

## OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE NO TORNEAMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX PARA APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

Gabriel Melo Correa Pinto, gabrielmcpinto@gmail.com  
Diógenes Barbosa Teles, dbteles@ucs.br  
André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Rua Sarmento Leite, 425, Porto Alegre, RS, CEP 90050-170.

**Resumo.** As hastes de válvulas tipo esfera utilizadas em aplicações na indústria de petróleo & gás são fabricadas em materiais com elevada resistência mecânica e alta resistência à corrosão. O aço inoxidável super duplex ASTM A182 F55 apresenta estas propriedades e é utilizado na fabricação de hastes de válvula tipo esfera Trunnion, NPS 14, classe 300. O torneamento de acabamento deste componente utilizando ferramentas de metal-duro deve ser executado com parâmetros de corte adequados para atender os requisitos de baixa rugosidade e alta precisão dimensional. Isto é necessário, pois os sistemas dinâmicos de vedação das válvulas estão alojados neste componente, e a eficácia da estanqueidade está relacionada com o grau de acabamento da haste. Assim, o trabalho visa otimizar os parâmetros de corte para reduzir os valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$ . Para tanto, utilizou-se a metodologia de superfície de resposta baseada no experimento de Box-Behnken. Os parâmetros ótimos obtidos foram  $v_c = 103,3$  m/min,  $f = 0,08$  mm/volta e  $a_p = 0,7$  mm, e a combinação resultou nos menores valores de  $R_a$  ( $0,37 \mu\text{m}$ ) e  $R_z$  ( $2,16 \mu\text{m}$ ) dentre todas as combinações utilizadas.

**Palavras-chave:** Torneamento, Haste de Válvula, Super duplex, Otimização, Box-Behnken Design

**Abstract.** The ball-type valve stems used in applications in the oil & gas industry are manufactured on materials with high mechanical strength and high corrosion resistance. ASTM A182 F55 super duplex stainless steel presents these properties, and it is used in manufacturing Trunnion ball-type valve stems NPS 14, class 300. Finish turning of this component using carbide tools must be carried out with suitable cutting parameters for reaching the requirements of low surface roughness and high dimensional accuracy. This is necessary, as the dynamic valve-sealing systems are lodged in this component, and the effectiveness of the tightness is related to the degree of the stem finish. Thus, the work aims to optimize the cutting parameters to reduce  $R_a$  and  $R_z$  roughness values. For that, the response surface methodology based on the Box-Behnken Design was used. The optimal parameters obtained were  $v_c = 103.3$  m/min,  $f = 0.08$  mm/rev, and  $a_p = 0.7$  mm, and the combination resulted in the lowest values of  $R_a$  ( $0.37 \mu\text{m}$ ) and  $R_z$  ( $2.16 \mu\text{m}$ ) among all those combinations used.

**Keywords:** Turning, Valve Stem, Super Duplex, Optimization, Box-Behnken Design

### 1. INTRODUÇÃO

As válvulas industriais são equipamentos desenvolvidos para prover, bloquear ou controlar o fluxo de fluidos. Têm papel fundamental nas aplicações em que existe a necessidade de manipulação de fluidos (Skousen, 2011). As válvulas do tipo esfera são basicamente de funcionamento *on-off*, na qual uma esfera é utilizada como obturador com um orifício passante. De forma mais específica, o sistema de vedação da válvula esfera junto ao obturador pode ter dois padrões construtivos denominados flutuante e *Trunnion* (Smith e Zappe, 2004). Um dos componentes mais importantes em uma válvula do tipo esfera *Trunnion* é a haste (Fig. 1). Este elemento realiza a interligação entre a esfera da válvula, responsável pela estanqueidade do fluido e o elemento de acionamento do conjunto, que pode ser feito por meio de caixas redutoras de engrenagens e atuadores. Além disso, a haste é exposta ao ambiente interno da válvula ficando em contato com fluidos altamente corrosivos e ao ambiente externo, podendo ser marítimo e também altamente agressivo (Teles *et al.*, 2020). Na região interna da válvula, a haste deve abrigar outros componentes de suma importância para o equipamento, tais como: encaixe com a esfera, instalação de mancal autolubrificante, alojamento da vedação primária,

geralmente em material polimérico e a vedação secundária que é geralmente realizada por gaxetas à base de grafite. Na região externa da válvula, a haste na parte superior, é engastada com precisão no equipamento responsável pelo acionamento, a haste também deve conter elevada resistência mecânica para suportar os altos esforços de torção durante os acionamentos (Skousen, 2011).

