

FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AISI 316 EM AMOSTRAS COM DIFERENTES PERCENTUAIS DE ELEMENTOS DE LIGA

Matheus Nunes Duran¹

Rafael Farias Garcia²

Mauricio Rodrigues Policena³

André João de Souza⁴

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Sarmento Leite, nº 425
CEP 90.050-170 – Porto Alegre, RS.

¹matheusnduran@hotmail.com, ²rafafg1985@gmail.com, ³mrpolicena@gmail.com, ⁴ajsouza@ufrgs.br

Resumo. O trabalho apresenta uma investigação sobre a influência do percentual em massa de boro, cobalto, titânio e vanádio entre duas amostras diferentes (Tipo A e Tipo B) de aço inoxidável austenítico AISI 316 sobre a força de usinagem (F_U) e sobre a rugosidade média (R_a) geradas durante o fresamento frontal de acabamento com fluido de corte em abundância. Utilizou-se o projeto de experimentos Box-Behnken para determinar as combinações dos fatores controláveis (profundidade de corte axial a_p , avanço por dente f_z e velocidade de corte v_c) sobre as variáveis de resposta do experimento (F_U e R_a). Para a força de usinagem, os parâmetros a_p e f_z foram significativos para ambos os tipos. No Tipo B, a v_c também representou influência significativa. A parcela estática de F_U mostrou similaridade nos dois materiais, enquanto que a parcela dinâmica foi maior para o Tipo B. Isto se deu possivelmente devido aos maiores teores de boro e cobalto que promovem maior dureza e maior resistência ao cisalhamento. Para a rugosidade, a_p foi o parâmetro mais significativo. Os teores de titânio e vanádio não afetaram R_a provavelmente por causa dos valores de v_c combinados com a presença de fluido de corte em abundância.

Palavras chave: Aço inoxidável austenítico AISI 316, Elementos de liga, Força de usinagem, Rugosidade média.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos são materiais que possuem grande aplicação devido à sua resistência à corrosão. Estes materiais têm como principal elemento de liga o cromo ($Cr > 12\%$). São muito comuns comercialmente e podem conter aditivos para melhorar seu desempenho em serviço. Dentro desta classe encontra-se a liga AISI 316. A sua principal particularidade é a presença de molibdênio ($Mo = 2\sim 3\%$) que confere ainda mais resistência à corrosão, especialmente em ambientes clorídricos. Por outro lado, estas propriedades dificultam a sua usinagem (IMO, 2014).

Alguns fatores contribuem para a redução da usinabilidade dos aços inoxidáveis: baixa condutividade térmica, alta tenacidade, tendência a formar aresta postiça de corte (APC), alta taxa de encruamento e elevada ductilidade. Além disso, a usinagem dos aços inoxidáveis gera: elevadas forças de corte, alto consumo de potência e rápido encruamento durante a usinagem. Proporcionam ainda vibração (flutuações das forças de usinagem) durante o processo, reduzindo a qualidade da textura da superfície usinada (Krabbe, 2007). Além de Cr e Mo, outros elementos de liga reduzem a sua usinabilidade. Em geral, a presença de cobalto (Co) aumenta a resistência à deformação do material, gerando aumento das forças de corte e maior resistência ao cisalhamento (Zaman, *et al.*, 2017). O boro (B) tem efeitos similares ao Co, uma vez que o seu principal propósito é a elevação da dureza do material. A baixa usinabilidade também está associada com a presença de vanádio (V) e titânio (Ti). O primeiro (V), tem a função de refinar os grãos para aumentar a resistência mecânica e a tenacidade (Tither, 2001); quando adicionado ao aço, gera aumento da ductilidade produzindo cavacos mais longos, o que dificulta a quebra do cavaco, podendo prejudicar a qualidade da superfície usinada (Machado, *et al.*, 2015). Já o titânio (Ti) tem influências relacionadas à: redução da condutividade térmica e aumento da reatividade química do material com a ferramenta de corte (Capus, 2005).

Uma forma de avaliação da usinabilidade de um material é através das forças geradas no processo. Em geral, quanto maior a força envolvida, maior é a dificuldade para usar o material (baixa usinabilidade) (Barbosa, 2014). Outra forma de avaliar um processo de usinagem é através da rugosidade. Esta pode ser representada por finas irregularidades (ou erros microgeométricos) que são resultantes da ação intrínseca ao corte. Tais variáveis de saída (força e rugosidade) dependem da geometria da ferramenta de corte, do material da peça, da rigidez da máquina-ferramenta, dos parâmetros de corte, do meio lubrificante, etc. (Machado *et al.*, 2015).

A utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem é uma alternativa para minimizar o atrito gerado nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Sreejith (2008) aborda a influência destes sobre interface ferramenta-peça e suas considerações sobre os aspectos tribológicos. Estes fluidos, especialmente quando aplicados em abundância, aumentam a vida da ferramenta, facilitam a quebra do cavaco (uma vez que diminui o seu raio de curvatura natural e eleva o seu nível de tensões) e melhoram o acabamento da superfície usinada.

Todas estas variáveis inerentes aos processos de usinagem tornam necessário um maior investimento em técnicas que auxiliem na obtenção das melhores condições de corte. Por isso, o planejamento e execução de experimentos envolvendo a usinagem de aços inoxidáveis é um grande desafio.

Deste modo, é importante entender a contribuição dos fatores controláveis [velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z) e profundidade axial de corte (a_p)] sobre as variáveis de resposta (forças e rugosidades) no processo de fresamento frontal. Uma investigação adequada pode ser realizada através do projeto de experimentos (DOE). Para Manohar et al. (2013), um método utilizado para a obtenção das melhores combinações de parâmetros é o Box-Behnken Design (BBD). De acordo com Baumgaertner (2017), o BBD é um método estatístico fatorial incompleto de superfície de resposta que realiza o planejamento, análise e possibilita a otimização de três fatores influentes no processo. Cada fator é estudado em apenas três níveis (-1, 0, +1). Esta metodologia tem como vantagens a redução do número de ensaios necessários e a possibilidade de definir a relevância de cada fator controlável nas variáveis dependentes.

Assim, o objetivo deste trabalho é investigar através do BBD a influência dos teores de certos elementos de liga (Co, V, Ti, B) na usinabilidade de dois diferentes tipos de aço inoxidável austenítico AISI 316 (Tipo A e Tipo B). Este estudo comparativo foi realizado através do fresamento frontal de acabamento com fluido de corte em abundância. A influência dos teores foi quantificada através do seu efeito sobre as variáveis de resposta força de usinagem ($F_U = \mu F_U \pm \Delta F_U$) e rugosidade média (R_a) com a variação dos fatores controláveis (v_c , f_z e a_p).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta o percentual dos elementos de liga encontrados na análise da composição química dos corpos de prova usinados nos experimentos. Em destaque estão os elementos de liga que diferenciam os aços inoxidáveis austeníticos AISI 316 investigados (tipos A e B). O equipamento de leitura óptica usado para obtenção das informações foi o Spectrolab modelo LVFA18B disponível no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF/UFRGS). Demais elementos existentes na composição deste material encontram-se dentro das especificações exigidas pela ASM 1995.

Tabela1. Elementos de liga das amostras usinadas (% peso).

	Co	V	Nb	W	Ti	Pb	Al	B	Sn
Tipo A	0,080	0,106	0,020	0,013	0,026	0,001	0,008	<0,001	0,004
Tipo B	0,192	0,038	0,026	0,011	0,004	0,004	0,003	0,001	0,001

Três corpos de prova (placas com 100 × 90 × 6 mm) de cada um dos tipos (A e B) foram previamente selecionados e dimensionados para fixação no dinamômetro. Em cada corpo de prova foram realizados passes (amostras) com 34 mm de comprimento, um passe para cada combinação de parâmetros em estudo. Seis amostras foram geradas em dois corpos de prova e três amostras em um corpo de prova, totalizando 15 amostras em cada tipo (A e B).

Os experimentos foram realizados no centro de usinagem ROMI Discovery 308 (rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW) disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS). Na usinagem dos corpos de prova foi utilizado o biolubrificante isento de óleos Bondmann BD-Fluid B90 na condição abundante.

Utilizou-se como ferramenta de corte uma fresa de topo Walter Tools Xtra-tec® F4042R.W20.02 com diâmetro de 20 mm e dois insertos Tiger-tec Silver® ADMT10T312R-F56 WSM35 com raio de ponta $r_e = 1,2$ mm. Esses insertos possuem cobertura PVD de TiAlN + Al₂O₃. São ferramentas Classe M, destinadas para usinagem de aços inoxidáveis.

