microestrutural e o teste de microdureza da superfície a ser usinada.

Para a preparação metalográfica foram realizados os procedimentos de lixamento, polimento e ataque eletroquímico. No lixamento foram utilizadas lixas com granulometria de 220 a 600 e no polimento foram utilizadas pastas de diamante com 3 μ m e 1 μ m, respectivamente. Para a revelação da microestrutura foi realizado o ataque eletroquímico com uma fonte de tensão ajustada em 3 V e o método de imersão da superfície da peça durante 2 minutos em um reagente composto de 20 g de NaOH e 100 ml de água destilada. A microestrutura é apresentada na Fig. (2b).



(a) Peça de trabalho

(b) Microestrutura

Figura 2. Análise microestrutural do aço superduplex 32750.

A composição química em peso deste material foi analisada anteriormente por Vogel *et al.*, 2013, como apresentada na Tab. (1).

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
0,013	0,29	0,75	0,019	0,0006	24,79	6,95	3,83	0,15	0,28

Após esta etapa, as imagens captadas com o auxílio de um microscópio ótico foram analisadas pelo software *Image-Pro Plus* com o objetivo de quantificar a fração volumétrica de cada fase do material. A identificação das fases foi realizada pelo método de contraste de tonalidade. Os resultados mostraram que a fração volumétrica da fase escura (ferrita) foi de 52% e que a fração volumétrica da fase clara (austenita) foi de 48%.

Para o ensaio de microdureza foi utilizado um microdurômetro da marca Indentec com carga de 1 Kgf, durante o tempo de 30 segundos. Repetiu-se o ensaio em três regiões aleatórias e afastadas entre si para verificar a microdureza média da superfície. A microdureza média da superfície medida foi de 347 HV, correspondente a 35 HRC, de acordo com tabela de conversão de dureza. O conhecimento desta dureza é importante, entre outros aspectos, para selecionar a ferramenta de corte mais adequada para usinagem de determinados tipos de materiais da peça de trabalho.

A ferramenta de corte utilizada nos experimentos foi uma microfresa inteiriça de Carbetto de Tungstênio com revestimento de Nitreto de Alumínio Titânio (TiAlN-F). Sua geometria consiste basicamente do diâmetro de 0,8 mm, 2 dentes de corte e diâmetro da haste de 4 mm, como apresentada na Fig. (3). Esta ferramenta é indicada para usinagem de aços com dureza menor que 48 HRC.

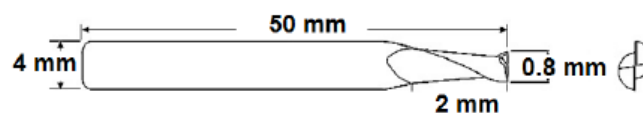
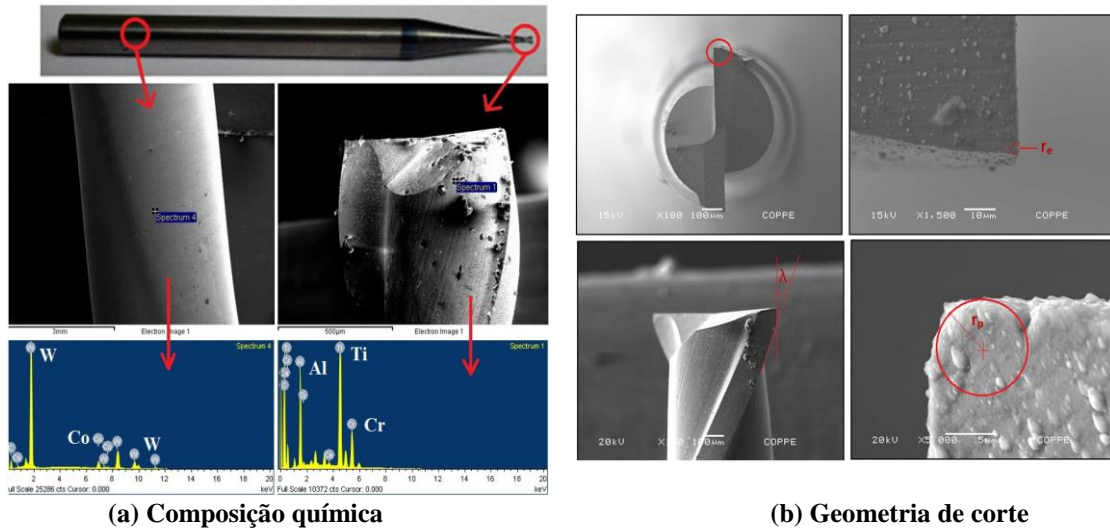


Figura 3. Dimensões da microferramenta.

