

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO COMPARATIVO DO FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316 EM AMOSTRAS COM DIFERENTES PERCENTUAIS
DE CERTOS ELEMENTOS DE LIGA

por

Matheus Nunes Duran

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2018.

ESTUDO COMPARATIVO DO FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316 EM AMOSTRAS COM DIFERENTES PERCENTUAIS
DE CERTOS ELEMENTOS DE LIGA

por

Matheus Nunes Duran

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Eng. Rafael Farias Garcia

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 15 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Vanda Nunes, pelo amor, paciência e apoio inesgotáveis.

À minha namorada, Tayná Montenegro, por todo amor, companheirismo, carinho e inspiração ao longo de todo este percurso.

Ao professor André João de Souza, pelo grande auxílio, orientação e dedicação ao longo do trabalho.

Ao coorientador engenheiro e mestrando Rafael Farias Garcia, pelo suporte e auxílio ao longo de todo trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) da UFRGS Guilherme Vargas Schirmer, por todo auxílio e paciência na execução dos experimentos.

À empresa Walter Tools, pela doação das ferramentas de corte (cabeçote e insertos).

À empresa Bondmann Química, pelo fluido de corte utilizado nos experimentos.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, pelas análises de composição química das amostras Tipo A e Tipo B utilizadas.

Duran, M. N. **Estudo comparativo do fresamento frontal de acabamento do aço inoxidável AISI 316 em amostras com diferentes percentuais de certos elementos de liga**. 2018. 25 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

O controle sobre os elementos de liga presentes na composição química dos aços inoxidáveis é de fundamental importância para alcance de propriedades mecânicas desejadas, bem como atendimento a requisitos de usinabilidade. Neste trabalho, objetivou-se investigar como a diferença do percentual em massa de boro, cobalto, titânio e vanádio entre duas amostras (Tipo A e Tipo B) de aço inoxidável austenítico AISI 316 afeta a rugosidade média (R_a) e a força de usinagem (F_U) durante o fresamento frontal de acabamento com fluido de corte em abundância. Com uso do projeto de experimentos Box-Behnken, foram combinadas variações dos parâmetros de entrada (profundidade axial de corte a_p , avanço por dente f_z e velocidade de corte v_c) em três níveis cada. A partir da análise de variância, observou-se que o comportamento de R_a foi similar para os dois tipos de AISI 316, sendo a_p o parâmetro mais significativo. Os menores valores de rugosidade ($R_{a(A)} = 0,27 \pm 0,03 \mu\text{m}$ e $R_{a(B)} = 0,36 \pm 0,02 \mu\text{m}$) foram gerados com $v_c = 120 \text{ m/min}$, $f_z = 0,10 \text{ mm/dente}$ e $a_p = 0,6 \text{ mm}$. Titânio e vanádio não tiveram efeitos significativos sobre a rugosidade em função dos valores de v_c combinados com a presença de fluido de corte. Já para F_U , os parâmetros a_p e f_z foram bastante significativos para ambos os tipos. Para o Tipo B, v_c também representou influência significativa. Os menores valores de força ($F_{U(A)} = 162,1 \pm 81,0 \text{ N}$ e $F_{U(B)} = 155,5 \pm 126,9 \text{ N}$) foram verificados na combinação $v_c = 160 \text{ m/min}$, $f_z = 0,05 \text{ mm/dente}$ e $a_p = 0,6 \text{ mm}$. O comportamento do valor médio (parcela estática) mostrou similaridade entre os dois tipos. Já as flutuações da força (parcela dinâmica) sempre foram maiores para o Tipo B. Esta maior instabilidade pode ter sido causada pelo aumento de dureza ($199,7 \pm 1,7 \text{ HB}$ para material Tipo A e $215,0 \pm 2,0 \text{ HB}$ para material Tipo B) e pela maior resistência ao cisalhamento, resultantes dos maiores teores de boro e cobalto.

PALAVRAS-CHAVE: Aço inoxidável austenítico AISI 316, Elementos de liga, Rugosidade, Força de usinagem.

Duran, M.N. **Comparative study of finishing end milling AISI 316 stainless steel samples with different amounts of certain alloying elements**. 2018. 25 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The control regarding alloying elements within the chemical composition of austenitic stainless steels has wide importance to guarantee the desired mechanical properties as well as the achievement of the requirements for machinability of these materials. In this paper, it was investigated how the percentage difference in mass of boron, cobalt, titanium and vanadium between two samples (A-Type and B-Type) of austenitic stainless steel AISI 316 affects the average surface roughness (R_a) and the resulting machining force (F_U) during the finishing end milling with abundance cutting fluid. Using the Box-Behnken Design of Experiment, it was combined the input parameters (axial depth of cut a_p ; feed-rate per tooth f_z and cutting speed v_c), each on three levels. From the analysis of variance, it was observed that the performance of R_a was similar for both types of AISI 316, where a_p was the most significant parameter. The smallest values of surface roughness ($R_{a(A)} = 0.27 \pm 0.03 \mu\text{m}$ and $R_{a(B)} = 0.36 \pm 0.02 \mu\text{m}$) were achieved using $v_c = 120 \text{ m/min}$, $f_z = 0.10 \text{ mm/tooth}$ and $a_p = 0.6 \text{ mm}$. Titanium and vanadium had no significant effects in the surface roughness, possibly due the range v_c values associated with cutting fluid. Regarding the F_U , the a_p and f_z parameters had overall significance effect for both types. For B-Type, v_c has a significant influence too. The lowest force values ($F_{U(A)} = 162.1 \pm 81.0 \text{ N}$ and $F_{U(B)} = 155.5 \pm 126.9 \text{ N}$) was verified using a combination of $v_c = 160 \text{ m/min}$, $f_z = 0.05 \text{ mm/tooth}$ and $a_p = 0.6 \text{ mm}$. The behavior of average values (static force) was similar in both types. However, the force fluctuations (dynamic force) have always been greater for B-Type. This higher instability is probably due to the increase in the material hardness ($199,7 \pm 1,7 \text{ HB}$ for A-Type and $215,0 \pm 2,0 \text{ HB}$ for B-Type) and shear strength, resulting from higher boron and cobalt contents.

KEYWORDS: Austenitic stainless steel AISI 316, Alloying elements, Surface roughness, Machining forces.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	Elementos de Liga no Aço Inoxidável Austenítico	2
3.2	Parâmetros de Corte em Fresamento	2
3.3	Meio Lubrificadorrefrigerante.....	3
3.4	Forças no Fresamento Frontal	3
3.5	Rugosidade da Superfície Usinada	4
3.6	Projeto de Experimentos Box-Behnken (BBD).....	4
4	MATERIAIS E MÉTODOS	5
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
5.1	Força de Usinagem.....	8
5.2.1	Análise da Parcela Estática	8
5.2.2	Análise da Parcela Dinâmica	9
5.2	Rugosidade da Superfície Usinada	11
6	CONCLUSÕES.....	13
	REFERÊNCIAS.....	14
	APÊNDICES.....	16
	I – Cálculos das taxas de aquisição para cada passe da Tabela 5.1.	16
	II – ANOVA completa para parcela estática da força de usinagem gerada (μF_U).	17
	III – ANOVA completa para parcela dinâmica da força de usinagem (ΔF_U).	18
	IV – ANOVA completa para a rugosidade R_a gerada no fresamento do AISI 316.	19

1 INTRODUÇÃO

O fresamento pode ser considerado um dos processos mais versáteis dentre os diversos processos de usinagem, pois utiliza uma ferramenta de corte com geometria definida, a qual realiza o corte do material de forma intermitente possibilitando a usinagem de geometrias complexas. Possui grande aplicação na indústria para produção de componentes nas mais diversas formas devido à sua flexibilidade. Neste processo, o corte de materiais é realizado com uma ferramenta rotativa (denominada fresa) de uma ou múltiplas arestas cortantes executando movimentos programados sobre uma peça. O fresamento pode ainda ser classificado em tangencial ou frontal, de acordo com a disposição dos dentes ativos da ferramenta. Para o tipo frontal, o eixo da fresa é posicionado perpendicularmente à superfície usinada. Normalmente, o fresamento frontal é realizado com fresa de topo ou cabeçote fresador [Diniz et al., 2013; Machado et al., 2015].