Com o auxílio do BBD, utilizando o software Minitab®17, os parâmetros foram combinados e aleatorizados através dos níveis (-1), (0) e (+1) de cada fator. Os níveis adotados para os parâmetros de entrada do processo de usinagem foram: $v_c = 120, 160$ e 200 m/min; $f_z = 0,05, 0,10$ e $0,15$ mm/z; e $a_p = 0,6, 1,2$ e $1,8$ mm.

Para aquisição das componentes ortogonais da força de usinagem (F_U) foi utilizado um dinamômetro piezelétrico Kistler® modelo 9129AA e o condicionador de sinais Kistler® modelo 5070A. Os sinais de força foram coletados a uma taxa de aquisição de 5 kHz, devidamente processados e posteriormente visualizados nas três direções (F_x , F_y e F_z) com o auxílio do software LabVIEW® 9.0 utilizando uma VI (Virtual Instrument) específica. Os dados de força foram coletados ao longo de todo o comprimento usinado em cada passe. A parcela estática (μF_U) exprime o valor médio da força de usinagem para o intervalo estável de amostragem considerado (desconsiderando a entrada e a saída da fresa), enquanto que a parcela dinâmica (ΔF_U) constitui a flutuação da força. No caso, $\Delta F_U = \pm 1,96 \cdot \sigma$ (intervalo de confiança de 95%) onde σ é o desvio-padrão da força F_U para o mesmo intervalo. Assim, conforme Equação (1):

$$F_U = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \mu F_U \pm \Delta F_U \quad (1)$$

Após a realização dos 15 passes (geração das 15 amostras), os perfis de rugosidade de cada superfície foram coletados na região estável de usinagem, ou seja, no centro do corpo de prova, desconsiderando a região do início e final da amostra usinada. Com o auxílio do rugosímetro portátil Mitutoyo® SJ-201P com resolução de 0,01 μ m, empregando comprimento de amostragem 0,8 mm e comprimento de medição 4 mm. Os valores considerados na avaliação da rugosidade média (R_a) correspondem ao resultado médio da medição de três trechos dispostos nas regiões estáveis da

superfície usinada em cada passe. A variação dos valores de R_a foi definida a partir da máxima variação da indicação em relação ao valor médio (ΔI_{max}), conforme Equação (2).

$$R_a = \mu R_a \pm \Delta I_{max} \quad (2)$$

Posteriormente, os dados foram estratificados e analisados conforme o método proposto. Na ANOVA dos valores médios medidos, em cada análise foi utilizado um intervalo de confiança de 95%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os valores de força (F_U) e rugosidade (R_a) obtidos na experimentação para os diferentes passes utilizando três níveis de velocidade de corte (v_c), três de avanço por dente (f_z) e três de profundidade axial de corte (a_p). As amostras 2, 7, 13 e 15 encontram-se destacadas na Tab. 2, apresentando os melhores e piores resultados encontrados.

Tabela 2. Valores de força e rugosidade gerados para os Tipos A e B do AISI 316.

Passes (Amostras)	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	Tipo A		Tipo B	
				$\mu F_U \pm \Delta F_U$ [N]	$\mu R_a \pm \Delta I_{max}$ [μ m]	$\mu F_U \pm \Delta F_U$ [N]	$\mu R_a \pm \Delta I_{max}$ [μ m]
1	200	0,05	1,2	226 $\pm$ 173	0,54 $\pm$ 0,29	229 $\pm$ 211	0,50 $\pm$ 0,17
2	120	0,10	1,8	344 $\pm$ 313	0,93 $\pm$ 0,16	357 $\pm$ 367	0,75 $\pm$ 0,12
3	200	0,10	0,6	206 $\pm$ 86	0,36 $\pm$ 0,10	207 $\pm$ 131	0,46 $\pm$ 0,04
4	200	0,10	1,8	342 $\pm$ 291	0,52 $\pm$ 0,05	341 $\pm$ 335	0,56 $\pm$ 0,09
5	160	0,10	1,2	284 $\pm$ 200	0,53 $\pm$ 0,08	280 $\pm$ 246	0,60 $\pm$ 0,07
6	160	0,10	1,2	282 $\pm$ 201	0,58 $\pm$ 0,03	277 $\pm$ 249	0,61 $\pm$ 0,06
7	160	0,05	0,6	162 $\pm$ 81	0,53 $\pm$ 0,03	156 $\pm$ 127	0,51 $\pm$ 0,06
8	120	0,15	1,2	328 $\pm$ 260	0,61 $\pm$ 0,30	343 $\pm$ 329	0,72 $\pm$ 0,13
9	160	0,10	1,2	279 $\pm$ 200	0,53 $\pm$ 0,01	274 $\pm$ 245	0,39 $\pm$ 0,03
10	120	0,05	1,2	218 $\pm$ 160	0,30 $\pm$ 0,02	215 $\pm$ 200	0,50 $\pm$ 0,01
11	160	0,05	1,8	253 $\pm$ 230	0,92 $\pm$ 0,12	261 $\pm$ 271	0,64 $\pm$ 0,07
12	200	0,15	1,2	316 $\pm$ 246	0,62 $\pm$ 0,24	316 $\pm$ 290	0,60 $\pm$ 0,13
13	120	0,10	0,6	190 $\pm$ 113	0,27 $\pm$ 0,03	198 $\pm$ 147	0,36 $\pm$ 0,02
14	160	0,15	0,6	226 $\pm$ 108	0,55 $\pm$ 0,22	234 $\pm$ 153	0,36 $\pm$ 0,05
15	160	0,15	1,8	394 $\pm$ 380	0,84 $\pm$ 0,19	415 $\pm$ 421	0,74 $\pm$ 0,10