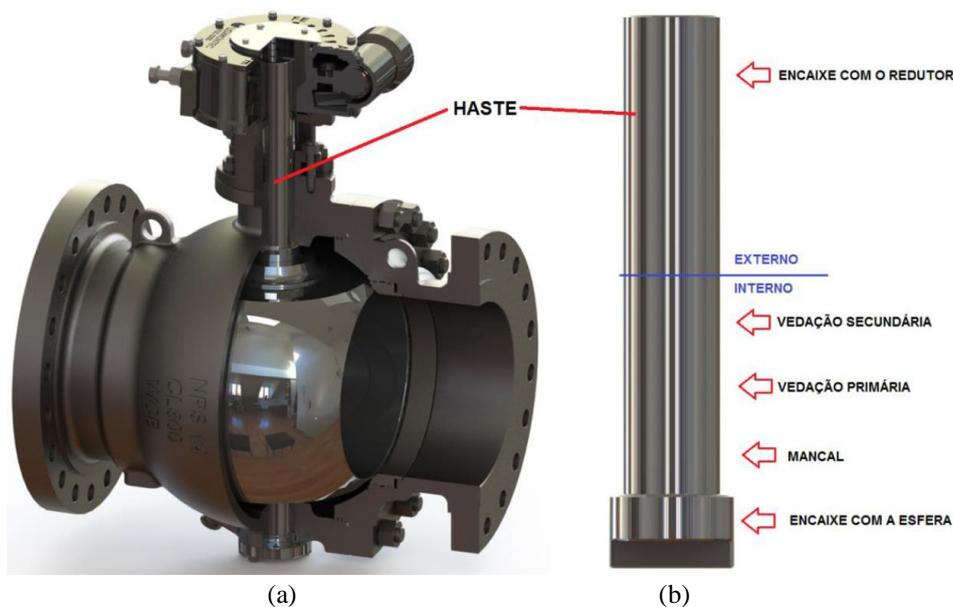


Figura 1. (a) Válvula esfera *Trunnion*, NPS 14, classe 300, 730 kg; (b) Haste da válvula indicações das regiões. (cortesia da empresa Micromazza Industria de Válvulas Ltda.)

As exigências para as válvulas industriais em instalações de exploração, produção e refino de produtos do petróleo vêm aumentando no Brasil e no mundo, principalmente na exploração em águas profundas e processamentos em unidades flutuantes de armazenamento e transferência (FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*). Essas unidades processadoras possuem a função de receber a produção de poços de petróleo submarinos e processá-los para a estabilização do óleo, separação da água produzida e gás natural (Modec, 2019). Nesse processo, os equipamentos são submetidos a ambientes altamente corrosivos com a presença de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (Oliveira e Zoghbi Filho, 2015). Para contornar tais fatores adversos, as válvulas são usualmente produzidas em ligas metálicas especiais, dentre as quais destacam-se os aços inoxidáveis super duplex (SDSS).

Os SDSS são constituídos pela combinação de vários elementos de liga que oferecem alta resistência à corrosão, alto coeficiente de endurecimento por deformação e baixa condutividade térmica (Gamarra e Diniz, 2018). Os SDSS compartilham do mesmo tipo de microestrutura bifásica dos aços inoxidáveis duplex (DSS), sendo formada por uma quantidade semelhante de ferrita e austenita, sendo diferenciados pela concentração de cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio que essas ligas apresentam, as quais modificam a sua resistência à corrosão por pites (Paiva Jr *et al.*, 2017). Devido às excelentes propriedades, os SDSS são muito utilizados na indústria de petróleo & gás, sendo expostos principalmente em ambientes corrosivos, como a água do mar. Por outro lado, essas mesmas propriedades, combinadas com a microestrutura bifásica dos aços inoxidáveis, reduzem a sua usinabilidade, gerando elevados valores de tensões residuais e deformações microestruturais na superfície usinada. Estes efeitos induzem a vibrações e levam à formação de cavacos instáveis, além de uma alta taxa de encruamento superficial e alta resistência à fratura em altas temperaturas de corte, facilitando a formação de arestas postiças de corte (APC) e desgaste rápido da ferramenta (Paiva Jr. *et al.*, 2017), pois a baixa condutividade térmica desses materiais dificulta a retirada de calor pelo cavaco e a dissipação térmica pela peça, levando a aresta de corte da ferramenta a absorver uma parcela maior do calor gerado (Gowthaman *et al.* 2020).

Os parâmetros de corte possuem influência significativa no acabamento da superfície gerada por torneamento (Garcia *et al.* 2019). As impressões deixadas pela ferramenta de corte (marcas de avanço) são defeitos de superfície inerentes ao processo de fabricação e formam um conjunto de irregularidades e erros geométricos, chamados de rugosidade. Os perfis e os parâmetros de rugosidade média ( $R_a$ ) e média parcial ( $R_z$ ) permitem avaliar as imperfeições da superfície usinada causadas pela ferramenta de corte (textura primária) ou por vibrações ou deflexões do sistema máquina-ferramenta-peça (textura secundária), sendo um bom indicativo de qualidade da peça torneada (Yamane *et al.*, 2017).

Para atender as solicitações funcionais das válvulas *Trunnion*, torna-se necessário que o processo de fabricação da haste em SDSS seja realizado de forma planejada para o atendimento às especificações do projeto e requisitos de qualidade, tais como: rugosidade, tolerâncias geométricas, circularidade e concentricidade. Outro requisito solicitado para as vedações da haste é o de baixa emissão fugitiva, de acordo com a norma ISO 15848-1 (2015), esta qualificação apresenta os critérios e taxas de vazamentos aceitáveis para o sistema de vedação da haste. Trata-se de uma qualificação

rígida na qual pode atingir uma estimativa de vazamento de 1 cm<sup>3</sup> de gás por ano. Para este atendimento, baixos valores de rugosidade são requeridos no diâmetro externo da haste em contato com as vedações (Teles et al., 2020).

Como a rugosidade pode ser afetada por diversas variáveis, torna-se essencial o estudo e a otimização dos parâmetros de corte. O projeto de experimentos de Box-Behnken (BBD) é uma ferramenta estatística baseada na metodologia de superfície de resposta que consiste em planejar experimentos e analisar dados de uma resposta que é influenciável por vários fatores. O BBD aborda um projeto fatorial incompleto, pois envolve a análise de três fatores em três níveis cada, sem analisar os extremos (combinações em que todas as variáveis estão no nível máximo ou no mínimo); considerando três execuções para validação do modelo de estimação, tem-se um total de 18 execuções (diferente das 27 execuções do fatorial completo) (Montgomery, 2013). Para exemplificar as aplicações do BBD em torneamento, Garcia et al. (2019) otimizaram os parâmetros de corte no torneamento de acabamento para a liga de alumínio 6082-T6 no corte a seco e utilizando quantidade reduzida de lubrificante.