Um dos materiais mais utilizados atualmente devido à sua conhecida resistência à corrosão, apesar de sua baixa usinabilidade¹, são os aços inoxidáveis. Estes representam uma grande parcela dos materiais submetidos a operações de usinagem, tendo como principal elemento de liga o cromo (superior a 12%). Normalmente, são divididos em cinco classes, dependendo de sua microestrutura: ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecidos por precipitação. Os austeníticos são muito comuns comercialmente e podem conter aditivos para melhorar seu desempenho em serviço. Dentro desta classe encontra-se a liga AISI 316. A principal particularidade desta é a presença de molibdênio (2% a 3%), conferindo maior resistência à corrosão, especialmente em ambientes clorídricos. Ademais, este material pode conter diferentes elementos de adição para finalidades distintas [Machado et al., 2015].

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].

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 usinar o material (baixa usinabilidade) [Barbosa, 2014]. Outra forma de quantificar a qualidade da superfície resultante de um processo de usinagem é através da rugosidade. Esta é composta por irregularidades finas ou erros microgeométricos que são resultantes da ação intrínseca ao corte. É dependente de parâmetros como: geometria da ferramenta de corte, material da peça, rigidez da máquina-ferramenta, condições de corte, etc. [Machado et al., 2015]. Todas estas variáveis inerentes aos processos de usinagem tornam necessário um maior investimento em técnicas que auxiliem na obtenção das melhores condições de corte.

Uma grande área de pesquisa é a busca pela otimização de parâmetros para usinagem de materiais de baixa usinabilidade. Para um melhor entendimento de todas as variáveis “independentes” de entrada e “dependentes” de saída envolvidas, são utilizadas metodologias estatísticas para a definição das melhores combinações de parâmetros de usinagem.

O conhecimento das influências de variáveis de entrada (velocidade de corte, avanço por dente, profundidade axial de corte, geometria da ferramenta, material da peça, etc.) no comportamento das variáveis de saída (forças e rugosidades) de um processo de fresamento é de fundamental importância e pode ser obtido através de Planejamentos de Experimentos. Uma metodologia que pode ser utilizada para a obtenção das melhores combinações de parâmetros é o *Box-Behnken Design* (BBD). De acordo com Ferreira et al., 2007, o BBD é um método estatístico de superfície de resposta que realiza o planejamento e análise de três fatores influentes no processo, onde para cada fator são estudados apenas três níveis (-1, 0, +1). Esta metodologia tem como vantagens a redução do número de ensaios necessários e a possibilidade de definição da relevância de cada fator nas variáveis dependentes.

¹ “Usinabilidade” é o termo que define o grau de dificuldade em se usinar um material. Os critérios para

2 OBJETIVOS

Investigar a influência de certos elementos de liga (Co, V, Ti, B) na usinabilidade do aço inoxidável austenítico AISI 316 durante fresamento frontal de acabamento com fluido lubrificante isento de óleo em abundância. Essa será quantificada através da força de usinagem (estática e dinâmica) e da rugosidade média geradas pela variação dos parâmetros de entrada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritos os conceitos relativos a: (i) elementos de liga na matriz de aços inoxidáveis; (ii) parâmetros de corte para o fresamento frontal; (iii) utilização ou não de meio lubrificante; (iv) forças geradas durante o fresamento; (v) rugosidade da superfície usinada; (vi) fundamentos básicos do projeto de experimentos Box-Behnken.

3.1 Elementos de Liga no Aço Inoxidável Austenítico

A maioria dos metais na indústria não é utilizada em sua forma pura, mas com a presença de diferentes elementos de liga com o intuito de modificar as propriedades da matriz principal para diversas aplicações. A presença de “elementos secundários” associados ao metal para formação de uma liga (p.ex. ferro acrescido de cromo para formar ligas Fe-Cr) pode alterar expressivamente as propriedades do material [Cunat, 2004].

Os aços inoxidáveis possuem como diferencial a resistência à corrosão em ambientes agressivos. Sua principal característica é a presença de cromo na matriz principal (acima de 12%), que reage com o oxigênio do ar atmosférico para formação de uma película protetora de óxido de cromo (Cr_2O_3) sobre a superfície do material [ASM, 1995].

Comumente estas ligas de aço inoxidável contêm elementos como: cromo (Cr), manganês (Mn), silício (Si), carbono (C), nitrogênio (N), enxofre (S) e fósforo (P). Também podem conter elementos como: níquel (Ni), molibdênio (Mo), titânio (Ti), nióbio (Nb), cobre (Cu), vanádio (V), cobalto (Co), entre outros de menor percentual [Cunat, 2004].

Em geral, a quantidade de cada elemento varia de acordo com a necessidade de aplicação. Moisé, 2011, cita que estes elementos podem ser divididos em dois grandes grupos:

- (i) Elementos que não formam carbonetos nos aços (p.ex. Ni, Si, Co, Al, Cu e N). Neste grupo estão presentes elementos que não formam compostos químicos com ferro e carbono, sendo encontrados na matriz principal na forma de soluções sólidas.
- (ii) Elementos que formam carbonetos estáveis nos aços (p.ex. Cr, Mn, Mo, W, V, Ti, Zr e Nb). Estes podem ser encontrados na forma de compostos químicos com carbono e ferro ou ainda presentes em soluções sólidas (para o caso de pequena quantidade de carbono e grande percentual destes elementos de liga). A distribuição destes depende do percentual de carbono no aço e a presença de outros elementos formadores de carbonetos.

Conforme a ASM, 1995, o aço inoxidável AISI 316 apresenta a seguinte composição: Cr (16~18%), Ni (10~14%), Mo (2,0~2,5%), Mn (2% máx.), Si (1% máx.), C (0,08% máx.). Elementos constituintes além destes podem ser considerados “elementos secundários”.

3.2 Parâmetros de Corte em Fresamento

Os parâmetros de corte são variáveis independentes de entrada responsáveis pelo comportamento das diversas variáveis de saída de um processo [ASM, 1995]. Para o fresamento frontal, podem ser citados: a profundidade axial de corte (a_p), a profundidade radial de corte (a_e), a velocidade de corte (v_c) e o avanço por volta (f).

No fresamento frontal, a_p é definido como a altura de penetração da ferramenta em relação à peça perpendicularmente ao plano de trabalho; já a_e representa a largura de penetração da ferramenta sobre a peça perpendicularmente à direção do avanço. Na usinagem de canais, $a_e = d$, onde d é o diâmetro da fresa [Diniz et al., 2013]. Já o parâmetro v_c é definido como a velocidade tangencial instantânea do ponto de referência da aresta de corte, segundo a direção e sentido de corte. Este parâmetro está relacionado com a rotação (n) e o diâmetro (d)

da fresa [Machado et. al., 2015]. Além disso, f indica o percurso de avanço da fresa em cada volta. Pode também ser expresso em função do avanço por dente (f_z), onde ambos são correlacionados em função do número de dentes da fresa (z) ($f = f_z z$) [Diniz et al., 2013].

