

## ANÁLISE DA RUGOSIDADE OBTIDA NO FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL LEAN DUPLEX LDX 2101

Maurício Rodrigues Policena<sup>1</sup>

Rafael Farias Garcia<sup>2</sup>

André João de Souza<sup>3</sup>

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Rua Sarmento Leite, nº 425 – CEP 90050-170 – Porto Alegre, RS.

<sup>1</sup>mrpolicena@gmail.com, <sup>2</sup>rafafg1985@gmail.com, <sup>3</sup>ajsouza@ufrgs.br

**Resumo.** Os aços inoxidáveis lean duplex 2101 usinados são utilizados na indústria petroquímica, celulose, petróleo e gás. O acabamento fino está intimamente relacionado com a textura da superfície, sendo uma variável de saída que reflete a qualidade e a robustez do processo. O processo de fresamento possui variáveis influentes que, associadas às características do material, afetam a qualidade da superfície usinada, o que é crítico para materiais expostos a ambientes corrosivos. Assim, o estudo analisou o acabamento da superfície usinada por fresamento frontal a seco no aço Força LDX 2101. Os parâmetros de corte (velocidade de corte  $v_c$ , avanço por dente  $f_z$  e profundidade de corte axial  $a_p$ ) foram combinados, aleatorizados e otimizados pelo projeto de experimentos Box-Behnken. Os valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  mensurados nas diferentes combinações, os perfis tridimensionais de menor rugosidade, e os perfis estatísticos através das curvas de Abbott-Firestone e Função Distribuição de Amplitudes foram registrados e representados. Os valores de rugosidade obtidos ( $R_a = 0,155 \mu\text{m}$  e  $R_z = 1,362 \mu\text{m}$ ) através dos parâmetros otimizados ( $v_c = 80 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,05 \text{ mm/dente}$  e  $a_p = 0,6 \text{ mm}$ ) foram os menores dentre todos os registrados e comprovam a eficácia do método.

**Palavras chave:** LDX 2101, Rugosidade, Box-Behnken Design, Curva de Abbott-Firestone, Distribuição de Amplitudes.

### 1. INTRODUÇÃO

A origem dos aços inoxidáveis duplex (DSS) ocorreu na França por volta de 1933 devido a um erro de adição de elementos de liga na fusão de um aço inoxidável austenítico 18%Cr – 9%Ni – 2,5%Mo (Morelo, 2014). Aços inoxidáveis duplex são uma liga com Cr-Ni-Mo na qual a liga original da família duplex (UNS S32900) predominantemente ferrítica, teve a adição de nitrogênio, o que aumentou a quantidade de austenita para quase 50%, melhorando as propriedades de corrosão a cloretos, de soldagem e de tenacidade (Philip, *et al.*, 2015).

Para serem considerados DSS, os aços necessitam ter um valor de resistência a corrosão por pite (PRE = *Pitting Resistance Equivalent*) superior a 20. IMO (2014) relaciona cinco tipos de DSS: *lean duplex* (PRE = 21-27), *lean duplex com Mo* (PRE = 27-34), *standard duplex* (PRE = 34-38), *super duplex* (PRE = 38-43) e *hiper duplex* (PRE = 49-53). O *lean duplex* 2101 (PRE = 27), é utilizado como alternativa aos aços inoxidáveis austeníticos (ASS) 304L e 316L por apresentar maior resistência mecânica, o que resulta em menores custos com material, usinagem e soldagem (Talus, 2013).

Os processos de usinagem convencionais induzem perfis ranhurados na superfície devido à interação entre ferramenta e peça, o que é prejudicial em ambientes corrosivos pois causam uma redução da vida em fadiga do componente em função de um maior número de concentradores de tensão (Jebbaraj, *et al.*, 2017).