A influência dos parâmetros de corte no torneamento de SDSS tem sido investigada por diferentes trabalhos na última década. Ahmed et al. (2017) analisaram o desempenho de insertos de metal-duro com revestimento PVD (AlTiN), CVD (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e sem revestimento durante o torneamento de desbaste do SDSS UNS S32750 ( $v_c = 120$  m/min,  $f = 0,3$  mm/volta,  $a_p = 1,0$  mm) utilizando fluido de corte em abundância. Os resultados mostraram que as amostras torneadas com inserto PVD apresentaram menor rugosidade, sem defeitos superficiais e a vida da ferramenta foi aproximadamente o dobro do inserto CVD e três vezes maior que o sem revestimento. Oliveira Jr. et al. (2014) também estudaram o torneamento do UNS S32750 e constataram que o inserto PVD sob fluido de corte a alta pressão resultou em longa vida da ferramenta, baixa rugosidade da peça e alta resistência à corrosão do material após a usinagem. Selvaraj et al. (2014) otimizaram os parâmetros de corte para o processo de torneamento a seco do DSS ASTM A890 4A (UNS S31803) e do SDSS ASTM A890 5A (UNS S32750) usando o método de Taguchi. Os experimentos foram realizados em três níveis de  $v_c$  e  $f$  com  $a_p$  constante (0,5 mm). Os resultados para ambos materiais mostram que os menores valores de rugosidade ocorreram com  $v_c$  média (100 m/min) e  $f$  baixo (0,04 mm/volta); menores forças para  $v_c$  alta (120 m/min) e  $f$  baixo; menores desgastes da ferramenta para  $v_c$  baixa (80 m/min) e  $f$  baixo. Subhash et al. (2019) investigaram a influência de  $v_c$  e  $f$  na temperatura gerada no torneamento a seco e com fluido de corte em abundância do SDSS SAF 2507 usando ferramenta de metal-duro com revestimento CVD (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN). Os autores analisaram o efeito da temperatura sobre a rugosidade da superfície usinada e o desgaste de flanco da ferramenta. A maior temperatura (860 °C) foi observada na usinagem a seco com  $v_c = 120$  m/min e, conseqüentemente, gerou maior desgaste do flanco da ferramenta (VB = 0,53 µm). Da mesma forma, esses valores diminuíram com a redução de  $v_c$  e com a utilização de fluido de corte. Por outro lado, a operação com  $v_c = 100$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta resultou em  $Ra = 0,438$  µm para o corte a seco e  $Ra = 0,693$  µm para a usinagem com fluido.

Portanto, este trabalho visa a otimização dos parâmetros de corte relacionados ao processo de torneamento de acabamento do SDSS visando a redução da rugosidade gerada na haste da válvula esfera *Trunnion*, NPS 14, classe 300.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material dos corpos de prova utilizado neste estudo é o aço inoxidável super duplex ASTM A182 F55 (UNS S32760). No ensaio metalográfico realizado, verificou-se 51% de ferrita e 49% de austenita pelo método de quantificação de fases (norma ASTM E562, 2019). A Tabela 1 apresenta a sua composição química através do espectrômetro de emissão óptica SPECTROMAXx LMX 06 em comparação à norma ASTM A182 (2020).

Tabela 1. Composição química da amostra de ASTM A182 F55 (% massa).

Elemento	Cr	Ni	Mo	Mn	Cu	W	Si	N	C	P	S
Medido	25,32	7,05	3,69	0,605	0,603	0,506	0,377	0,236	0,016	0,016	0,003
Norma	24 - 26	6 - 8	3 - 4	< 1,0	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	< 1,0	0,2 - 0,3	< 0,030	< 0,030	< 0,010

A Figura 2 ilustra a geometria dos corpos de prova. Foram fabricados dois corpos de prova (CP1 e CP2) da mesma barra forjada, divididos em nove seções (amostras) cada para análise das superfícies usinadas. A usinagem consistiu de operações de desbaste e semiacabamento utilizando o inserto de metal-duro Tungaloy código TNMG 160408-SM AH725 (raio de ponta  $r_\epsilon = 0,8$  mm). Para o torneamento de acabamento e análise de otimização dos parâmetros de corte, utilizou-se o inserto de metal-duro com revestimento PVD (TiAlSiN) Sumitomo código WNMG 060404-N-GU ( $r_\epsilon = 0,4$  mm) indicado para a usinagem de aços inoxidáveis. Em ambos os casos (desbaste e acabamento), a usinagem foi realizada no torno CNC YCM modelo TC-16 LB (potência máxima de 30kVA e rotação máxima de 4500 rpm utilizando o biolubrificante BD-Fluid B90 (Bondmann Química) em emulsão (1:15) aplicada em abundância.

As medições dos parâmetros de rugosidade  $Ra$  e  $Rz$  foram efetuadas através do rugosímetro portátil TESA modelo Rugosurf 20 utilizando filtro Gaussiano, comprimento de amostragem  $l_e = 0,8$  mm e comprimento de medição  $l_m = 5 \times l_e = 4$  mm. Os perfis de rugosidade foram adquiridos pela estação de medição Mahr modelo MarSurf XCR 20.