3.3 Meio Lubrificador

Durante o processo, grande quantidade de calor é gerada nas interfaces ferramenta-peça e cavaco-ferramenta devido à energia desenvolvida durante os processos para deformação do cavaco e pelo atrito decorrente do contato entre as partes. Assim, os meios lubrificantes² têm as funções de lubrificação (redução do atrito), refrigeração (diminuição do calor gerado), auxílio na quebra e na expulsão do cavaco da região de corte, redução dos níveis de desgaste da ferramenta de corte e redução da possibilidade de ocorrência de aresta postiça de corte (APC) [Diniz et al., 2013; Machado et al., 2015]. Para baixas velocidades de corte (v_c), a principal função do fluido é lubrificar, enquanto em altas v_c sua função está relacionada à refrigeração [Santos e Sales, 2007]. A sua aplicação em cortes interrompidos, como o fresamento, faz com que o fluido penetre nas interfaces através da própria ferramenta, uma vez que a aresta de corte recebe o fluxo de fluido no período em que não está realizando o corte durante a revolução e, portanto, entra em contato com o material “lubrificada” [Diniz et al., 2013].

Os meios lubrificantes podem ser divididos em quatro grupos: miscíveis em água (p.ex. soluções aquosas e emulsões), não miscíveis em água (p.ex. óleos minerais), gases e névoas (p.ex. mínima quantidade de fluido) e meios sólidos [Machado et al., 2015].

Cortes a seco (sem presença de fluido) podem ser benéficos em relação aos custos com seu uso (aquisição, armazenamento, controle em serviço, etc.), podendo também diminuir os riscos de danos à saúde de operadores e degradação do meio ambiente [Diniz e Scandiffio, 2001]. Porém, em certas condições severas, o corte a seco não é viável, e a presença de um meio lubrificante torna-se uma alternativa importante ao processo [Diniz et al., 2013]. Em vista disso, fabricantes têm apresentado alternativas de fluidos biodegradáveis (produtos de base vegetal), uma vez que este tipo possui maior compatibilidade com a pele humana e tendência reduzida à degradação da qualidade do ambiente [Machado et al., 2015].

3.4 Forças no Fresamento Frontal

O conhecimento do valor da força de usinagem atuante sobre a cunha de corte da ferramenta é de fundamental importância, pois a partir disto é possível fazer estimativas sobre os esforços atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, desgaste da ferramenta de corte, viabilidade econômica do processo, etc. [Machado et al., 2015].

A força de usinagem resultante pode ser decomposta em três componentes definidas como: radial (F_r), tangencial (F_t) e axial (F_a) para o fresamento frontal (Figura 3.2) [Sória, 2016].

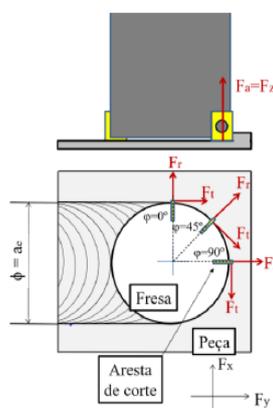


Figura 3.2 – Componentes da Força de Usinagem [Sória, 2016].

² A aplicação ou não de meio lubrificante é também variável de entrada do processo de usinagem.

A força de usinagem (F_U), ou força resultante, é, portanto, calculada em função de suas componentes radial, tangencial e axial. Para efeito de medições através de dinamômetro, pode ser expressa em função das componentes ortogonais nos eixos x, y e z (Equação 3.2).

$$F_U \text{ [N]} = \sqrt{F_r^2 + F_t^2 + F_a^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3.2)$$

Em geral, dois fatores podem ter influência direta sobre a força de usinagem: as zonas de cisalhamento (primária e secundária) e a resistência ao cisalhamento do material nestes planos. Logo, qualquer parâmetro pode ser avaliado baseado em seus efeitos sobre estes fatores [Trent, 1991]. Dentro destes efeitos estão presentes: material da peça, material da ferramenta, parâmetros de corte (v_c , f_z , a_p , etc.), geometria da ferramenta e presença ou não de meio lubrificante [Santos e Sales, 2007].

3.5 Rugosidade da Superfície Usinada

Em geral, a superfície de uma peça gerada por usinagem pode ser avaliada em termos de desvios macrogeométricos (formas, dimensões e orientações) e microgeométricos (rugosidades e ondulações). Desvios macrogeométricos são normalmente mais fáceis para controlar e dependem sobretudo da natureza da operação e da rigidez da máquina-ferramenta. Já as rugosidades e ondulações de uma superfície (desvios microgeométricos) podem ser afetadas por parâmetros como: propriedades do material da peça, geometria da ferramenta de corte, formação do cavaco, falhas na ferramenta, etc. [Machado et al., 2015].

Diversos parâmetros podem ser utilizados para mensurar a rugosidade de uma superfície. A rugosidade média (R_a) é o parâmetro mais utilizado devido à sua simplicidade de cálculo, sendo a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de avaliação l_m . É comumente utilizada para superfícies em que o acabamento apresenta sulcos bem orientados (caso do fresamento) e em superfícies de pouca responsabilidade (acabamentos estéticos), pois as marcas geradas na superfície usinada inerentes ao processo não alteram expressivamente seu valor. Além disso, R_a não define a forma das irregularidades do perfil [Tavares, 2012]. O parâmetro R_a pode ser calculado teoricamente. Porém, o valor calculado é apenas indicativo, uma vez que os resultados reais são influenciados também por diversos outros fatores como vibração (flutuações das forças de usinagem) e desgastes da fresa. Para o caso do fresamento frontal, R_a pode ser calculado em função do raio de ponta da ferramenta r_ϵ [mm] e do avanço por dente (f_z) [mm/dente] através da Equação (3.1) [Machado et al., 2015].

$$R_a \text{ [\mu m]} = 500 r_\epsilon - \sqrt{(500 r_\epsilon)^2 - (250 f_z)^2} \quad (3.1)$$

3.6 Projeto de Experimentos Box-Behnken (BBD)

Segundo Baumgaertner, 2017, o projeto de experimentos Box-Behnken (BBD), que faz uso da Metodologia de Superfície de Resposta, pode ser utilizado para otimizações estatísticas, bem como para mensuração da interação entre o conjunto de fatores de entrada do processo (X_1 , X_2 , X_3) que exerçam influência sobre a variável resposta (Y) levando-se em consideração os coeficientes de regressão b_n (Equação 3.3).

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 \quad (3.3)$$

De acordo com Ferreira et al., 2007, na utilização do BBD são realizados testes onde os fatores combinados possuem três níveis – baixo (-1), médio (0) e alto (+1). A vantagem no uso desta técnica é a redução do número de experimentos realizados (fatorial incompleto). Além disso, não possibilita a realização de testes com combinações em que todos os parâmetros operem em seus extremos. Para uma experimentação com três fatores de entrada, o número de testes é reduzido para 12, acrescidos de 3 amostras do ponto central.

Este método estatístico pode ser utilizado para funções como otimização, análise da contribuição individual de cada fator na variável resposta, interações entre fatores, além do efeito quadrático da relação entre os parâmetros com as variáveis de saída [Baumgaertner, 2017]. Para tanto, é utilizada a tabela de coeficientes de regressão e probabilidade de significância (p-valor) para criação de uma análise de variância (ANOVA). P-valor informa a significância estatística de cada fator de entrada, considerando como “significativos” os fatores que tenham seu valor atribuído inferior ao nível de significância estipulado (α) [Minitab, 2010].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente realizou-se a verificação da composição química das amostras utilizadas. A Tabela 4.1 apresenta a composição química média encontrada nos dois tipos de aço inoxidável AISI 316 (denominados Tipo A e Tipo B) utilizados, no que diz respeito aos principais elementos de liga. Os valores mínimos e máximos da tabela estão de acordo com ASM, 1995. A obtenção dos dados tabelados foi realizada no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF/UFRGS) com auxílio do equipamento para análise de metais – Spectrolab modelo LVFA18B.

Tabela 4.1 – Principais elementos de liga das amostras usinadas (% peso).