As imagens e a determinação da composição química desta ferramenta foram realizadas com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da marca Zeiss DSM 940, e da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). A Fig. (4a) apresenta o EDS da ferramenta, identificando a composição química do corpo da fresa e do revestimento. A Fig. (4b) mostra a medição da geometria da fresa através do software *ImageJ* de processamento de imagens. Os resultados desta medição indicam que o raio da aresta de corte (r_c) é aproximadamente 2,5 μ m, o raio de ponta (r_p) é 4 μ m e o ângulo de hélice (λ) ficou em 30°.



(a) Composição química

(b) Geometria de corte

Figura 4. MEV e EDS da microfresas.

A máquina-ferramenta utilizada neste trabalho foi a microfresadora CNC Mini-Mill/GX da *Minitech Machinery Coportation*. Para a aquisição das três componentes ortogonais da força de corte durante o microfresamento foram utilizados um dinamômetro, um amplificador de sinais, uma placa de aquisição e um microcomputador com software para a leitura de dados.

O dinamômetro utilizado foi da marca *Kistler* do tipo MiniDyn 9256C2 com cabo de conexão do tipo 1967A. O condicionamento dos sinais das forças de corte adquiridos com o minidinamômetro foi realizado com o auxílio de um amplificador de carga da marca *Kistler* modelo 5070A10100. Para que o sinal analógico seja transformado em sinal digital e lido pelo computador é necessário que o amplificador de carga seja conectado a uma placa de aquisição de sinais. Para isso, foi utilizada uma placa da *National Instruments* NI USB-6551 e o software *LabView Signal Express* 2012 para leitura do sinal digital.

2.2. Procedimento Experimental

Antes de iniciar os experimentos é necessário preparar a superfície da peça onde será realizada a microusinagem dos canais. Esta etapa é realizada após a fixação da peça no dinamômetro e tem por objetivo garantir que a operação de microfresamento seja realizada em uma superfície plana. Se a superfície não for perfeitamente plana a profundidade de corte irá variar durante o processo de corte e os dados da força não poderão ser utilizadas para análise.

A preparação da superfície consiste no seu faceamento com uma fresa de topo de metal duro de 2 dentes e diâmetro de 3mm. Os parâmetros de corte utilizados foram a velocidade de corte de 50m/min, a velocidade de avanço de 100 mm/min e a profundidade de corte de 0,1mm.

Em seguida, os experimentos foram planejados com dois níveis de velocidade de corte e seis níveis de avanço por dente para analisar a influência destes parâmetros nas forças de corte e na integridade da superfície dos canais microusinados. A Tab. (2) apresenta os parâmetros de corte usados nos experimentos.

A Tab. (3) apresenta os parâmetros de corte utilizados em cada experimento, com 3 réplicas para os experimentos de 1 a 8. Os experimentos 9 e 10 foram realizados sem réplica, com o objetivo de analisar o comportamento das forças de corte quando $t_c < r_c$ ($2,5\mu\text{m}$). A ordem dos ensaios foi planejada de forma a garantir a aleatoriedade dos experimentos. Assim, foram obtidos 26 canais com aproximadamente 5 mm de comprimento e espaçados em 1.5 mm entre si.

Tabela 2. Parâmetros de corte.

Rotação	12000 e 2000 rpm
Velocidade de corte	30 e 50 m/min
Avanço por dente	1, 2, 3, 5, 7, 10 $\mu\text{m}/\text{dente}$
Profundidade de corte	100 μm
Largura de corte	0,8 mm (imersão total)
Comprimento de corte	5 mm
Corpo de prova	Superduplex UNS S 32750
Fluido de corte	Microcute 510 F

Tabela 3. Planejamento de experimentos.

Exp.	f_t ($\mu\text{m}/\text{dente}$)	Rotação (rpm)
1	10	20000
2	10	12000
3	7	20000
4	7	12000
5	5	20000
6	5	12000
7	3	20000
8	3	12000
9	2	20000
10	1	20000

Para medida de rugosidade e altura da rebarba de topo foi utilizado o *Form Talysurf Intra* da Taylor Hobson, série 0120, capaz de medir com alta precisão rugosidade, ondulação, formas e contornos. Possui comprimento transversal de 0.1 mm – 50 mm e velocidade transversal máxima de 10 mm/s. O apalpador padrão utilizado foi da série 112/2009, com ponta esférica de diamante e raio de 2 μ m. Para análise de superfície foi utilizado o Software *Ultra Surface Finish V5*.

A medida de rugosidade média (Ra) foi obtida no sentido longitudinal dos canais, ou seja, no mesmo sentido de avanço da ferramenta. Para cada canal foram realizadas três medições de Ra. A medida no sentido transversal permitiu a obtenção dimensional dos canais e da altura da rebarba de topo. Nesta etapa foram realizadas 10 medidas ao longo de cada canal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será apresentado o tratamento dos sinais experimentais da força de corte, a influência dos parâmetros de corte na variação periódica da força e na integridade dos canais microfresados.