Investigações sobre melhorias em processos convencionais de usinagem de DSS utilizando diferentes ferramentas e condições de corte distintas ainda estão em aberto. Schultheiss e Ståhl (2011) pesquisaram a usinabilidade de três diferentes tipos de DSS (2101, 2205 e 2507) com ferramentas de metal-duro revestido durante as operações de torneamento com fluido de corte em abundância. O desgaste adesivo foi severo para alguns casos e menor em outros. Larché, *et al.* (2011) fresaram juntas soldadas de ASS (304L e 316L) e DSS (2101, 2205, 2304, 2507 e 2707) para realizar ensaios de corrosão sob tensão. O valor de rugosidade obtido após o fresamento das costuras foi  $R_a = (0,7 \pm 0,1) \mu\text{m}$ .

Parâmetros estatísticos de rugosidade tem um melhor fundamento científico que os parâmetros aritméticos e podem melhor caracterizar a superfície usinada. A assimetria de uma distribuição permite avaliar o grau de desvio ou afastamento da simetria de um perfil de rugosidade. Já a curtose descreve o seu grau de achatamento (Tavares, 2005). Alternativamente, a curva de Abbott-Firestone (AFC) possibilita representar o perfil estatístico da rugosidade através de uma função de probabilidade cumulativa que indica o quanto acima ou abaixo de uma linha de referência estará o perfil (Petropoulos, *et al.* 2010). É produzida a partir de um perfil de superfície como referência. Desenha-se uma linha paralela em cada ponto medido e calcula-se o comprimento do mesmo até a referência, repetindo-se ao longo de todo o perfil da superfície, começando no pico mais alto até o vale mais baixo. Assim, é comumente usada para analisar falhas em superfícies técnicas de engenharia tais como topografias (relação pico-vale), capacidade de carga em mancais de

rolamento e a ação lubrificante (capacidade de retenção de óleo) em superfícies de deslizamento (Pawlus e Grabon, 2008). A Função Distribuição de Amplitudes (ADM) representa a distribuição que o conjunto de valores medidos têm em relação ao menor valor, descrevendo o perfil da rugosidade (Tavares, 2005). Na usinagem de DSS 2205, Krolczyk, *et al.* (2015) analisaram a influência da velocidade de corte nos valores de rugosidade. Concluíram que o parâmetro de entrada não influenciou significativamente as curvas de Abbott-Firestone. Policena, *et al.* (2018) estudaram o acabamento superficial no fresamento a seco do DSS 2205. Variaram os parâmetro de corte e analisaram os perfis de maior e menor rugosidade ( $R_a$  e  $R_z$ ). A distribuição dos valores medidos foi representada através das curvas AFC e ADM que mostraram-se importantes na caracterização e diagnóstico da superfície usinada.

Um eficiente projeto de experimentos (DOE – *Design of Experiments*) permite identificar estatisticamente quais fatores podem influenciar variáveis específicas de um processo. O *Box-Behnken Design* (BBD) é um método DOE de otimização que geralmente usa três níveis para cada variável de entrada visando desenvolver uma superfície de resposta. O DOE é constituído pela combinação da análise fatorial com projetos de blocos incompletos (Manohar, *et al.*, 2013).

A literatura mostra que existe grande demanda por pesquisas sobre o fresamento frontal dos aços inoxidáveis *lean duplex*. Desta forma, o objetivo do trabalho é analisar o perfil de rugosidade, a topografia da superfície e os parâmetros estatísticos dos menores valores de rugosidade medidos após o fresamento frontal a seco do DSS Forta LDX 2101.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço inoxidável duplex Forta LDX 2101 medida com espectrômetro de emissão atômica BRUKER Q2 ION e comparada com a norma ASTM A240/A240M para o UNS S32201.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável duplex LDX 2101 (% massa).

	C	Si	Cr	Ni	Mo	Mn	Cu	P
LDX 2101	0,09	0,83	19,42	1,53	0,26	4,49	0,30	0,03
ASTM	0,04	---	21~22	1,4~1,7	0,1~0,8	4~6	0,1~0,8	---

Utilizou-se como corpo de prova placas retangulares com 100 x 90 x 6 mm com furações para a sua fixação na mesa do centro de usinagem ROMI Discovery 308 com potência máxima de 7,5 cv (5,5 kW) e rotação máxima de 4000 rpm.