	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	C	P	S
Mínimo	---	16	10	2	---	---	---	---	---	---
Tipo A	68,9	16	10,7	2,01	1,39	0,5	0,109	0,044	0,028	0,005
Tipo B	68,8	16,2	10,7	2,12	1,26	0,5	0,105	0,030	0,032	0,002
Máximo	---	18	14	2,5	2	1	---	0,080	---	---

Já a Tabela 4.2 apresenta o percentual dos demais elementos de liga encontrados na análise da composição química dos dois tipos (A e B). Em negrito estão os elementos discrepantes pelos quais os materiais se diferenciam [cobalto (Co), vanádio (V), titânio (Ti), boro (B)].

Tabela 4.2 – Demais elementos de adição 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

A dureza superficial dos materiais Tipo A e Tipo B foi verificada em uma máquina semiautomática Emco-Test modelo DuraVision DV30 com um intervalo de carga de 10 a 3000 kgf disponível no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF/UFRGS), utilizando-se a esfera de diamante com diâmetro de 2,5 mm. O resultado da medição de três amostras tomadas para o material Tipo A foi de $199,7 \pm 1,7$ HB, enquanto que para o material Tipo B foi de $215,0 \pm 2,0$ HB.

Os corpos de prova (placas com 6 mm de espessura) de ambos os tipos (A e B) foram previamente dimensionados para fixação no dinamômetro. Para melhor aproveitamento da superfície foram planejados seis passes por cada lado da chapa, totalizando no máximo 12 passes por chapa.

Os experimentos foram realizados no centro de usinagem ROMI Discovery 308, com 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 (540 l/h).

Para aquisição das componentes ortogonais da força de usinagem (F_U) foi utilizado um dinamômetro piezelétrico Kistler® modelo 9129AA. O condicionador de sinais usado foi o Kistler® modelo 5070A. Os sinais de força foram processados e visualizados nas três direções

ortogonais (F_x , F_y e F_z) com o auxílio do software LabVIEW® 9.0, utilizando uma VI (*Virtual Instrument*) específica para fresamento – Figura 4.1. Conforme sugere Sória, 2016, utilizou-se uma taxa de aquisição (pontos por segundo) variável em função dos tempos de corte (t_c) para cada passe, para gerar um total de aproximadamente 30000 pontos por passe em cada canal. As taxas de aquisição (kS/s) são apresentadas no Apêndice I.



Figura 4.1 – Sistema experimental completo.

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

Durante os testes foram variados os parâmetros de entrada: velocidade de corte v_c [m/min], avanço por dente f_z [mm/dente] e profundidade axial de corte a_p [mm]. Ao total foram realizados 15 passes para cada tipo de AISI 316 (Tipos A e B). Com o auxílio do BBD, utilizando o software Minitab®17, os parâmetros foram combinados e aleatorizados. Em seguida, os dados foram estratificados e analisados conforme o método estatístico proposto. Na Tabela 4.3 estão os valores utilizados para cada parâmetro de entrada.

Tabela 4.3 – Níveis dos parâmetros de usinagem.

Parâmetros	Níveis		
	Inferior (-1)	Central (0)	Superior (+1)
Velocidade de corte v_c [m/min]	120	160	200
Avanço por dente f_z [mm/dente]	0,05	0,10	0,15
Profundidade axial de corte a_p [mm]	0,6	1,2	1,8

Para v_c , os valores utilizados foram superiores ao valor inicial recomendado pelo fabricante ($v_c \geq 100$ m/min). Para f_z apenas o nível inferior ficou abaixo do indicado ($f_z = 0,08$ mm/dente). Esta decisão, juntamente com a escolha de utilização de fluido de corte (BD-Fluid B90) em abundância, objetivou reduzir a “agressividade” dos passes para certas combinações de parâmetros e, assim, evitar danos à ferramenta e/ou à máquina. Já os valores de a_p foram escolhidos com base nos estudos realizados por Sória, 2016, para o mesmo material (AISI 316). Para a ferramenta com raio de ponta $r_\epsilon = 1,2$ mm, o autor utiliza um intervalo de valores para a_p referentes a 50%, 100% e 150% de r_ϵ .

Os valores considerados para a determinação das parcelas estática e dinâmica da força de usinagem foram coletados dentro de um intervalo de 10000 pontos em cada passe sem influência da entrada e saída da fresa na peça para evitar efeitos que não fossem inerentes ao corte apenas. O valor da força de usinagem (F_U) foi estudado através do MS Excel.

A parcela estática (μF_U) representará o valor médio da força de usinagem para o intervalo estável de amostragem (10000 pontos), enquanto que a parcela dinâmica (ΔF_U)

representará 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 (4.1):

$$F_U = \mu F_U \pm \Delta F_U \quad (4.1)$$

Após a realização de todos os passes, os perfis de rugosidade de cada superfície foram coletados com o auxílio do rugosímetro portátil Mitutoyo® SJ-201P com resolução de 0,01 μm . Segundo padrões normatizados, para $0,1 \mu\text{m} < R_a < 2,0 \mu\text{m}$, o comprimento de amostragem escolhido foi $l_e = 0,8 \text{ mm}$ e o comprimento de medição $l_m = 5 \cdot l_e = 4 \text{ mm}$.

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 (μR_a). A variação dos valores de R_a (ΔR_a) foi definida a partir do mensurando variável $\Delta l_{m\acute{a}x}$, onde $\Delta l_{m\acute{a}x}$ é igual a maior diferença entre o valor médio e os valores medidos nos três trechos citados. O parâmetro R_a é então definido conforme Equação (4.2).

$$R_a = \mu R_a \pm \Delta R_a \quad (4.2)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5.1 mostra os valores de força e rugosidade obtidos na experimentação para os diferentes passes utilizando três valores de velocidade de corte (v_c), três de avanço por dente (f_z) e três de profundidade axial de corte (a_p).

Tabela 5.1 – Valores de força e rugosidade gerados para os Tipos A e B do AISI 316.

Passe	v_c [m/min]	f_z [mm/z]	a_p [mm]	Tipo A		Tipo B	
				$\mu F_U \pm \Delta F_U$ [N]	$\mu R_a \pm \Delta R_a$ [μm]	$\mu F_U \pm \Delta F_U$ [N]	$\mu R_a \pm \Delta R_a$ [μm]
1	200	0,05	1,2	225,8 \pm 173,4	0,54 \pm 0,33	228,8 \pm 211,0	0,50 \pm 0,19
2	120	0,10	1,8	344,2 \pm 312,6	0,93 \pm 0,17	357,2 \pm 367,3	0,75 \pm 0,13
3	200	0,10	0,6	206,0 \pm 86,3	0,36 \pm 0,11	206,9 \pm 130,9	0,46 \pm 0,05
4	200	0,10	1,8	342,3 \pm 290,9	0,52 \pm 0,06	341,1 \pm 334,6	0,56 \pm 0,10
5	160	0,10	1,2	284,5 \pm 199,6	0,53 \pm 0,09	279,6 \pm 246,3	0,60 \pm 0,08
6	160	0,10	1,2	281,9 \pm 200,9	0,58 \pm 0,04	276,8 \pm 249,0	0,61 \pm 0,06
7	160	0,05	0,6	162,1 \pm 81,0	0,53 \pm 0,03	155,5 \pm 126,9	0,51 \pm 0,06
8	120	0,15	1,2	328,2 \pm 260,2	0,61 \pm 0,34	343,3 \pm 329,2	0,72 \pm 0,15
9	160	0,10	1,2	278,6 \pm 199,8	0,53 \pm 0,01	273,7 \pm 244,7	0,39 \pm 0,03
10	120	0,05	1,2	217,8 \pm 159,9	0,30 \pm 0,03	214,8 \pm 199,8	0,50 \pm 0,01
11	160	0,05	1,8	253,2 \pm 230,1	0,92 \pm 0,14	261,2 \pm 271,2	0,64 \pm 0,08
12	200	0,15	1,2	316,5 \pm 245,8	0,62 \pm 0,28	316,3 \pm 289,8	0,60 \pm 0,15
13	120	0,10	0,6	189,9 \pm 112,9	0,27 \pm 0,03	197,9 \pm 146,9	0,36 \pm 0,02
14	160	0,15	0,6	226,3 \pm 107,8	0,55 \pm 0,23	233,6 \pm 152,9	0,36 \pm 0,06
15	160	0,15	1,8	393,7 \pm 379,8	0,84 \pm 0,22	414,6 \pm 421,3	0,74 \pm 0,11

5.1 Força de Usinagem

Percebe-se que a parcela estática da força de usinagem (μF_U) praticamente não difere entre os tipos A e B. Entretanto, a parcela dinâmica (ΔF_U) na usinagem do Tipo B é sempre superior à gerada na do Tipo A no intervalo de valores utilizado (Figura 5.1).