3.1. Análise das Forças de Corte

Inicialmente, a ferramenta foi posicionada a 10 mm fora da peça para observar a aquisição de sinais de ruídos durante o deslocamento da ferramenta, antes de iniciar o microfresamento. A presença de ruído pode ser diretamente relacionada com a inércia do movimento da máquina ferramenta. A partir de um estudo preliminar a respeito dos sinais experimentais foi possível observar que a diminuição dos ruídos e a suavização do perfil da força de corte foram obtidas utilizando um filtro passa-baixa com frequência de corte correspondente à frequência de rotação da ferramenta.

Por exemplo, a Fig. (5) mostra o sinal da força de corte sem filtro e com filtro para três revoluções completas da ferramenta do experimento 2. É possível observar um baixo nível de ruído interferindo na aquisição do sinal da força. Assim, usando um filtro passa-baixa com frequência de corte de 2 kHz é possível remover estes ruídos sem modificar o comportamento periódico da força de corte. Deste modo, todos os sinais da força de corte foram filtrados.

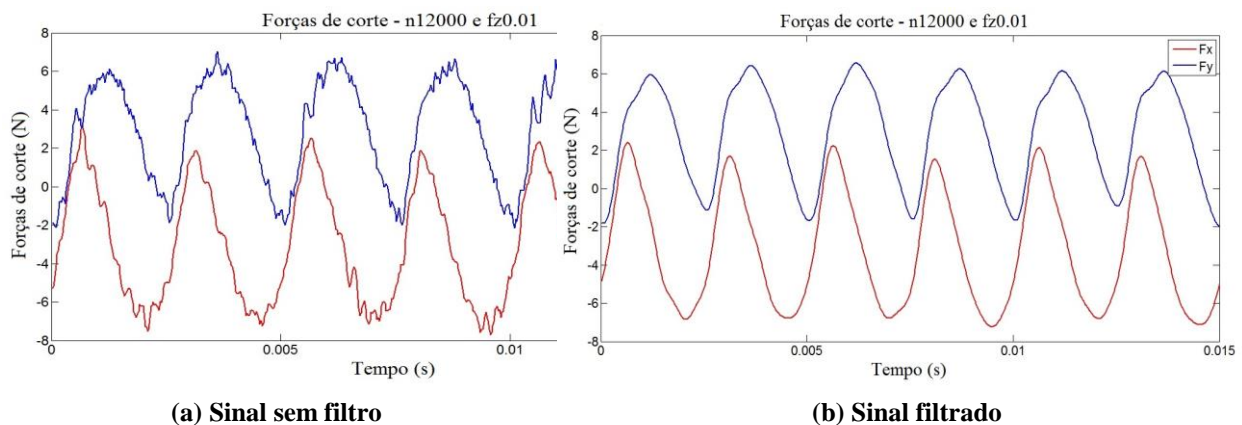


Figura 5. Tratamento dos sinais experimentais da força de corte.

Após o tratamento dos sinais, foram analisados os perfis das forças de corte para 20 rotações da ferramenta, com o objetivo de verificar a ocorrência da variação nos máximos da força. Como a microestrutura do superduplex é composta de fases distintas, uma rotação poderia indicar dois picos de força diferentes como resultado da passagem do primeiro dente na fase com maior dureza e do segundo dente na fase mais macia. Do mesmo modo, uma rotação poderia ter dois picos com a mesma força máxima, indicando que a rotação completa da ferramenta ocorreu dentro da mesma fase. Estas duas situações são fortemente dependentes do avanço por dente e da profundidade de corte aliados ao diâmetro médio dos grãos e das fases presentes no material. A Fig. (6) apresenta a análise do perfil das forças de corte considerando dois níveis de velocidade de corte (a) e (b) e dois níveis de avanço por dente (c) e (d).

É possível observar a maior variação da força máxima de corte para menor valor de velocidade e de avanço. Esta variação a partir do avanço por dente pode ser associada à microestrutura do aço superduplex. Assim, quanto menor é f_t maior será a possibilidade da passagem do dente da ferramenta em fases distintas do material. A variação a partir da velocidade de corte pode ser associada ao desbalanceamento da ferramenta, que é normalmente observado com o aumento da velocidade.