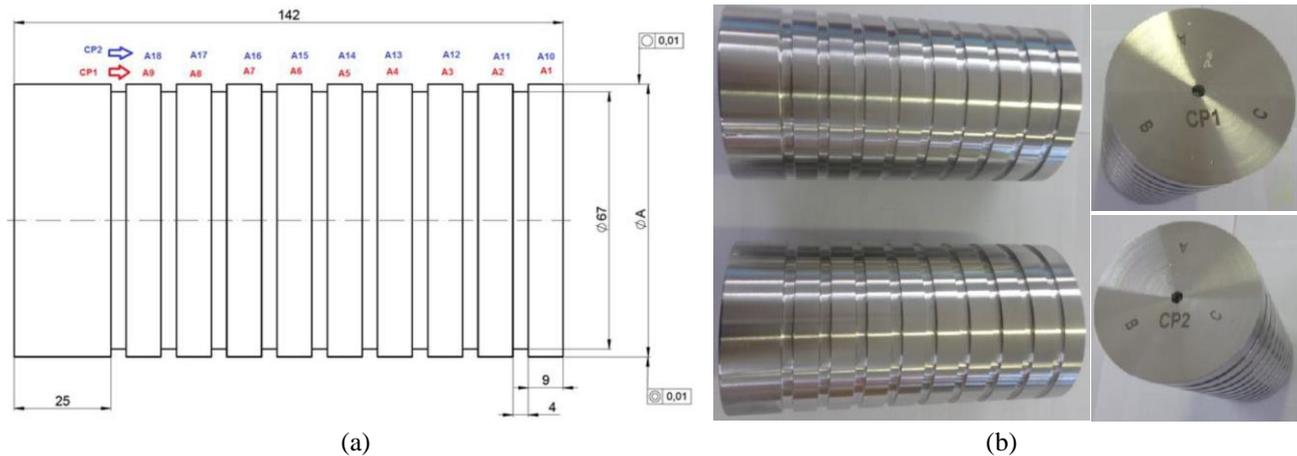


Figura 2. Corpos de prova antes da usinagem: (a) desenho (escala em mm) (b) imagens.

O projeto de experimentos de Box-Behnken (BBD) foi executado utilizando o software Minitab 19. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de usinagem utilizados como fatores controláveis de entrada. O nível médio (0) representa o conjunto padrão de valores utilizados na empresa para o torneamento de acabamento do super duplex, enquanto que os níveis alto (+1) e baixo (-1) foram definidos com base nos valores limítrofes recomendados pelo fabricante da ferramenta. A aplicação do BBD permite a combinação e randomização dos 15 passes (amostras usinadas geradas, Tab. 3), visando a minimização das variáveis de resposta (valores de  $Ra$  e  $Rz$ ).

Tabela 2. Níveis dos fatores controláveis de entrada utilizados no Box-Behnken.

Fatores Controláveis de Entrada		Níveis		
		Baixo (-1)	Médio (0)	Alto (+1)
Velocidade de corte	$v_c$ [m/min]	80	100	120
Profundidade de corte	$a_p$ [mm]	0,30	0,50	0,70
Avanço	$f$ [mm/volta]	0,08	0,12	0,16

### 3. RESULTADOS

Os valores médios de rugosidade  $Ra$  e  $Rz$  mensurados após o torneamento do ASTM A182 F55 são apresentados na Tab. 3 para as 15 diferentes combinações de parâmetros de corte. Os valores teóricos de  $Ra$  são baseados na Eq. (1) considerando  $r_e = 0,4$  mm (valor sempre maior que o avanço) (Machado *et al.*, 2015), enquanto que os de  $Rz$  foram considerados cinco vezes maior que os de  $Ra$  conforme a norma DIN EN ISO 4288 (1998).

$$Ra_{th} [\mu m] = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_e} \cong 80,19 \cdot f^2 \quad (1)$$

Com exceção das amostras geradas pelo passe 1 ( $Ra$  e  $Rz$ ) e 11 ( $Rz$ ), praticamente todos os valores teóricos calculados foram superiores aos valores mensurados experimentalmente. Vale salientar que os valores calculados são apenas indicativos, uma vez que os valores experimentais sofrem influência de outros fatores, como material e afiação da ferramenta de corte, propriedades do material da peça, cinemática do processo, atrito, lubrificação, vibrações, formação do cavaco, dentre outros (Benardos e Vosniakos, 2003).

Conforme esperado, a análise de variância (ANOVA) indicou que apenas o avanço apresenta influência significativa sobre os valores de rugosidade  $Ra$  e  $Rz$ . Evidencia-se pela Tab. 3 que os menores valores de rugosidade foram obtidos nos passes com o avanço em nível baixo ( $f = 0,08$  mm/volta) e os maiores valores nos com avanço em nível alto ( $f = 0,16$  mm/volta). Considerando o melhor acabamento, destacam-se os passes 6 e 13, ambos com  $v_c \geq 100$  m/min e  $a_p \geq 0,5$  mm. Velocidade de corte em nível baixo (passe 1) pode ter favorecido a adesão de material na ferramenta, comprometendo a qualidade da superfície usinada, enquanto a profundidade de corte em nível baixo (passe 11) pode ter gerado um aumento da dificuldade de quebrar o cavaco do material dúctil, pois  $a_p < r_e$  (Machado *et al.*, 2015).

A superfície usinada pelo passe 13 e o seu respectivo perfil de rugosidade são exibidos na Fig. 3a, em comparação com a do passe 14 (Fig. 3b), que representa o ponto central (conjunto de parâmetros adotados pela empresa para o torneamento de acabamento do super duplex). O acabamento do ponto central foi intermediário, apresentado valores de

rugosidade  $Ra$  em torno de  $0,83 \mu\text{m}$ . Percebe-se que a amostra 14 apresenta marcas de usinagem maiores e mais espaçadas em comparação com a superfície da amostra 13, que possui marcas mais finas.