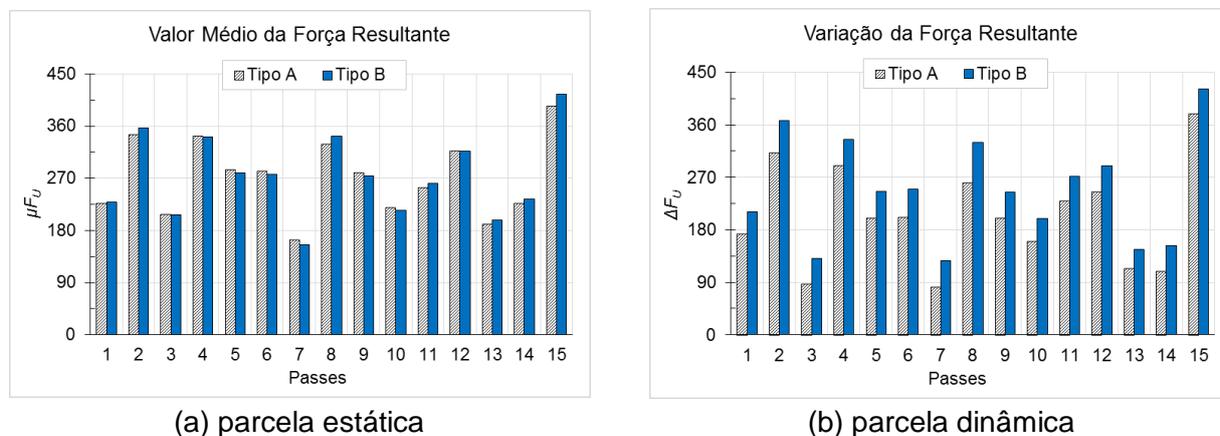


Figura 5.1 – Comparação do comportamento da força de usinagem.

Pela Figura 5.1 (e Tabela 5.1), os menores valores para F_U , para ambos os tipos (A e B), ocorreram no Passe 7 (respectivamente $162,1 \pm 81,0$ N e $155,5 \pm 126,9$ N), enquanto que os maiores valores ocorrem no Passe 15 (respectivamente $393,7 \pm 379,8$ N e $414,6 \pm 421,3$ N).

Para alguns casos, como nos Passes 2 e 15, o valor de ΔF_U ultrapassa o valor de μF_U ($357,2 \pm 367,3$ N e $414,6 \pm 421,3$ N, respectivamente). Sória, 2016, salienta que para estas condições, o corte é realizado em regime instável. Este fenômeno pode estar relacionado à diferença entre os elementos de adição (cobalto e boro) dos dois tipos de AISI 316.

5.2.1 Análise da Parcela Estática

Utilizando a ferramenta de BBD e com auxílio do software Minitab® 17, foram criados gráficos de contorno para averiguação do comportamento de μF_U (Figura 5.2) em relação aos parâmetros de corte (v_c , f_z e a_p) para ambos os tipos de AISI 316.

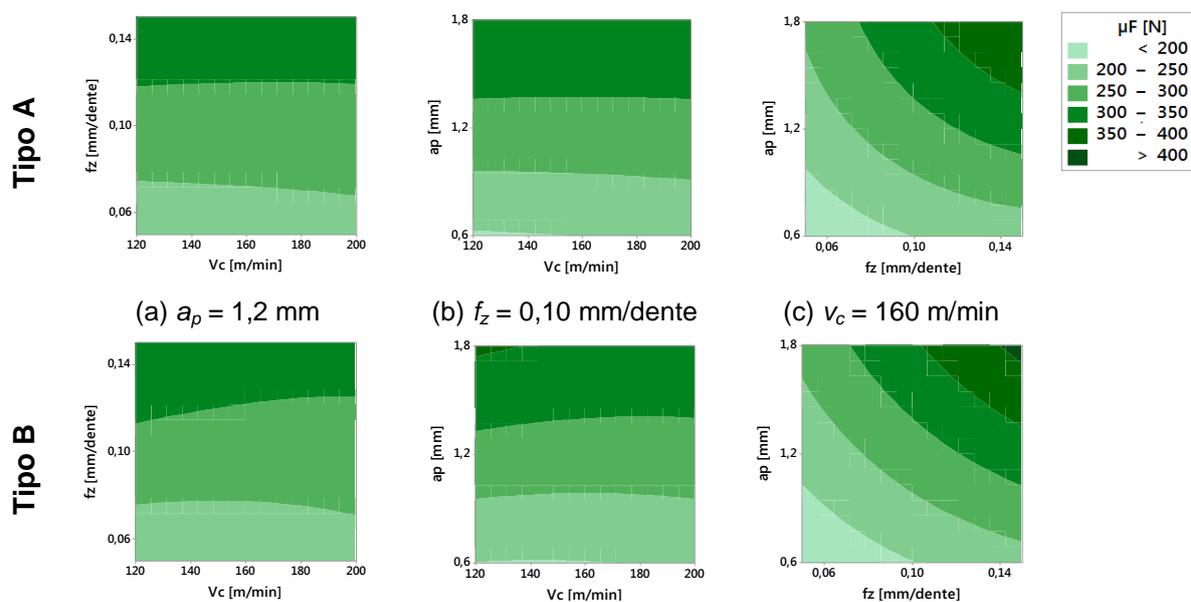


Figura 5.2 – Gráficos de contorno para parcela estática da força de usinagem.

Também se realizou a ANOVA para levantamento de p-valor e a influência de cada fator (individual ou interação) na variável resposta μF_U (Tab. 5.2). A ANOVA completa para a análise da parcela estática da força de usinagem está disponível no Apêndice II. O intervalo de confiança utilizado foi de 95%, considerando, portanto, que para p-valores menores do que 0,05, o efeito do respectivo fator torna-se significativo. O coeficiente de determinação (R^2) representa a porcentagem de variação na resposta que é explorada pelo modelo. Segundo Montgomery, 2007, o valor de $R^2 \geq 70\%$ já representa que um modelo estatístico adequado.

Tabela 5.2 – ANOVA para μF_U gerada no fresamento do AISI 316.

Fator	Tipo A		Tipo B	
	p-valor	Proporção	p-valor	Proporção
v_c	0,571	0,02%	0,090	0,07%
f_z	0,000	33,73%	0,000	36,02%
a_p	0,000	61,75%	0,000	60,55%
v_c^2	0,746	0,01%	0,058	0,10%
f_z^2	0,020	0,69%	0,032	0,15%
a_p^2	0,012	0,89%	0,031	0,15%
$v_c \times f_z$	0,169	0,16%	0,092	0,08%
$v_c \times a_p$	0,202	0,13%	0,014	0,23%
$f_z \times a_p$	0,002	2,38%	0,000	2,04%
R^2	99,69%		99,92%	

Confirmando o que dito, a Figura 5.2 indica que o comportamento da parcela estática da força de usinagem (μF_U) em relação à variação dos parâmetros de entrada do sistema é similar para ambos os tipos no intervalo de valores utilizado. Nota-se que seu comportamento sofre influência significativa da profundidade axial de corte (a_p) e do avanço por dente (f_z) (Tabela 5.2) – tanto em relação aos efeitos principais (linear e quadrático) quanto para o efeito da interação $a_p \times f_z$ – possuindo uma relação diretamente proporcional. Para o Tipo B, verificou-se ainda a influência significativa da interação de a_p e v_c .