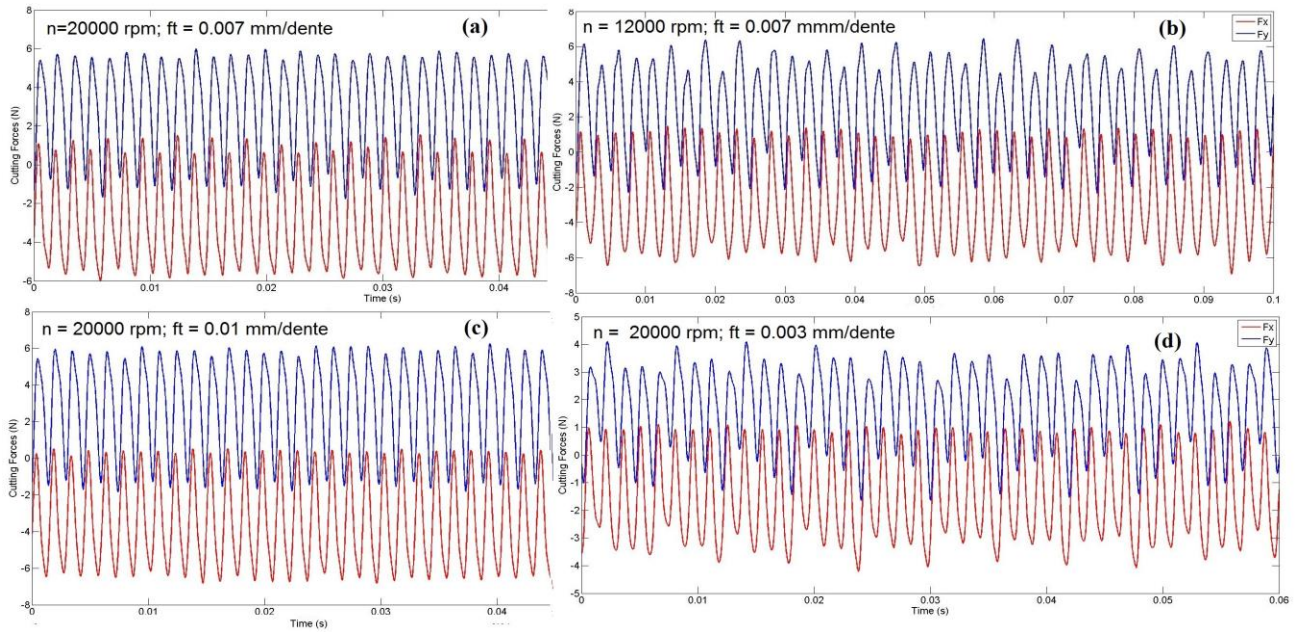


Figura 6. Variação da máxima força de corte: (a) e (b) para dois níveis de velocidades de corte e (c) e (d) para dois níveis de avanço por dente.

Para analisar de modo geral a influência dos parâmetros de corte na força de corte foi necessário calcular a força resultante de cada experimento e de suas réplicas. Em seguida, as forças máximas de 20 rotações foram selecionadas para calcular a média da força máxima resultante. A Fig. (7) apresenta a variação da força máxima de corte dos experimentos de 1 a 4 para os dois níveis de velocidade de corte, independente do avanço por dente, e para os dois níveis de avanço por dente, independente da velocidade de corte.

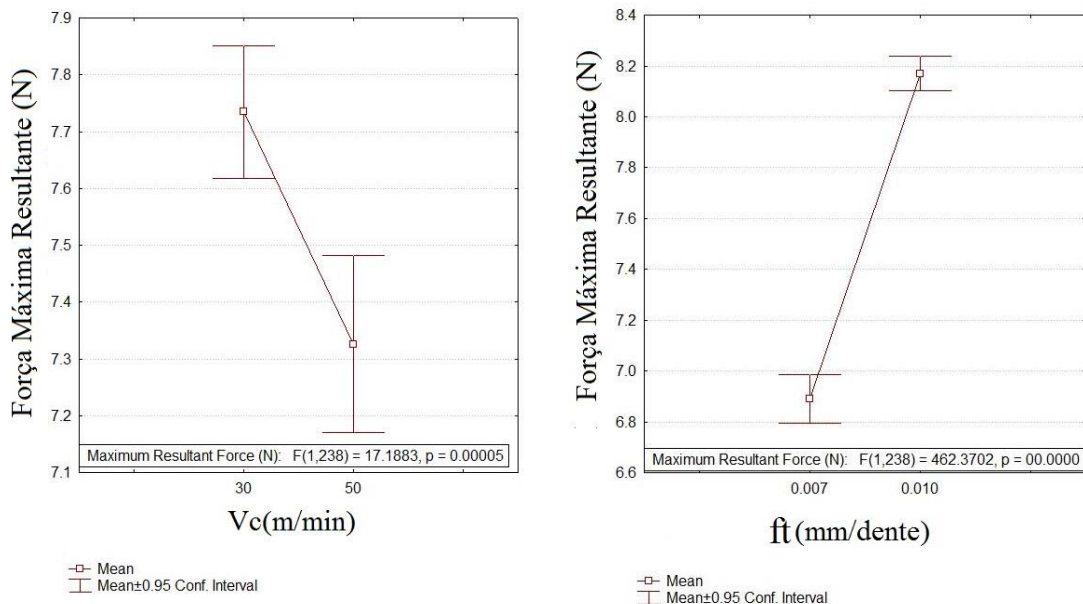


Figura 7. Variação da força máxima de corte considerando todas as réplicas dos experimentos de 1 a 4.