Utilizou-se uma fresa de topo Walter Tools Xtra-tec® F4042R.W20.02, diâmetro nominal de 20 mm e suporte para dois insertos Walter Tools Tiger-tec Silver® ADMT10 classe WSM35 (metal-duro com cobertura PVD de TiAlN + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com  $r_e = 0,4$  mm. O comprimento da haste em balanço foi de 30 mm.

O fresamento frontal foi realizado a seco. Em cada placa foram realizados seis passes (amostras) com 34 mm de comprimento utilizando diferentes combinações dos parâmetros independentes de entrada (velocidade de corte  $v_c$ , avanço por dente  $f_z$  e profundidade de corte axial  $a_p$ ) através do BBD, o que resultou em 15 experimentos iniciais (ver Tab. 2) e mais três passes de otimização. Os níveis dos parâmetros foram determinados com o auxílio de catálogos sobre fresamento de aços inoxidáveis disponibilizados pelo fornecedor da ferramenta e do material utilizado nos corpos de prova.

As aquisições dos valores de  $R_a$  e  $R_z$  e dos perfis de rugosidade foram feitas em três pontos da superfície usinada de cada amostra (desconsiderando as regiões instáveis de entrada e a saída da fresa) com o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P (resolução de 0,01  $\mu$ m) empregando comprimento de amostragem 0,8 mm e comprimento de medição 4 mm.

As imagens 3D da superfície usinada foram geradas no tamanho de 2559  $\mu$ m x 1919  $\mu$ m através do interferômetro óptico Bruker Contour GT-K3D com auxílio do software VISION 64. O equipamento possui lente de 2,5x e resolução lateral de 3,998  $\mu$ m. O feixe de laser emitido possibilita a medição através da interferência das ondas.

Para a geração das curvas de AFC e ADM empregou-se o algoritmo desenvolvido por Tavares (2005), no software MATLAB R2015a, utilizando os perfis de rugosidade mais regulares, ou seja, com menor variação entre os valores dos picos e vales no comprimento de medição.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os níveis dos fatores principais fixados para o fresamento frontal. A literatura apresenta o avanço por dente ( $f_z$ ) como um parâmetro significativo em processos de acabamento gerados pelo fresamento frontal, tornando-o mais influente nos casos em que se utilizam insertos com raios de ponta ( $r_e$ ) menor. Com isso, os níveis de  $f_z$  foram determinados. As profundidades de corte axial ( $a_p$ ) foram determinadas em função do  $r_e$  (50% acima e 50% abaixo). Os dados foram estratificados em cada intervalo das variáveis de resposta  $R_a$  e  $R_z$ . Os valores médios de  $R_a$  e  $R_z$  representam a média aritmética das três medições realizadas na superfície usinada.

A combinação de parâmetros do passe 1 gerou os maiores valores de  $R_a$  (0,710  $\mu$ m) e  $R_z$  (4,027  $\mu$ m) e o passe 6 os menores valores ( $R_a = 0,293$   $\mu$ m e  $R_z = 1,977$   $\mu$ m). Em relação aos parâmetros de operação, o  $a_p$  foi igual para ambos valores de rugosidade (maior e menor). Nos menores valores a combinação de  $v_c$  maior com o menor  $f_z$  produziu um efeito benéfico na textura e está de acordo com o resultado encontrado por Sai, *et al.* (2001) no fresamento do DSS S39274. Tal fato não ocorreu na combinação da menor  $v_c$  com um maior  $f_z$ , resultando na maior rugosidade, possivelmente devido à espessura do cavaco que aumentou com o incremento de  $f_z$ , refletindo nas forças e na textura.

Tabela 2. Valores médios medidos de  $R_a$  e  $R_z$  na usinagem do aço inoxidável duplex LDX 2101.