Trent, 1991, afirma que incrementos em a_p e f_z são responsáveis pelo aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, resultando em crescimento da força de usinagem. Isto também foi evidenciado por Sperotto, 2016. Já v_c em seus efeitos linear e quadrático não apresentou influência significativa nos resultados de μF_U . Santos e Sales, 2007, comentam que nas faixas de valores empregados na indústria a velocidade de corte por si só apresenta influência discreta na força de usinagem. Seus efeitos, porém, poderiam apresentar influência estatística significativa na resposta no caso de maiores réplicas (repetições), visto que seus p-valores estão próximos de 0,05.

Com relação ao modelo estatístico, os coeficientes de determinação encontrados para os Tipos A e B foram de $R^2 = 99,69\%$ e $R^2 = 99,92\%$ respectivamente, destacando um ajuste adequado do modelo proposto.

5.2.2 Análise da Parcela Dinâmica

Assim como para a parcela estática, foram criados gráficos de contorno para investigar o comportamento da parcela dinâmica (Figura 5.3) em relação à variação dos parâmetros de corte na usinagem do AISI 316 Tipo A e Tipo B.

Realizou-se também a ANOVA na variável resposta ΔF_U para ambos os tipos (Tabela 5.3) com intervalo de confiança de 95%. A ANOVA completa aplicada à parcela dinâmica da força de usinagem está disponível em Apêndice III.

Da Figura 5.3, tem-se que os parâmetros a_p e f_z , (efeito principal) bem como sua interação ($a_p \times f_z$) mostraram efeito significativo para o intervalo de valores utilizado em ambos os tipos. Para o Tipo B, ainda houve contribuição significativa de v_c (efeito principal). A

explicação para esta significância é similar ao descrito para μF_U . Sória, 2016, salienta em seu trabalho que o acréscimo no valor de a_p torna o corte mais próximo de regiões instáveis, elevando dessa forma, a flutuação da força (vibração). Menciona ainda que grandes variações dos valores de força (parcela dinâmica) estão associadas a maiores instabilidades.

Vale salientar que as contribuições de a_p^2 (0,061) e $v_c \times f_z$ (0,081) poderiam se tornar significativas caso mais repetições fossem realizadas.

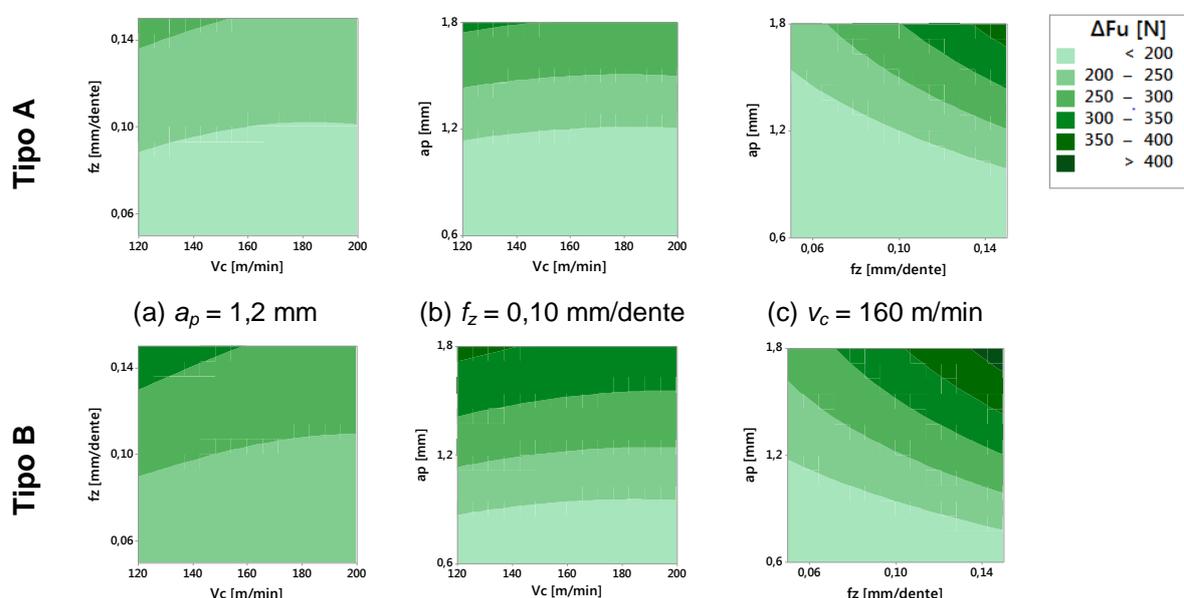


Figura 5.3 – Gráficos de contorno para parcela dinâmica da força de usinagem.

Tabela 5.3 – ANOVA para ΔF_U gerada no fresamento do AISI 316.

Fator	Tipo A		Tipo B	
	p-valor	Proporção	p-valor	Proporção
v_c	0,081	0,29%	0,008	0,66%
f_z	0,000	14,48%	0,000	16,48%
a_p	0,000	80,89%	0,000	78,16%
v_c^2	0,253	0,10%	0,118	0,13%
f_z^2	0,342	0,07%	0,240	0,07%
a_p^2	0,301	0,08%	0,061	0,21%
$v_c \times f_z$	0,141	0,19%	0,081	0,37%
$v_c \times a_p$	0,771	0,01%	0,251	0,06%
$f_z \times a_p$	0,005	3,59%	0,000	3,44%
R^2	99,70%		99,82%	

O modelo estatístico ajustou-se de forma adequada aos dados. Os coeficientes de determinação dos Tipos A e B foram $R^2 = 99,70\%$ e $R^2 = 99,82\%$, respectivamente.

Conforme dito, a parcela dinâmica (ΔF_U) é sempre maior para o Tipo B que para o Tipo A. A presença de cobalto (Co), combinado com elementos como cromo (Cr) e molibdênio (Mo), influencia o material à baixa condutividade térmica, altas taxas de encruamento e elevada dureza (redutores da usinabilidade). Em geral, a presença de Co aumenta a resistência à deformação do material, gerando aumento das forças de corte e maior resistência ao cisalhamento [Zaman et al., 2017]. 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.

A disparidade referente ao percentual de boro (B) tem efeitos similares ao cobalto (Co), uma vez que o principal efeito deste elemento é a elevação da dureza do material. Seus efeitos são evidentes para pequenas concentrações, com percentuais geralmente entre 0,0005% e 0,0030%. Sua contribuição ao endurecimento e conseqüente redução da usinabilidade é inversamente proporcional à presença de carbono (C) na peça. Quanto menor o percentual de C, maiores os efeitos de endurecimento devido à presença de boro [Satyendra, 2014]. No caso, o Tipo B possui 0,030%C e 0,0010%B, enquanto que o Tipo A tem 0,044%C e <0,0010%B.

Assim, os efeitos do boro (B), combinados com os efeitos do cobalto (Co), podem ter sido causadores do aumento da resistência ao cisalhamento no Tipo B e, por conseqüência, gerado maiores vibrações e instabilidades durante o fresamento deste, resultando em maior variação da força durante os passes (parcela dinâmica).