Os resultados da Fig. (7) mostram que a força máxima resultante diminui para maior velocidade de corte e menor avanço por dente. O aumento da velocidade de corte tende a aumentar a temperatura na região de corte mesmo com a utilização do fluido de corte, causando o amaciamento térmico do material. Este fenômeno reduz a dureza do aço e leva a deformação plástica do material mais facilmente, diminuindo a força de corte. A partir do desvio padrão destes resultados é possível observar também que a velocidade de corte influencia mais na variação das forças máximas de corte e que a velocidade de 50 m/min apresenta maior desvio padrão, podendo ser ocasionado pelo maior desalinhamento da ferramenta.

Já o aumento do avanço por dente aumenta a área do cavaco removido e, conseqüentemente, aumenta a força de corte. A Fig. (8) apresenta a variação da força máxima resultante para os seis níveis de avanço por dente, considerando a velocidade de corte de 50 m/min. Nesta figura é possível observar o aumento da força máxima resultante quando $f_t = 1 \mu\text{m/dente}$, indicando a adição do esforço por *ploughing* durante a remoção do cavaco, como foi apresentado na Fig. (1b) e Fig. (1c).

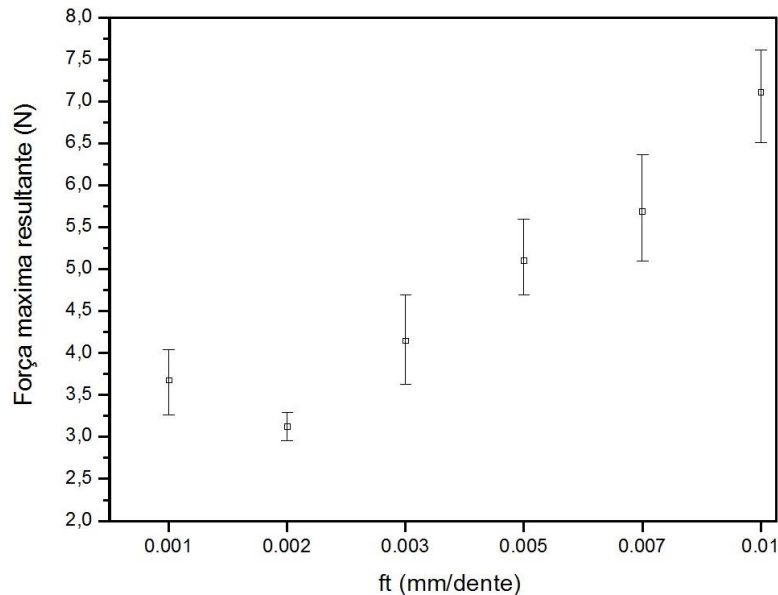


Figura 8. Variação da força máxima de corte com o avanço por dente.

3.2. Integridade Superficial

O estudo da integridade da superfície dos canais microfresados é dividido em duas partes: a análise da rugosidade média (R_a) e a altura das rebarbas de topo. Os resultados da rugosidade são obtidos a partir das medições no sentido longitudinal e da rebarba de topo no sentido transversal, conforme apresentado esquematicamente na Fig. (9).

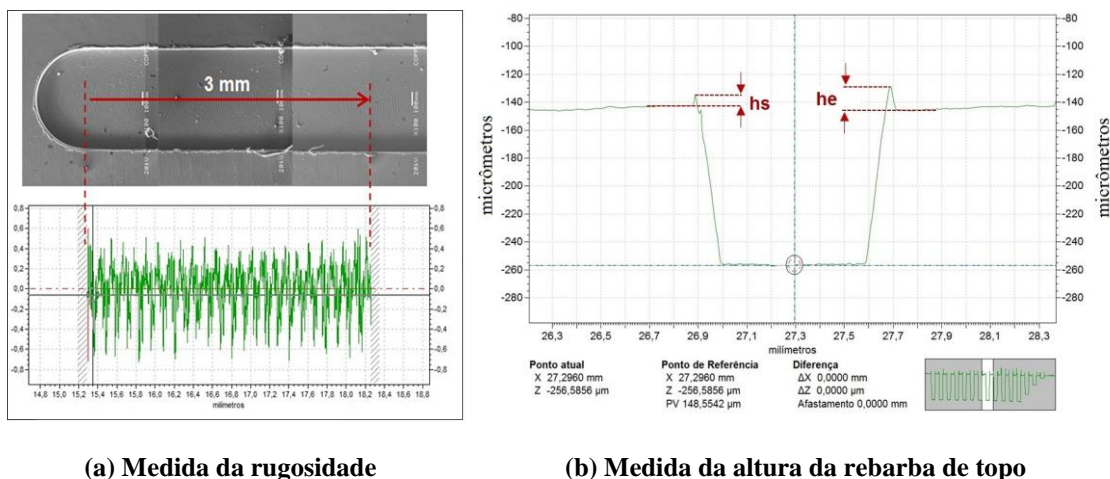


Figura 9. Tratamento dos sinais experimentais da força de corte.