Tabela 3. Valores médios de rugosidade para as 15 combinações de parâmetros.

Passes (amostras)	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$f$ [mm/volta]	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$Ra_{th}$ [mm]	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz_{th}$ [mm]
1	80	0,5	0,08	0,61	0,51	4,14	2,57
2	100	0,3	0,16	1,02	2,05	5,80	10,26
3	80	0,7	0,12	0,75	1,16	4,46	5,77
4*	100	0,5	0,12	0,75	1,16	3,83	5,77
5	120	0,3	0,12	0,78	1,16	4,23	5,77
6	100	0,7	0,08	0,39	0,51	2,44	2,57
7	80	0,3	0,12	0,89	1,16	4,37	5,77
8	120	0,5	0,16	1,50	2,05	6,37	10,26
9*	100	0,5	0,12	0,88	1,16	4,87	5,77
10	120	0,7	0,12	0,83	1,16	5,59	5,77
11	100	0,3	0,08	0,42	0,51	2,61	2,57
12	80	0,5	0,16	1,55	2,05	7,29	10,26
13	120	0,5	0,08	0,39	0,51	2,31	2,57
14*	100	0,5	0,12	0,87	1,16	4,18	5,77
15	100	0,7	0,16	1,42	2,05	6,56	10,26

\*Passes executados com os três fatores controláveis em nível médio ou ponto central (0,0,0).

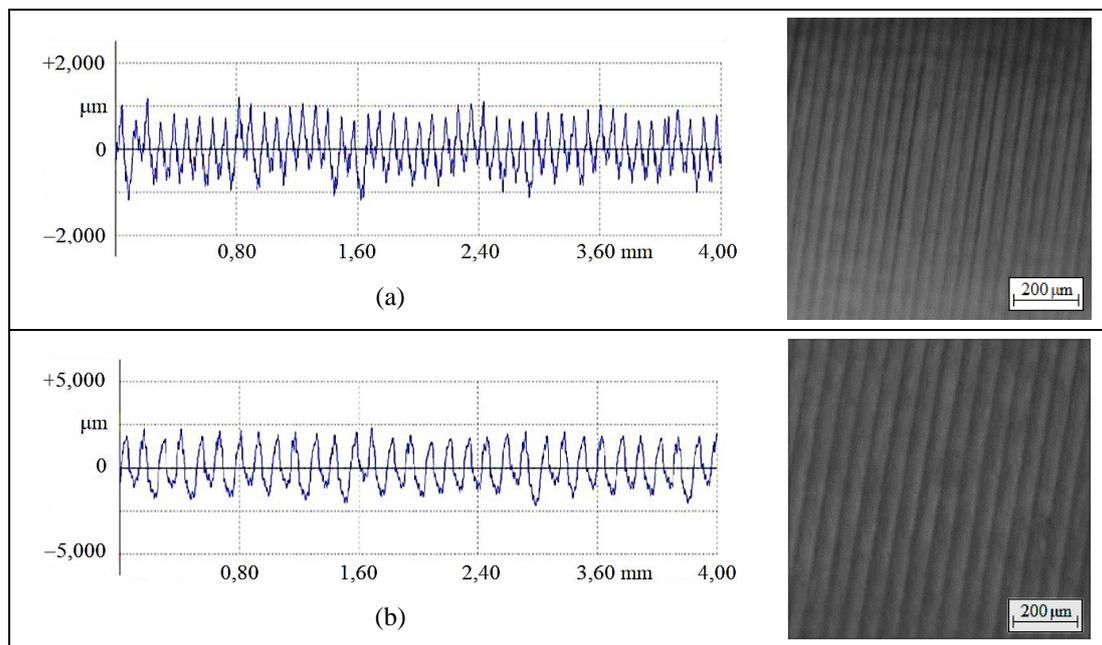


Figura 3. Perfis de rugosidade e respectivas imagem das superfícies usinadas: (a) amostra 13; (b) amostra 14.

De modo a analisar com maiores detalhes a influência da velocidade de corte e da profundidade sobre a rugosidade, a Fig. 4 apresenta os gráficos de contorno para as variáveis de resposta  $Ra$  e  $Rz$  considerando o avanço em nível baixo ( $0,08 \text{ mm/volta}$ ). Esses gráficos foram obtidos com base nos modelos de estimação obtidos via Minitab 19, cujos coeficientes de determinação  $R^2$  foram, respectivamente,  $96,6\%$  e  $92,5\%$ . Isso demonstra que os valores estimados pelo modelo estão bem próximos dos valores mensurados. Percebe-se que há uma tendência de uma menor rugosidade média ( $Ra$ ) com uma profundidade de corte maior (Fig. 4a). Como supracitado, o raio de ponta da ferramenta promove uma maior variação da espessura do cavaco, dificultando o seu cisalhamento e resultando em um cavaco mais longo, o que prejudica o acabamento da superfície usinada. Esse efeito pode ser constatado ao comparar as amostras resultantes do passe 3 ( $a_p = 0,7 \text{ mm}$ ) e do passe 7 ( $a_p = 0,3 \text{ mm}$ ), ambos com velocidade de corte em nível baixo ( $v_c = 80 \text{ m/min}$ ) e

avanço em nível médio ( $f = 0,12$  mm/volta). Na amostra 3,  $Ra = 0,75$   $\mu\text{m}$ , enquanto na amostra 7,  $Ra = 0,89$   $\mu\text{m}$ . Contudo, para a rugosidade média parcial (Fig. 4b), a situação se inverte: menor  $a_p$  tende a promover valores menores de  $Rz$ , principalmente com  $v_c = 120$  m/min, provavelmente devido às menores vibrações geradas no processo. Na amostra 5 ( $a_p = 0,3$  mm), tem-se  $Rz = 4,23$   $\mu\text{m}$ , e na amostra 10 ( $a_p = 0,7$  mm),  $Rz = 5,59$   $\mu\text{m}$ .