Os menores valores da força de usinagem F_U para ambos os tipos (A e B) ocorreram no Passe 7 (menores f_z e a_p) e os maiores no Passe 15 (maiores f_z e a_p). Como o f_z e a_p possuem contribuição significativa na resposta de μF_U e ΔF_U , foram gerados gráficos de contorno para comparação do comportamento de μF_U (Fig. 1a) e ΔF_U (Fig. 1b) em relação aos parâmetros citados para ambos os tipos de AISI 316.

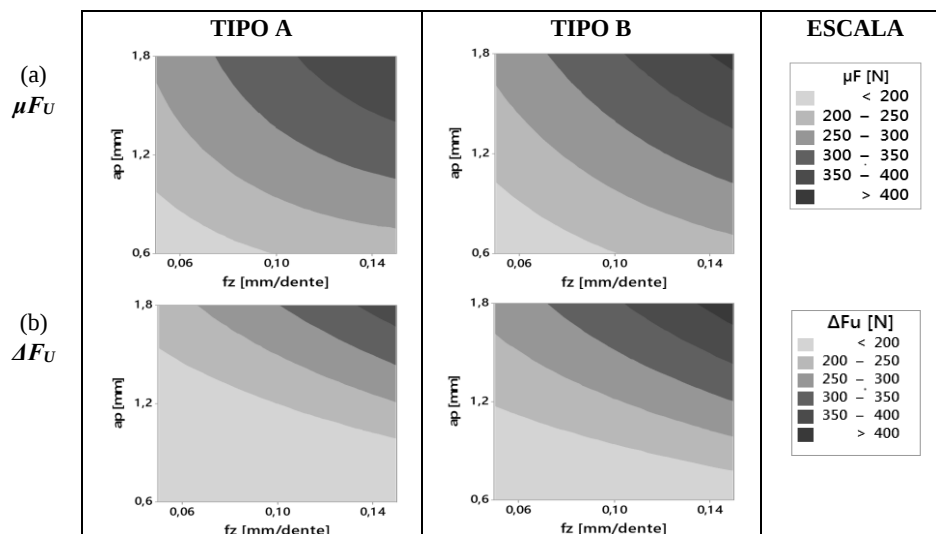


Figura 1. Gráficos de contorno para $v_c = 160$ m/min: (a) parcela estática; (b) parcela dinâmica

Para verificar estatisticamente qual fator (a_p ou f_z) apresentou maior influência sobre a variável resposta F_U , realizou-se a ANOVA para levantamento de p-valor e a contribuição de cada fator (individual, quadrático ou interação). Os coeficientes de correlação (R^2) obtidos nas avaliações das parcelas μF_U e ΔF_U resultantes da usinagem de ambos os materiais foram superiores a 99,6%. Na usinagem do Tipo A os fatores individuais a_p e f_z tiveram contribuições de 61,8% e 33,7%, respectivamente sobre μF_U . Para o Tipo B, as contribuições sobre μF_U foram semelhantes (60,6% e 36% respectivamente). Em ambos os materiais, os demais efeitos sobre μF_U apresentaram contribuições inferiores a 2,4%. Considerando ΔF_U , as contribuições de a_p e f_z foram de 80,9% e 14,5% (Tipo A) e de 78,2% e 16,5% (Tipo B), respectivamente. Em ambos os materiais, os demais efeitos sobre ΔF_U foram inferiores a 3,6%.