Para verificar se existe uma diferença relevante entre as médias de uma variável de saída com a variação de uma ou mais variáveis de entrada, deve-se aplicar a metodologia estatística Análise de Variância (ANOVA). Para esta análise foi escolhida a força máxima resultante como variável de saída e a velocidade de corte e o avanço por dente como os parâmetros variáveis. Deste modo, tem-se o modelo chamado de *Two-way analysis of variance*. Por fim, os fatores são independentes. Isto quer dizer que a velocidade de corte não influencia no valor do avanço por dente e vice-versa.

A Análise de Variância foi realizada com os resultados das forças de corte obtidos dos experimentos de 1 a 4. A configuração dos dados é apresentada na Tab. (4).

Tabela 4. Parâmetros de corte.

	Parâmetro	-1	+1
P1	Velocidade de corte	12000	20000
P2	Avanço por dente	0.07	0.1

As hipóteses testadas para cada parâmetro foram:

- H0 (Hipótese nula): a variável de saída não varia com o parâmetro;
- H1 (Hipótese alternativa): a variável de saída varia com o parâmetro.

Os resultados são mostrados na Tab. (5). Usando um nível de significância $\alpha=0,05$ é possível obter na tabela de distribuição o valor de $F_{\text{crítico}}=5,32$. Assim, nota-se que a rugosidade sofre influência maior de f_t , pois para este parâmetro tem-se $F > F_{\text{crítico}}$.

Tabela 5. Análise de Variância de Ra para $f_t = 7$ e $10 \mu\text{m/dente}$.

Fonte	SS	Df	MS	F	Prob>F
Velocidade de corte	0.00037	1	0.00037	0.64	0.4455
Avanço por dente	0.02241	1	0.02241	38.8	0.0003
Interação	0.0008	1	0.0008	1.38	0.2739
Erro	0.00462	8	0.00058		

A evolução da rugosidade média em microusinagem a partir da relação entre t_c e r_e se comporta como uma função parabólica (Aramcharoen e Mativenga, 2009). Deste modo, quando $f_t < r_e$ a rugosidade tende a diminuir com o aumento de f_t devido a redução do efeito *ploughing* e a menor recuperação elástica do material na superfície da peça. Quando $f_t > r_e$ a rugosidade tende a aumentar, pois o mecanismo de corte passa a atuar de forma similar a usinagem convencional.

Para esta análise, foi verificada a variação do valor de Ra em função apenas de f_t , mantendo a velocidade de corte constante em $V_c=50\text{m/min}$. A Fig. (10) mostra o aumento de Ra quando f_t aumenta. Este resultado pode indicar que apesar de $f_t < r_e$, quando $f_t = 1$ e $2 \mu\text{m/dente}$, estes valores podem ter sido maiores que a t_{cm} .

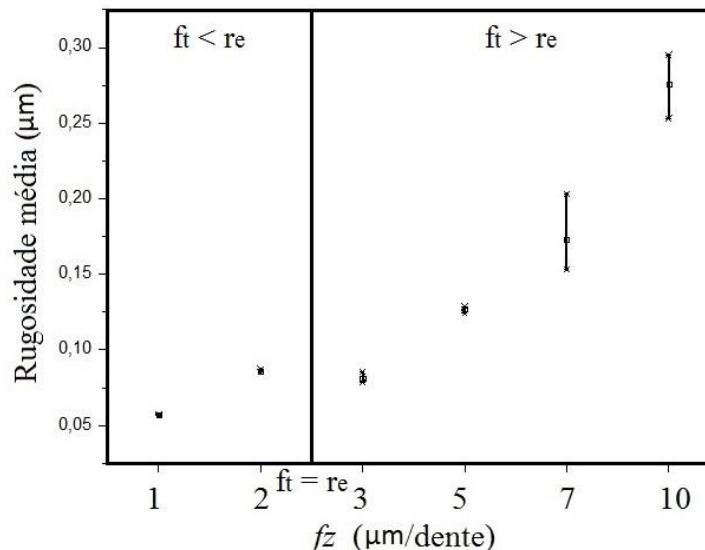


Figura 10. Relação da rugosidade média com o avanço por dente.