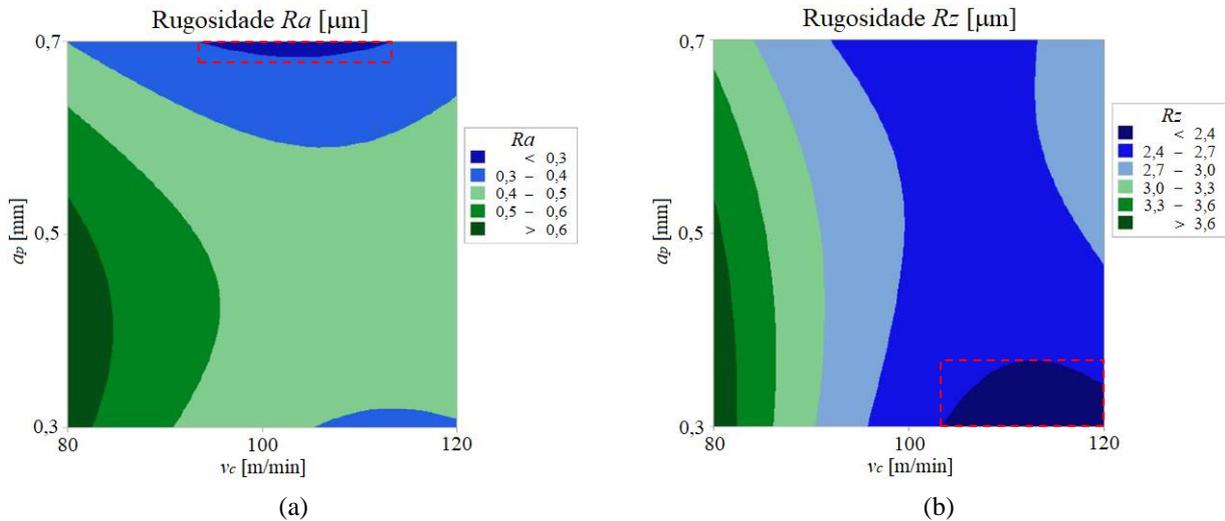


Figura 4. Gráficos de contorno para as rugosidades com diferentes  $v_c$  e  $a_p$  para  $f = 0,08$  mm/volta: (a)  $Ra$ ; (b)  $Rz$ .

Com relação à velocidade de corte, os gráficos da Fig. 4 mostram que níveis baixos tendem a resultar em um acabamento inferior. Essa tendência pode ser vista ao comparar o passe 1 ( $v_c = 80$  m/min) e o passe 13 ( $v_c = 120$  m/min), ambos com avanço em nível baixo ( $f = 0,08$  mm/volta) e profundidade de corte em nível médio ( $a_p = 0,5$  mm). Na amostra 1, tem-se  $Ra = 0,61$   $\mu\text{m}$  e  $Rz = 4,14$   $\mu\text{m}$ , e amostra 13,  $Ra = 0,39$   $\mu\text{m}$  e  $Rz = 2,31$   $\mu\text{m}$ . Como o aço inoxidável super duplex é dúctil, altas velocidades são necessárias para facilitar o escoamento do cavaco e não formar rebarbas, o que é benéfico para o acabamento. Além disso, Machado *et al.* (2015) explica que  $v_c$  pode afetar o acabamento de outras duas formas: (i) em níveis baixos de  $v_c$ , há maior chance de ocorrer adesão na ferramenta e gerar aresta postiça de corte, prejudicando o acabamento; (ii) níveis altos de  $v_c$  geram mais calor e maiores temperaturas na região de corte são alcançadas, o que reduz a resistência ao cisalhamento do material da peça, facilita a penetração da ferramenta, diminui as forças de usinagem (e, por conseguinte, as vibrações) e melhora o acabamento. Ao analisar os passes 3 ( $v_c = 80$  m/min) e 10 ( $v_c = 120$  m/min), ambos com  $f$  médio (0,12 mm/volta) e  $a_p$  alto (0,7 mm), imaginava-se o mesmo efeito; porém, ao comparar as rugosidades ( $Ra = 0,75$   $\mu\text{m}$  e  $Rz = 4,46$   $\mu\text{m}$  na amostra 3 e  $Ra = 0,83$   $\mu\text{m}$  e  $Rz = 5,59$   $\mu\text{m}$  na amostra 10), percebe-se que a maior  $v_c$  do passe 10 apresentou uma rugosidade maior (principalmente  $Rz$ ), provavelmente devido ao aumento das vibrações com o maior nível dos parâmetros de corte empregados.

Após criar os modelos adequados para cada resposta, determinou-se simultaneamente o conjunto de parâmetros ótimos para as rugosidades média ( $Ra$ ) e média parcial ( $Rz$ ) através de um modelo de regressão. Os menores valores médios de rugosidade encontrados nos 15 passes realizados foram  $Ra = 0,39$   $\mu\text{m}$  e  $Rz = 2,31$   $\mu\text{m}$ . Dessa forma, buscando uma alteração da classe de rugosidade de N5 para N4 para a otimização, foi selecionado como alvo os valores de  $Ra = 0,2$   $\mu\text{m}$  e  $Rz = 1,0$   $\mu\text{m}$ . Conforme esperado, o avanço otimizado foi o nível baixo ( $f = 0,08$  mm/volta). A profundidade de corte otimizada foi a nível alto ( $a_p = 0,7$  mm), sendo coerente com as discussões e mecanismos apresentados. O nível da  $v_c$  otimizada (103,3 m/min) ficou próximo do valor médio (100 m/min). Isso provavelmente está associado ao fato de que maiores  $v_c$  também levam às maiores oscilações do eixo, o que incrementa  $Rz$  e é prejudicial ao acabamento (Machado *et al.*, 2015). Assim, três passes foram realizados com os parâmetros otimizados nas mesmas condições operacionais que os 15 passes iniciais, e os resultados (valores médios) são apresentados na Tab. 4.