Sequência de passes	Fatores Controláveis			Variáveis de Resposta	
	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm/dente]	$a_p$ [mm]	$R_a$ [ $\mu$ m]	$R_z$ [ $\mu$ m]
1	80	0,125	0,2	0,710	4,027
2	80	0,200	0,4	0,670	4,010
3	80	0,125	0,6	0,383	2,733
4	95	0,050	0,6	0,373	2,453
5	110	0,050	0,4	0,353	2,347
6	95	0,050	0,2	0,293	1,977
7	110	0,125	0,2	0,493	3,003
8	80	0,050	0,4	0,310	2,234
9	95	0,125	0,4	0,450	2,837
10	95	0,200	0,2	0,507	2,643
11	95	0,200	0,6	0,543	3,403
12	110	0,125	0,6	0,376	2,597
13	110	0,200	0,4	0,427	2,903
14	95	0,125	0,4	0,373	2,617
15	95	0,125	0,4	0,373	2,867
16				0,160	1,490
17	80	0,05	0,6	0,143	1,280
18				0,163	1,317

A ANOVA constatou que o efeito linear de  $f_z$  mostrou-se significativo sobre os valores médios de rugosidade, com valor-p menores que 5% e com um percentual de contribuição no acabamento gerado em  $R_a$  e  $R_z$  de 39,6% e 41%, respectivamente. Os demais fatores principais ( $v_c$  e  $a_p$ ), assim como a interação dos fatores, não foram significativos no nível de confiança de 95%. O coeficiente de determinação foi  $R^2 = 79,3\%$ , mostrando bom ajuste ao modelo.

Após os 15 passes iniciais gerou-se a otimização dos parâmetros visando minimizar simultaneamente os valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  com o auxílio do software MINITAB® 17, na qual obtiveram-se os seguintes níveis:  $v_c = 80$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm/dente e  $a_p = 0,6$  mm. Foram executados três passes de validação com o mesmo procedimento dos passes iniciais. Os menores valores gerados de  $R_a$  e  $R_z$  nos passes de validação ocorreram no passe 17.

O perfil de rugosidade do passe 17 (Fig. 1b) mostra uma uniformidade de picos e vales, o que resultou uma rugosidade média de  $R_a = 0,155 \mu$ m e  $R_z = 1,362 \mu$ m. Comparando este perfil com o do passe 6 (Fig. 1a) percebem-se menores amplitudes de picos e vales, gerando uma ondulação mais suave, validando a combinação dos parâmetros de otimização.

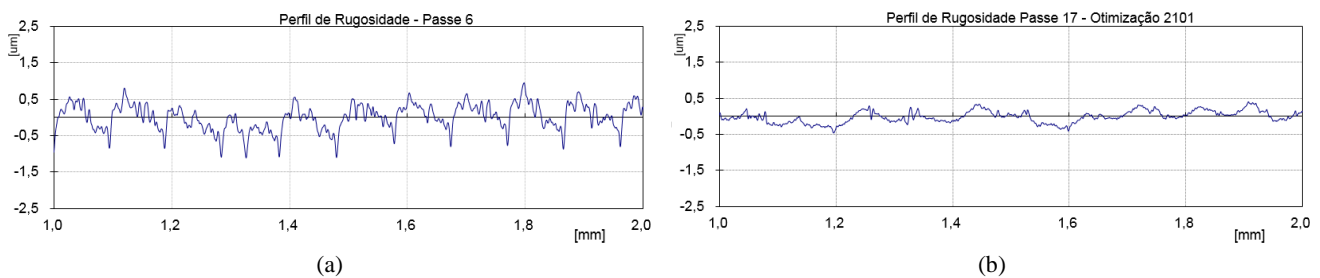


Figura 1. Perfis de rugosidade LDX 2101: a) passe 6; b) passe 17.