Deste modo, a condição ideal de microusinagem para obter a menor rugosidade da peça seria quando $f_t < r_e$. No entanto quando $f_t < r_e$ a força de corte tende a aumentar, como foi mostrado na Fig. (9). Assim, é necessário encontrar uma condição ótima para executar a microusinagem que garanta a maior vida útil da ferramenta e a integridade da peça fabricada.

As rebarbas são deformações plásticas ocasionadas pela alta tensão de compressão da peça durante a passagem da ferramenta de corte. Esta deformação torna-se maior quando $t_c < t_{cmin}$. Sua formação depende principalmente das características microestruturais do material da peça, do desgaste da ferramenta e dos parâmetros de corte. A Fig. (11) apresenta as imagens no MEV para uma réplica dos experimentos de 1 a 4.

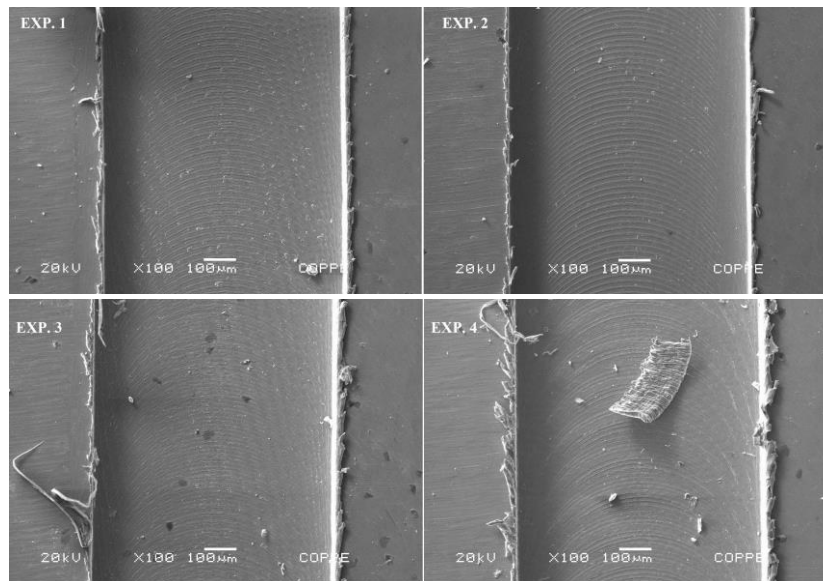


Figura 11. MEV dos canais microfresados e formação das rebarbas de topo lateral.

Para verificar a influência dos parâmetros de corte na altura da rebarba de topo foi realizada também uma Análise de Variância a partir das medidas obtidas com o perfilômetro. Os resultados são mostrados na Tab. (6). Usando um nível de significância $\alpha=0,05$ é possível obter na tabela de distribuição o valor de $F_{\text{crítico}}=5,32$.

Tabela 6. Análise de Variância de Ra para $f_t = 7$ e $10 \mu\text{m}/\text{dente}$.

Fonte	SS	Df	MS	F	Prob>F
Velocidade de corte	0.881	1	0.8812	0.05	0.8242
Avanço por dente	67.09	1	670.899	4.01	0.0802
Interação	44.184	1	441.842	2.64	0.1428
Erro	133.841	8	167.302		

Como $F < F_{\text{crítico}}$, a hipótese nula H_0 não pode ser descartada para os dois parâmetros analisados. No entanto, é possível notar que o avanço por dente pode influenciar mais na formação da rebarba de topo do que a velocidade de corte, pois o valor de F desta variável se aproxima mais do valor de $F_{\text{crítico}}$.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo experimental do microfresamento do aço superduplex UNS S 32750 e a influência dos parâmetros de corte na força de corte e na integridade superficial da peça de trabalho.

O aumento da velocidade de corte ocasionou a diminuição das forças de corte. A velocidade de corte maior tende a aumentar o atrito e a temperatura na região de corte, ocasionando o amaciamento térmico do aço, diminuindo sua dureza e também a força necessária para remoção do cavaco.

O aumento da velocidade de corte conduz também ao aumento no desvio padrão das forças máximas de corte, indicando a ocorrência do desalinhamento da ferramenta e, conseqüentemente, da variação na espessura do cavaco removido com a passagem de cada dente. Este desalinhamento pode ser ocasionado pela vibração da máquina.

As forças de corte aumentam com o aumento do avanço por dente e, conseqüentemente, com o aumento da área do cavaco removido. No entanto, foi possível observar também que quando $f_t = 1 \mu\text{m}/\text{dente}$ a força máxima resultante tende a aumentar novamente, indicando a adição do esforço por *ploughing* ao cisalhamento do material.