Tabela 4. Valores de rugosidade após usinagem com os parâmetros otimizados.

Passes	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$f$ [mm/volta]	$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]
16	103,3	0,7	0,08	0,37	2,21
17				0,37	2,17
18				0,38	2,09
Média				0,373	2,157

Os valores de  $Ra$  e  $Rz$  gerados foram inferiores aos obtidos nos passes 6, 11 e 13 (melhores resultados), mostrando a efetividade da otimização. Assim, o ligeiro aumento na velocidade de corte no conjunto otimizado resultou em uma melhora do acabamento (principalmente  $Rz$ ). A Figura 5 ilustra o perfil de rugosidade e a imagem da superfície usinada da amostra 17 em comparação com a amostra 6, em que foram utilizados parâmetros de corte semelhantes aos otimizados. Comparando os perfis, a amostra 6 possui mais picos próximos da altura de  $1\ \mu\text{m}$  que o perfil otimizado da amostra 17.

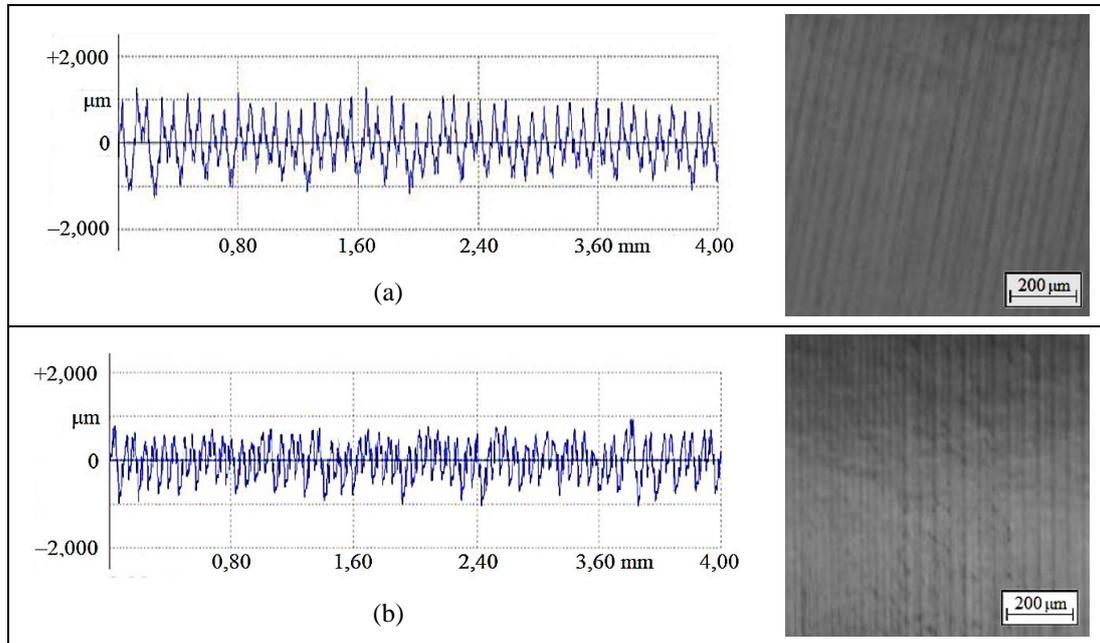


Figura 5. Perfis de rugosidade e respectivas imagem das superfícies usinadas: (a) amostra 6; (b) amostra 17.

Em comparação com os parâmetros utilizados na empresa para o torneamento de acabamento do super duplex (ponto central), o acabamento gerado pelo conjunto otimizado foi melhor. Contudo, em razão do ambiente industrial considerar diversos outros fatores que não foram abordados nesse estudo (como vida da ferramenta), a taxa de remoção de material foi calculada com o intuito de trazer uma comparação de produtividade. O conjunto otimizado possibilita uma taxa de remoção de material de  $5,8\ \text{cm}^3/\text{min}$ , enquanto o ponto central gera uma taxa de  $6,0\ \text{cm}^3/\text{min}$ . Isso mostra que ambos apresentam uma produtividade semelhante.

Segundo Parker (2006), para vedações poliméricas do tipo *Lip-Seal* em eixos, para aplicações em gases e combustíveis, as menores taxas de vazamento e aumento da vida da vedação são encontradas em valores de rugosidade média  $Ra < 0,4\ \mu\text{m}$ . A otimização dos parâmetros no estudo abordado neste trabalho permitiu atingir este grau de acabamento em torneamento, sem a necessidade de acrescentar outros processos tais como retificação e lapidação, o que acarretaria em maior custo e maior tempo de fabricação.