5.2 Rugosidade da Superfície Usinada

Observa-se pela Tabela 5.1 que, para ambos os tipos (A e B), os menores valores de R_a foram gerados no Passe 13 (respectivamente $0,27 \pm 0,03 \mu\text{m}$ e $0,36 \pm 0,02 \mu\text{m}$), efetuado nas condições de v_c inferior (-1), a_p inferior (-1) e f_z central (0). Comparando com o Passe 2, em que somente a_p aumenta (nível superior), tem-se um aumento expressivo dos valores de R_a para os Tipos A e B (respectivamente $0,93 \pm 0,16 \mu\text{m}$ e $0,75 \pm 0,12 \mu\text{m}$). A Figura 5.4 mostra os perfis de rugosidade para os passes citados em um trecho de medição de 1 milímetro na superfície.

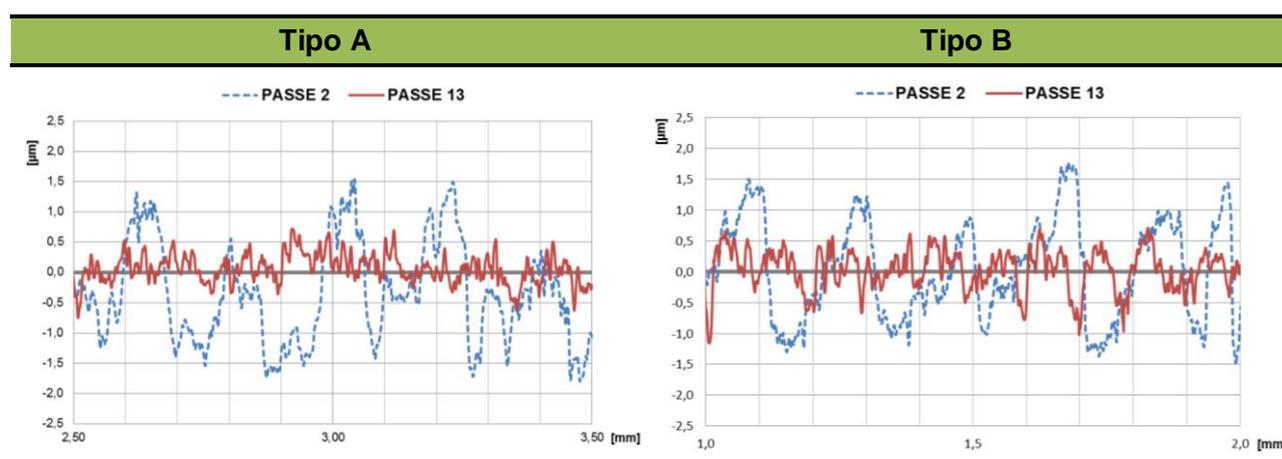


Figura 5.4 – Perfis de Rugosidade para os valores mínimo e máximo de R_a .

Da Tabela 5.1, percebe-se que a diferença dos valores numéricos de R_a entre o Tipo A e o Tipo B não apresenta tendência de usinabilidade melhorada para um ou outro tipo. As discrepâncias entre os elementos de liga podem não ter representado influência significativa em relação à rugosidade da superfície usinada de ambos. A presença de vanádio (V) e titânio (Ti) poderia ter gerado, em diferentes condições de corte, alguma influência nos resultados, uma vez que seus efeitos estão relacionados ao aumento da ductilidade do material e formação de APC, respectivamente – fatores influentes sobre a qualidade da superfície.

A presença de vanádio tem a função de refinar os grãos para aumentar a resistência mecânica e a tenacidade [Tither, 2001]. Quando adicionado ao aço, o vanádio gera aumento da ductilidade do material [Yamamoto et al., 1983]. Este incremento na ductilidade poderia dificultar a quebra do cavaco, prejudicando a qualidade da superfície usinada. Santos e Sales, 2007, salientam, porém, que a presença de fluido de corte em abundância (condição dos experimentos) contribui no processo de quebra do cavaco, uma vez que diminui seu raio de curvatura natural e eleva o nível de tensões sobre o mesmo. Esta elevação pode levar o material a maiores valores de deformações críticas, facilitando a quebra do cavaco.

Já o titânio (Ti) – em maior quantidade no Tipo A – tem influências relacionadas à: redução da condutividade térmica e aumento da reatividade química do material com a ferramenta de corte [Capus, 2005]. Sobiya, 2011, ainda destaca que no fresamento de ligas contendo Ti, os cavacos tendem a ficar aderidos à cunha de corte da ferramenta, formando aresta postiça de corte (APC). Porém, nos experimentos realizados, não foram verificadas formação de APC, resultado, possivelmente, da utilização de fluido de corte durante os passes, combinado com um intervalo adequado de valores para a velocidade de corte ($v_c > 100$ m/min). Logo, a combinação das condições de corte pode ter contribuído para reduzir os efeitos dos elementos de liga discrepantes – vanádio (V) e titânio (Ti) – sobre a rugosidade da superfície obtida por fresamento.

Utilizando o método estatístico BBD e com auxílio do software Minitab® 17, foram criados gráficos de contorno para averiguação do comportamento de R_a em relação aos parâmetros de corte (v_c , f_z e a_p) para os Tipos A e B do aço inoxidável AISI 316 (Figura 5.5).

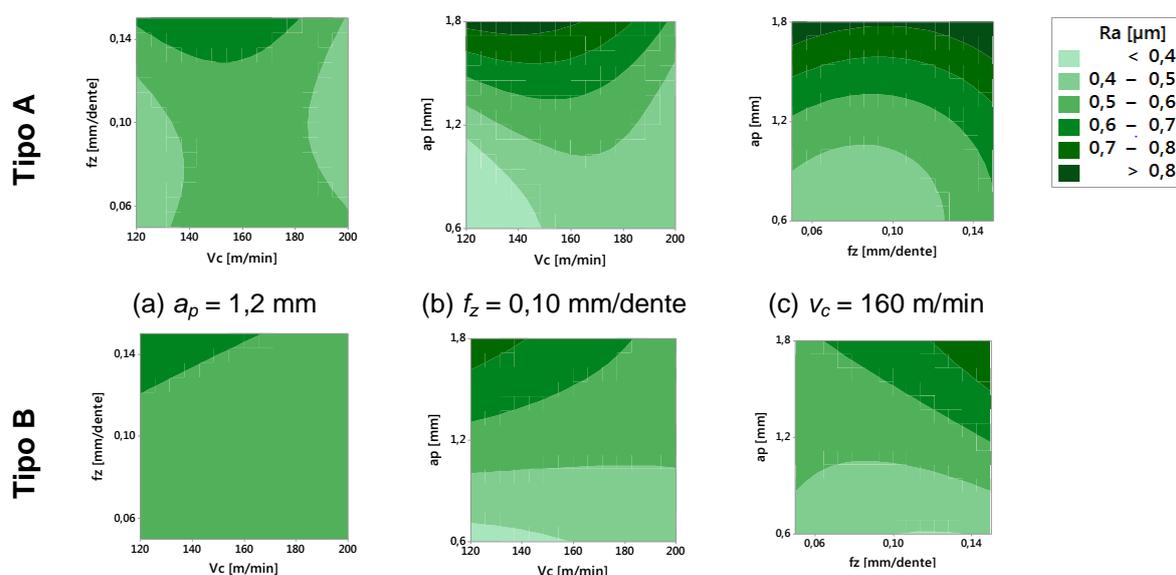


Figura 5.5 – Gráficos de contorno para valores de R_a gerados na usinagem do AISI 316.

Também foi realizada a ANOVA para estudo de p-valor e a contribuição de cada fator (efeito principal ou interação) na variável resposta R_a (Tabela 5.4). A ANOVA completa referente à rugosidade para ambos os tipos está disponível no Apêndice IV. O intervalo de confiança utilizado foi de 95%.

Tabela 5.4 – ANOVA para a rugosidade R_a gerada no fresamento do AISI 316.