Para verificar a topografia dos passes 6 e 17 (ambos com  $f_z = 0,05$  mm/dente), foi analisado o perfil tridimensional das superfícies usinadas, com escala variando de  $+2,5 \mu$ m (vermelho) a  $-2,5 \mu$ m (azul) através da Fig. 2. No passe 6 (Fig. 2a), constata-se uma uniformidade dos picos e dos vales ao longo de toda a superfície, confirmando a ondulação regular do perfil. No passe 17 (Fig. 2b), os picos são menores e irregulares, e ficam concentrados em uma região à direita (indicada pela elipse). Na menor rugosidade (passe 17), a combinação de  $v_c = 80$  m/min com  $a_p = 0,6$  mm foi mais vantajosa que  $v_c = 95$  m/min com  $a_p = 0,2$  mm, proporcionando um corte mais estável e um “alisamento” dos picos, o que favoreceu a textura, pois quanto menor a rugosidade, melhor o acabamento. Ressalta-se que o fresamento é complexo e o material possui propriedades ainda não conhecidas; por isso, muitas variáveis podem contribuir para tais resultados.

Em outra análise que aborda os parâmetros estatísticos da rugosidade para os passes 6 e 17, foram geradas as curvas Abbott-Firestone (AFC) e Função Distribuição de Amplitudes (ADM). No passe 6 (Fig. 2c), há uma maior inclinação da curva AFC e na ADM (Fig. 2e) uma distribuição quase simétrica em torno da média, com dispersão dos valores (pequeno achatamento da curva). Isto denota uma variação regular de picos e vales no perfil de rugosidade, o que foi observado na análise 3D. No passe 17 (Fig. 2d), tem-se uma AFC com menor inclinação e na ADM (Fig. 2f) uma maior concentração de valores em torno da média (sutil curtose), com distribuição praticamente simétrica e rugosidade variando de  $\pm 0,3 \mu$ m.