Percebe-se que μF_U praticamente não difere entre os tipos A e B. Entretanto, ΔF_U na usinagem do Tipo B é sempre superior à gerada no Tipo A no intervalo de valores utilizados. Segundo Zaman et al. (2017), a presença de cobalto (Co), combinado com Cr e Mo, influencia na baixa condutividade térmica, altas taxas de encruamento e elevada dureza (redutores da usinabilidade). Portanto, o maior percentual de Co na composição química do Tipo B pode ser responsável pelo aumento da dificuldade em cisalhar o material em comparação ao Tipo A, verificando-se, portanto, acréscimos de ΔF_U durante o fresamento deste material. Isto é perceptível pela comparação detalhada na Figura 1b. Como supracitado, o boro (B) tem efeito similar ao Co. Deste modo, os efeitos combinados de Co e B podem ter sido causadores do aumento da resistência ao cisalhamento no Tipo B e, por consequência, gerado maiores vibrações e instabilidades durante o fresamento deste, resultando em maior variação da força durante os passes.

Na mesma aleatorização gerada pelo BBD (Tab. 1), para ambos os tipos (A e B), os menores valores de rugosidade média (R_a) foram gerados no Passe 13. Comparando com o Passe 2 (maior R_a), em que somente a_p aumenta (nível superior), tem-se um incremento expressivo dos valores de R_a .

Na ANOVA, mesmo que a literatura diga que o avanço por dente (f_z) é o parâmetro mais significativo sobre os valores de R_a , neste caso, em função da geometria do inserto ($r_e = 1,2$ mm), o único parâmetro significativo na resposta para ambos os materiais (considerando um intervalo de confiança de 95%) foi a profundidade axial de corte (a_p). Neste caso, a_p teve contribuição de 51,8% na usinagem do Tipo A ($R^2 = 87,4\%$) e 54,3% na do Tipo B ($R^2 = 81,2\%$).

A Figura 2 apresenta os gráficos de contorno de rugosidade para ambos os tipos, considerando a variação de f_z e a_p , e mantendo v_c fixa no ponto central (160 m/min). Nota-se uma variabilidade mais uniforme dos valores de R_a gerados no fresamento do Tipo A em relação ao Tipo B. Quando associada a maiores valores de a_p , os maiores valores de f_z tem maior influência sobre R_a , muito em função da maior instabilidade do corte. Esta combinação resulta em uma maior seção transversal que, quando associada com a composição química do Tipo B, é capaz de gerar maiores esforços de corte (por conseguinte, maiores vibrações) na usinagem deste material, afetando o acabamento usinado.

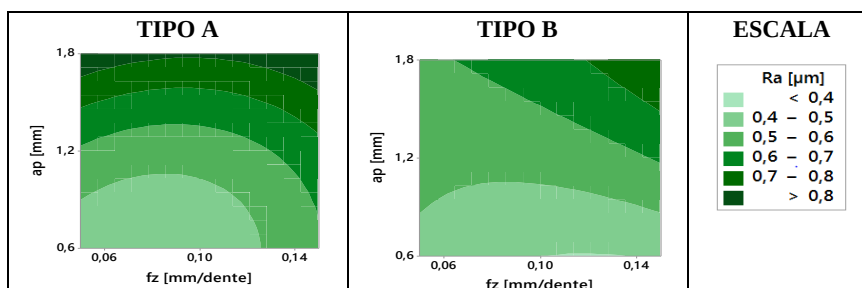


Figura 2. Gráficos de contorno da rugosidade R_a gerada em ambos os tipos considerando $v_c = 160$ m/min

Machado, et al. (2015) cita que a adição de vanádio aumenta a ductilidade do material. Este incremento pode dificultar a quebra do cavaco, prejudicando a qualidade da superfície usinada. Porém, Sreejith (2008) cita que a presença de fluido de corte em abundância contribui com a quebra do cavaco. Logo, a combinação da utilização de fluido de corte com um intervalo adequado de valores de v_c (acima de 100 m/min) pode ter contribuído para reduzir os efeitos do vanádio sobre os valores de R_a obtidos nos testes.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões sobre a influência de certos elementos de liga (Co, V, Ti, B) sobre a força de usinagem e sobre a rugosidade obtidas pelo fresamento frontal com fluido em abundância nos dois tipos de aços inoxidáveis austeníticos AISI 316 (Tipos A e B) para os intervalos de parâmetros analisados são:

- Os menores valores de força de usinagem foram verificados na combinação de $v_c = 160$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/dente e $a_p = 0,6$ mm, resultando em $F_U = 162 \pm 81$ N (Tipo A) e $F_U = 156 \pm 127$ N (Tipo B).
- As parcelas estáticas (μF_U) geradas mostraram-se similares no fresamento dos dois tipos de AISI 316, sendo que os parâmetros mais significativos foram a profundidade de corte axial e o avanço por dente.
- As parcelas dinâmicas (ΔF_U) foram mais representativas para o Tipo B em comparação ao Tipo A, possivelmente pelos maiores percentuais de B e Co que estão relacionados ao aumento da dureza e resistência ao cisalhamento, gerando maior flutuação da força e maiores instabilidades durante o corte.

- A rugosidade média gerada em ambos os tipos foi similar. Os menores valores registrados ($R_{a(A)} = 0,27 \pm 0,03 \mu\text{m}$ e $R_{a(B)} = 0,36 \pm 0,02 \mu\text{m}$) ocorreram no Passe 13 ($v_c = 120 \text{ m/min}$, $f_z = 0,10 \text{ mm/dente}$ e $a_p = 0,6 \text{ mm}$).
- Para um intervalo de confiança de 95%, a profundidade de corte axial foi o único parâmetro significativo sobre R_a .

5. AGRADECIMENTOS

À empresa Walter Tools, pela doação das ferramentas; à empresa Bondmann Química, pelo fluido de corte; ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS), pelas análises de composição química das amostras; ao Téc. Guilherme Vargas Schirmer pelo auxílio na execução dos experimentos; e à CAPES pela bolsa de estudos concedida.

6. REFERÊNCIAS

- Barbosa, P.A., 2014. *Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis*. Tese (Doutorado), POLI-USP.
- Baumgaertner F.º, A.J., 2017. *Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento*. Dissertação (Mestrado), PROMEC-UFRGS.
- Capus, J.M. 2005. "More roads point to cheaper titanium powder", *Metal Powder Report*, Vol. 60, No. 2, p. 22-23.
- IMOA, 2014. Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels. 3 ed., *International Molybdenum Association*. Pittsburgh: TMR Stainless, 48p.
- Machado, A.R., Mendes, A.M., Coelho, R.T., Silva, M.B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Edgard Blucher, São Paulo, 3ª edição.
- 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". *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, No. 4, p. 620-642.
- Sreejith, P.S., 2008. "Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions". *Material Letters*, Vol. 62, No.2, p. 276-278.
- Tither, G., 2001. "Niobium in steel castings and forgings", In *Proceedings of the International Symposium Niobium*, Orlando, Florida, USA.
- Zaman, H.A., Sharif, S., Kim, D.W., Idris, M.H., Suhaimi, M.A. and Tumurkhuyag, Z., 2017. "Machinability of cobalt-based and cobalt chromium molybdenum alloys – a review", In *Proceedings of the 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing – FAIM2017*, Modena, Italy.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

FINISHING ENG MILLING OF AISI 316 STAINLESS STEEL SAMPLES WITH DIFFERENT AMOUNTS OF CERTAIN ALLOYING ELEMENTS

Matheus Nunes Duran¹

Rafael Farias Garcia²

Mauricio Rodrigues Policena³

André João de Souza⁴

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica – Rua Sarmiento Leite, nº 425
CEP 90.050-170 – Porto Alegre, RS.

¹matheusnduran@hotmail.com, ²rafafg1985@gmail.com, ³mrpolicena@gmail.com, ⁴ajsouza@ufrgs.br

Abstract. The paper presents an investigation on the influence of the weight percentage of boron, cobalt, titanium and vanadium between two different types (A and B) of austenitic stainless steel AISI 316 on the machining force and the average roughness (R_a) by finishing end milling with abundant cutting fluid. For this, the Box-Behnken Design of Experiments were used to randomize the combination of the input variables (axial depth of cut a_p , feed per tooth f_z and cutting speed v_c). For the machining force, the parameters a_p and f_z were significant for both types. The static force showed similarity in both materials, while the dynamic force was higher for Type B. This instability was caused by higher hardness and resistance to shear the Type B due to the presence of higher boron and cobalt contents. For the roughness, a_p was the only one significant parameter. Titanium and vanadium were not significant on R_a as a function of the v_c values combined with the presence of cutting fluid.

Keywords: Austenitic stainless steel AISI 316, Alloying elements, Machining force, Average Roughness.

RESPONSIBILITY NOTICE

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