#### 4. CONCLUSÕES

Buscou-se otimizar os parâmetros de corte no torneamento do aço super duplex ASTM 182 F55 visando o melhor acabamento. Com base nos resultados, as principais conclusões foram:

- A ANOVA confirmou que o avanço ( $f$ ) é o parâmetro mais significativo sobre os valores de rugosidade  $Ra$  e  $Rz$ .
- O projeto de experimento de Box-Behnken permitiu analisar os dados e criar modelos adequados para as respostas  $Ra$  e  $Rz$ , com coeficientes de determinação de 96,6% e 92,5%, respectivamente. Além disso, permitiu determinar o conjunto de parâmetros otimizados, visando valores baixos de rugosidade. Os níveis dos parâmetros otimizados foram  $v_c = 103,3\ \text{m/min}$ ,  $a_p = 0,7\ \text{mm}$  e  $f = 0,08\ \text{mm/volta}$ .
- Para os passes iniciais, os menores valores de rugosidade foram obtidos na amostra 13 ( $Ra = 0,39\ \mu\text{m}$  e  $Rz = 2,31\ \mu\text{m}$ ). Contudo, o melhor acabamento foi gerado nos passes otimizados, apresentando valores médios de rugosidade  $Ra = 0,37\ \mu\text{m}$  e  $Rz = 2,16\ \mu\text{m}$ .
- A haste da válvula do tipo esfera *Trunnion*, NPS 14, classe 300, quando usinada com os parâmetros otimizados, poderá apresentar menor rugosidade e conseqüentemente melhor desempenho nos sistemas de vedações. A utilização de diferentes meios lubrificantes nessa usinagem, a aplicação prática do componente no equipamento e a verificação de sua eficiência no grau de vedação são sugestões de trabalhos futuros como continuidade do estudo.

## 5. AGRADECIMENTOS

As empresas Micromazza Industria de Válvulas Ltda. (Vila Flores, RS) e Stihl Ferramentas Motorizadas Ltda. (São Leopoldo, RS), pelo suporte prestado na realização dos experimentos.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, Y.S., Paiva, J.M., Covelli, D. e Veldhuis, S.C., 2017. “Investigation of coated cutting tool performance during machining of super duplex stainless steels through 3D wear evaluations”. *Coatings*, Vol. 7, p. 127.
- ASTM A182, 2020. *Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Fittings, Forged Fittings, and Valves Parts for High-Temperature Service*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM E562, 2019. *Standard Test Methods for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Benardos, P.G. e Vosniakos, G.-C., 2003. “Predicting surface roughness in machining: a review”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, p. 833-844.
- DIN EN ISO 4288, 1998. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface Texture: Profile Method - Rules And Procedures For The Assessment Of Surface Texture*. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.
- Gamarra, J.R. e Diniz, A.E., 2018. “Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 40, p. 39.
- Garcia, R.F.; Feix, E.C.; Mendel, H.T.; Gonzalez, A.R. e Souza, A.J., 2019. “Optimization of cutting parameters for finish turning of 6082-T6 aluminum alloy under dry and RQL conditions”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, p. 317.
- Gowthaman, P.S., Jeyakumar, S., e Saravanan, B.A., 2020. “Machinability and tool wear mechanism of duplex stainless steel – a review”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 26, p. 1423-1429.
- ISO 15848-1, 2015. *Industrial valves - Measurement, test and qualification procedures for fugitive emissions - Part 1: Classification system and qualification procedures for type testing of valves*. International Standardization for Organization, Geneva, Switzerland.
- Machado, Á.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. e Silva, M.B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Blücher, São Paulo.
- Modec, 2019. *Valve Specification: FPSO Almirante Barroso MV32*. FPSO Project to Petrobras by Modec, Inc.
- Montgomery, D., 2013. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Arizona State University, 8<sup>th</sup> edition.
- Oliveira Jr., C.A., Diniz, A.E. e Bertazzoli, R., 2014. “Correlating tool wear, surface roughness and corrosion resistance in the turning process of super duplex stainless steel”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 36, p. 775-785.
- Oliveira, J.J.M. e Zoghbi Filho, J.R.B., 2015. “O pré-sal brasileiro e o problema da corrosão por CO<sub>2</sub>”. *Revista da Pós-Graduação da Faculdade do Centro Leste*, Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo & Gás Natural.
- Paiva Jr., J.M.F., Amorim, F.L., Soares Jr., P.C., Veldhuis, S.C., Mendes, L.A. e Torres, R.D., 2017. “Tribological behavior of super duplex stainless steel against PVD hard coatings on cemented carbide”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, p. 1649-1658.
- Parker, 2006. *PTFE Lip Seal Design Guide*. Parker Hannifin Corporation, Catalog EPS 5340, Salt Lake City, USA.
- Selvaraj, D.P., Chandramohan, P. e Mohanraj, M., 2014. “Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method”. *Measurement*, Vol. 49, p. 205-2015.
- Smith, P. e Zappe, R.W., 2004. *Valve Selection Handbook: Engineering Fundamentals for Selecting the Right Valve Design for Every Industrial Flow Application*. Elsevier Science Ltd., London, 5<sup>th</sup> edition.
- Skousen, P.L., 2011. *Valve Handbook*. McGraw-Hill, New York, 3<sup>rd</sup> edition.
- Subhash, N., Sambadana, S., Nithin Raj, P. e Jagadeesha, T., 2019. “Experimental study on tool wear and optimization of process parameters using ANN-GA in turning of super-duplex stainless steel under dry and wet conditions”. In: *Advances in Manufacturing Technology*, Springer, Singapore, p. 411-420.
- Teles, D.B., Gouveia, S.M. e Clarke, T.G.R., 2020. “Identification of leakage in ball valves by analysis of pressure and torque signatures in cyclical tests under critical operating conditions”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 117, p. 104828.
- Yamane, Y., Ryutaro, T., Tadanori, S., Ramirez, I.M., Keiji, Y., 2017. “A new quantitative evaluation for characteristic of surface roughness in turning”. *Precision Engineering*, Vol. 50, p. 20-26.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.