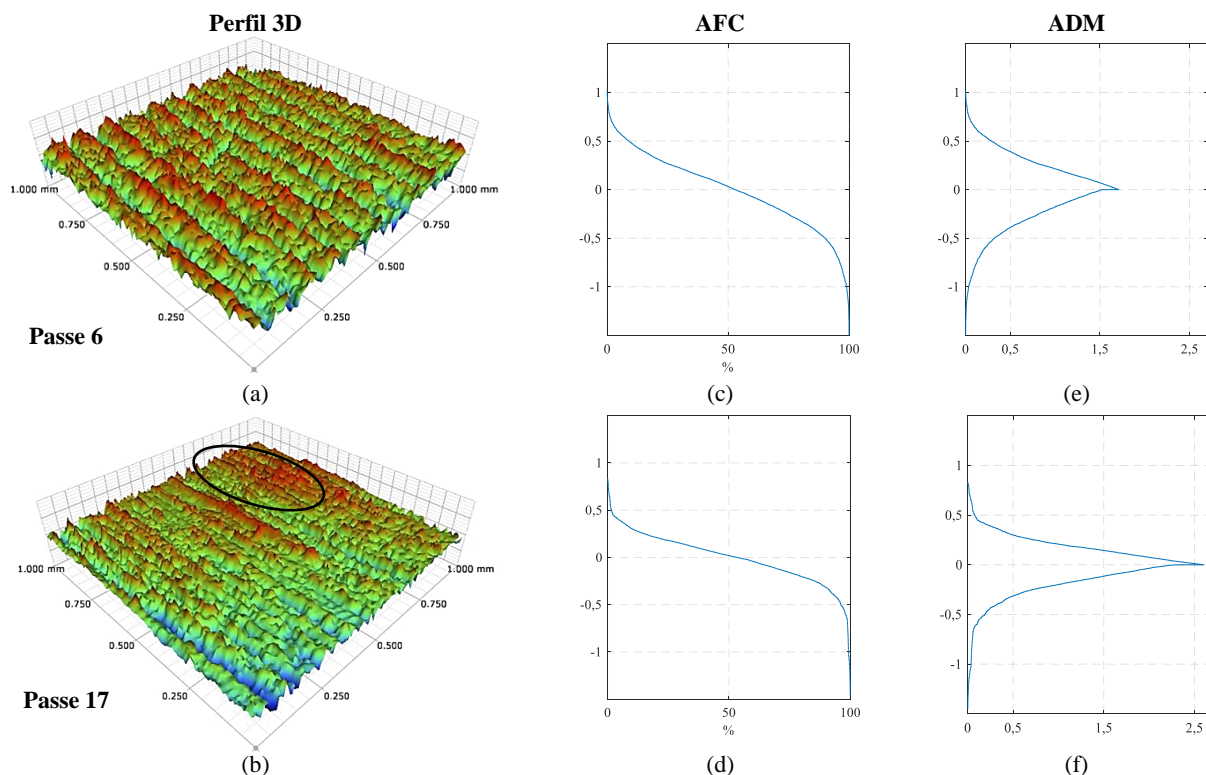


Figura 2. Perfis tridimensionais das superfícies usinadas, curvas AFC e ADM

Os valores de rugosidade obtidos por fresamento são satisfatórios na comparação com outros processos de usinagem de aços inoxidáveis, como no acabamento de superfícies planas (chapa escovada) produzidos pela Outokumpu (2018), os quais garantem rugosidade ( $R_a$ ) na faixa de 0,1 a 0,4  $\mu\text{m}$ .

#### 4. CONCLUSÕES

O presente estudo analisou o acabamento gerado nas superfícies usinadas do aço inoxidável duplex Forta LDX 2101 através do processo de fresamento frontal a seco. As principais conclusões obtidas foram:

- Dentre os parâmetros selecionados, o avanço por dente ( $f_z$ ) foi a variável de entrada mais significativa sobre os valores médios de  $R_a$  e  $R_z$ . Entretanto, a combinação dos parâmetros de corte influenciou a melhor textura da superfície.
- A análise do perfil tridimensional nas superfícies com melhor acabamento possibilitou o mapeamento da distribuição de picos e vales, permitindo uma comparação com as análises estatísticas.
- Os parâmetros estatísticos da rugosidade avaliados através das curvas de Abbott-Firestone e distribuição de amplitudes caracterizaram as diferenças aritméticas nos melhores acabamentos gerados na experimentação.
- Os menores valores de rugosidade ( $R_a = 0,155 \mu\text{m}$  e  $R_z = 1,362 \mu\text{m}$ ) foram obtidos através dos parâmetros otimizados pelo BBD ( $v_c = 80 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,05 \text{ mm/dente}$  e  $a_p = 0,6 \text{ mm}$ ), demonstram a eficiência do método e estão próximos aos valores gerados pelo processo de polimento de superfícies.

#### 5. AGRADECIMENTOS

À Outokumpu, pela doação do material; à Walter Tools, pela doação das ferramentas; ao Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio na execução dos experimentos; ao LATRIB-UFRGS, pela coleta das imagens das superfícies usinadas; ao LAFUN-UFRGS pela análise da composição química; e à CAPES (2017/1691358), pela bolsa de estudos concedida.

#### 6. REFERÊNCIAS

- IMOA, 2014. *Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels*. International Molybdenum Association, Pittsburgh, 3ª edição.
- Jebaraj, A.V., Ajaykumar, L., Deepak, C.R., Aditya, K.V.V., 2017. "Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications – A recent review". *J. Adv. Res.*, Vol. 8, n.3, p.183-199.
- Krolczyk, G.M., Nieslony, P., Legutko, S., Hloch, S., Samardzic, I., 2015. "Investigation of selected surface integrity features of duplex stainless steel (DSS) after turning". *Metallurgija*, Vol. 54, n. 1, p. 91-94.