Pela análise de variância foi observado que o avanço por dente é o fator com maior influência na rugosidade média do canal microfresado. Quando $f_t < t_{\text{cm}}$, a rugosidade média deve aumentar devido ao aumento do efeito *ploughing*. No entanto, foi observado que o valor da rugosidade média continua a diminuir mesmo para os valores de $f_t = 1$ e $2 \mu\text{m}/\text{dente}$ ($r_e = 2,5\mu\text{m}$), indicando que não foi alcançada a condição de $f_t < t_{\text{cm}}$.

A análise de variância do perfil da rebarba de topo não mostrou influência dos parâmetros de corte. No entanto, é possível observar pelas imagens obtidas por MEV a maior formação de rebarbas para o menor valor de f_t . É possível que o perfilômetro e/ou o apalpador não sejam indicados para este tipo de medição.

5. REFERÊNCIAS

- Aramcharoen, A. and Mativenga, P., 2009, "Size Effect and Tool Geometry in Micromilling of Tool Steel", Precision Engineering, Vol. 33, N. 33, pp. 402-407.
- Bao, W. and Tansel, I., 2000, "Modeling Micro-End-Milling Operations. Part I: Analytical Cutting Force Model", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, N. 15, pp. 2155-2173.
- Bissacco, H. N. and Hansen, L. D. C., 2006, "Size Effects on Surface Generations in Micro Milling of Hardened Tool Steel", CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 55, N. 1, pp. 593-596.
- Malekian, M., Mostafa, M., Park, S., 2012, "Modeling of Minimum Uncut Chip Thickness in Micro Machining of Aluminum", Journal of Materials and Processing Technology, Vol. 212, N. 3, pp. 553-559.
- Mian, A., Driver, N., Mativenga, P., 2011, "Identification of Factors that Dominate Size Effect in Micro-Machining", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 51, N. 5, pp. 383-394.
- Pardal, J. M., 2012, "Aços Inoxidáveis Superduplex. Efeitos dos Tratamentos Térmicos nas Propriedades Mecânicas, Magnéticas e Resistência a Corrosão", Editora Blücher.
- Ramos, A. C., Autenrieth, H., Strauss, T., 2012, "Characterization of the Transition from Ploughing to Cutting in Micro Machining and Evaluation of the Minimum Thickness of Cut", Journal of Material Processing Technology, Vol. 212, N. 3, pp. 594-600.
- Saravanan, D., Arularasu, M., Ganesan, K., 2012, "A Study on Electrochemical Micromachining of Super Duplex Stainless Steel for Biomedical Filters", Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 7, N. 5, pp. 517-523.
- Vogel, J. P., Nery, W. S., Araujo, A. C., 2013, "Estudo do Efeito do Avanço nas Forças e no Acabamento de um Torneamento de Aço Superduplex", Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Penedo, Rio de Janeiro.
- Vogler, M. P., Devor, R. E., 2004, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-EndMilling, Part I: Surface Generation", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, N. 4, pp. 685-694.
- Vollertsen, F., Biermann, D., Hansen, H., 2009, "Size Effects in Manufacturing of Metallic Components", CIRP – Annals – Manufacturing Technology, Vol. 58, N. 2, pp. 566-587.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

ANALYSIS OF CUTTING FORCES AND SURFACE INTEGRITY ON THE MICROMILLING OF SUPERDUPLEX STAINLESS STEEL 32750

COF-2015-0396

Abstract: Cutting force is one of the most representative variable of the milling process. The measurement of this force contributes to its understanding and enables the design of machine-tools, the control of energy consumption and an increase in productivity. In micromilling, cutting force strongly depends on the cutting parameters, the tool geometry and the workpiece microstructure and, hence, the part integrity and the tool wear are also influenced by this variable. Superduplex stainless steel are largely used in oil and gas industry because of the high mechanical and corrosion resistance associated to the bi-phasic microstructure of ferrite and austenite. Despite giving high mechanical resistance to the material, each structure has particular characteristics and properties, which are randomly distributed in the part, leading to vibrations during the cutting and increasing even more the problems related to machining processes. Studies about the micromachining of this steel are related to EDM process and material removal rate to biomedical filters manufacturing and, therefore, micromachining of this steel is a field yet to be explored. Therefore, the objective of this work is to verify the influence of the cutting force on the surface roughness of the part, on the burr formation and on the tool wear during the micromilling of the superduplex stainless steel 32750. The design of experiment used two levels of cutting speed (30 and 50 m/min.) and six levels of feed (1, 2, 3, 5, 7, 10 $\mu\text{m}/\text{tooth}$), keeping the depth of cut constant and using Quakercool 7595 VEG BF cutting fluid. The results show a bigger influence of feed per tooth on cutting forces and, consequently, on surface roughness and burr formation. Tool wear was quantified by the decrease of cutting diameter, by the increase of the cutting edge radius and by the variation of the cutting force during the cutting process.

Keywords: micromilling, superduplex 32750, cutting forces, surface integrity, tool wear.