- Larché, N., Thierry, D., Debout, V., Blanc, J., Cassagne, T., Peultier, J., Johansson, E., Tavel-Condât, C., 2011. "Crevice corrosion of duplex stainless steels in natural and chlorinated seawater". *Revue de Métallurgie*, Vol.108, n. 7-8, p. 451-463.
- Manohar, M., Joseph, J., Selvaraj, T., Sivakumar, D., 2013. "Application of Box Behnken design to optimize the parameters for turning Inconel 718 using coated carbide tools". *Int. J. Sci. Eng. Res.*, Vol. 4, n. 4, p. 620-642.
- Morelo, F., 2014. *Análise da influência do mandrilamento na integridade superficial do aço inoxidável super duplex*. Dissertação de Mestrado, UTFP, Curitiba, Brasil.
- Outokumpu, 2018. 10 Jun. 2018 <<https://www.outokumpu.com/en/products/forms/hot-rolled-coil-strip-and-plate>>
- Pawlus, P., Grabon, W., 2008. "The method of truncation parameters measurement from material ratio curve". *Prec. Eng.*, Vol. 32, n. 4, p. 342-347.
- Petropoulos, P.G.N., Pandazaras, N.P., Davim, J.P., 2010. "Surface texture characterization and evaluation related to machining". In: *Surface Integrity in Machining*, London: Springer, Cap. 2, p. 37-66.
- Philip, S.D., Chandramohan, P., Rajesh, P.K., 2015. "Prediction of surface roughness in end milling operation of duplex stainless steel using response surface methodology". *J. Eng. Sci. Tech.*, Vol. 10, n. 3, p. 340-352.
- Policena, M.R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R.F., Souza, A.J., 2018. "Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205". *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 98, n. 5-8, p. 1617-1625.
- Saï, W.B., Salah, N.B., Lebrun, J.L., 2001. "Influence of machining by finishing milling on surface characteristics", *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, Vol. 41, n. 3, p. 443-450.
- Schultheiss, F., Ståhl, J.-E., 2011. "Machinability of duplex stainless steels - A study with focus on the tool wear behavior". In: *Swedish Production Symposium 2011*, p. 271-277.
- Talus, E., 2013. *Optimal Use of Duplex Stainless Steel in Storage Tanks*. Dissertação de Mestrado, Linköping University, Suécia.
- Tavares, S.M.O., 2005. *Analysis of surface roughness and models of mechanical contacts*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia (Universit  di Pisa) / Faculdade de Engenharia (Universidade do Porto).

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informa es incluídas neste trabalho.

# ANALYSIS OF MACHINED SURFACE ROUGHNESS AFTER FINISHING END MILLING OF LEAN DUPLEX STAINLESS STEEL LDX 2101

Mauricio Rodrigues Policena<sup>1</sup>  
Rafael Farias Garcia<sup>2</sup>  
André João de Souza<sup>3</sup>

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)  
Rua Sarmento Leite, n  425 – CEP 90050-170 – Porto Alegre, RS.  
<sup>1</sup>mrpolicena@gmail.com, <sup>2</sup>rafafg1985@gmail.com, <sup>3</sup>ajsouza@ufrgs.br

**Abstract.** *The machined 2101 lean duplex stainless steels parts have been applied in petrochemical, pulp, oil and gas industry. The surface finish is closely related to the texture, being a machining output variable that reflects the process quality and robustness. Milling process has influential variables, which associated with the characteristics of the material, affect the machined surface quality that is critical for materials exposed to corrosive environments. In this way, the study analyzed the machined surface finish generated by dry end milling of Forta LDX 2101. The cutting parameters were combined, randomized and optimized by the Box-Behnken design of experiments. The  $R_a$  and  $R_z$  roughness values were measured in the different combinations, the 3D profiles of smaller roughness were recorded and the statistical profile was represented by the Abbott-Firestone Curve and the Amplitude Distribution Function. The roughness values obtained ( $R_a = 0,155 \mu\text{m}$  e  $R_z = 1,362 \mu\text{m}$ ) by the optimized values ( $v_c = 80 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0.05 \text{ mm/tooth}$  and  $a_p = 0.6 \text{ mm}$ ) were the lowest roughness levels for all measured values, and demonstrate the achievement of this method.*

**Keywords:** *LDX 2101, Surface roughness, Box-Behnken Design, Abbott-Firestone Curve, Amplitude Distribution*

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.