Fator	Tipo A		Tipo B	
	p-valor	Proporção	p-valor	Proporção
v_c	0,908	0,04%	0,480	2,19%
f_z	0,372	2,42%	0,316	4,65%
a_p	0,006	51,77%	0,013	54,31%
v_c^2	0,124	8,58%	0,899	0,07%
f_z^2	0,234	4,60%	0,471	2,28%
a_p^2	0,234	4,60%	0,908	0,06%
$v_c \times f_z$	0,363	2,52%	0,563	1,44%
$v_c \times a_p$	0,091	10,95%	0,189	8,69%
$f_z \times a_p$	0,638	0,63%	0,216	7,52%
R^2	87,43%		81,23%	

A Figura 5.6 mostra os perfis de rugosidade para os Passes 7 e 15 de ambos os tipos de AISI 316 conforme os dados da Tabela 5.1. Nota-se que o aumento da parcela dinâmica da força de usinagem ΔF_U (Passe 15) devido a maiores valores de a_p e f_z tornar o perfil de rugosidade mais instável em relação a menores valores de ΔF_U (Passe 7), conforme visto na Figura 5.1.

As Figuras 5.5b, 5.5c e 5.6 e a Tabela 5.4 reforçam o que foi citado anteriormente, pois mostram que o valor de R_a , para ambos os tipos, tem a tendência de aumentar com o incremento de a_p para o intervalo de valores utilizado. Isto ocorre, pois, ao incrementar a_p , a área de contato entre ferramenta e peça aumenta, resultando em maior intensidade das flutuações (vibrações) geradas (associada com ΔF_U). Conforme Sória, 2016, esta instabilidade é responsável pela redução da qualidade da superfície usinada. Vale salientar que para o material Tipo A mais repetições poderiam tornar significativa a combinação $v_c \times a_p$.

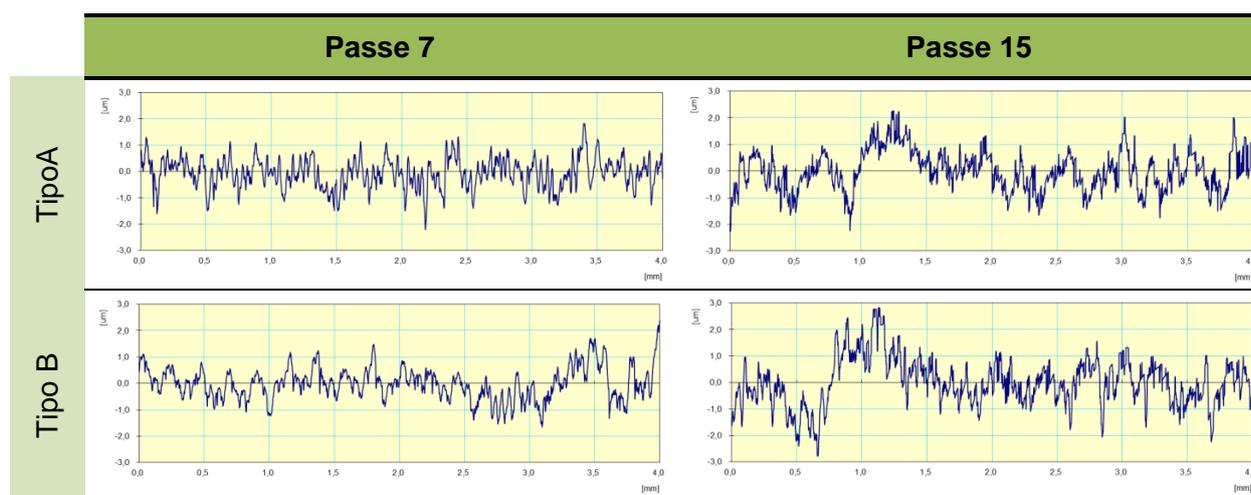


Figura 5.6 – Perfis de Rugosidade para os valores mínimo e máximo de F_U .

Já f_z não apresentou influência significativa no comportamento de R_a . Os valores indicados na Tabela 5.1 ficaram acima do valor teórico ($0,130 \mu\text{m}$) obtido através da Equação (3.1) para $f_z = 0,05 \text{ mm/dente}$, abaixo do valor teórico ($1,173 \mu\text{m}$) para $f_z = 0,15 \text{ mm/dente}$, e próximos do valor teórico ($0,521 \mu\text{m}$) para $f_z = 0,10 \text{ mm/dente}$ (lembrando que o fabricante recomenda $f_z \geq 0,08 \text{ mm/dente}$). Segundo Machado et al., 2015, o valor de R_a calculado é apenas um indicativo, uma vez que o comportamento real é influenciado também por diversos outros fatores. Provavelmente, a geometria da ferramenta (raio de ponta grande, ângulo de posição, quebra-cavaco etc.) tenha influenciado diretamente a formação do cavaco gerado, causando esta discrepância observada entre o valor teórico e o real medido para R_a .

O parâmetro v_c também não apresentou influência significativa sobre a rugosidade. Santos e Sales, 2007, salientam que para altos valores de v_c , o acabamento da superfície torna-se insensível a este parâmetro. Machado et al., 2015, também explicam que, sob baixas velocidades de corte, pode ocorrer APC, resultando em baixa qualidade no acabamento. Nos experimentos, não foram constatadas aderências de material na ferramenta de corte confirmando, portanto, que os valores utilizados ($v_c \geq 100 \text{ m/min}$) combinados com a presença de fluido biolubrificante em abundância, foram adequados.

6 CONCLUSÕES

Baseado nos modelos obtidos pelo uso do BBD, analisou-se o comportamento dos parâmetros de saída (F_U e R_a) a partir da variação dos parâmetros de entrada (v_c , f_z e a_p) para o fresamento frontal de acabamento em amostras (Tipo A e Tipo B) de aço inoxidável AISI 316 com diferentes percentuais dos elementos de liga Ti, V, B e Co.

Com relação à força de usinagem, os menores valores foram verificados na combinação de $v_c = 160 \text{ m/min}$, $f_z = 0,05 \text{ mm/dente}$ e $a_p = 0,6 \text{ mm}$, resultando em $F_U = 162,1 \pm 81,0 \text{ N}$

(Tipo A) e $F_U = 155,5 \pm 126,9$ N (Tipo B). O comportamento da parcela estática mostrou-se similar entre os dois tipos, sendo que os parâmetros mais significativos foram os efeitos lineares e a interação $a_p \times f_z$. Ainda para o Tipo B, houve também contribuição significativa da interação $a_p \times v_c$. Com relação à parcela dinâmica, os valores obtidos foram sempre maiores para o Tipo B em relação ao Tipo A, alcançando, para algumas combinações, valores superiores à parcela estática (p.ex. Passe 2: $F_U = 357,2 \pm 367,3$ N; e Passe 15: $F_U = 414,6 \pm 421,3$ N). Esta condição pode ter sido ocasionada pelos maiores percentuais de B e Co no Tipo B. Seus efeitos estão relacionados ao aumento da dureza e resistência ao cisalhamento, sujeitando este tipo a uma maior flutuação da força e, conseqüentemente, maiores instabilidades durante o corte.

Já na análise da rugosidade R_a gerada, o comportamento de ambos os tipos (A e B) foi similar. Os menores valores foram gerados para a combinação de $v_c = 120$ m/min, $f_z = 0,1$ mm/dente e $a_p = 0,6$ mm, sendo $R_a = 0,27 \pm 0,03$ μm (Tipo A) e $R_a = 0,36 \pm 0,02$ μm (Tipo B). Considerando um intervalo de confiança de 95%, a_p mostrou ser o parâmetro mais significativo para os dois tipos, com percentual de contribuição de 51,77% (Tipo A) e 54,31% (Tipo B). Já f_z e v_c não influenciaram significativamente os resultados de R_a , sendo que f_z diferiu dos valores teóricos calculados pela Equação (3.1) – possivelmente por conta da geometria da ferramenta que tenha influenciado nos resultados – enquanto que os altos valores de v_c podem ter tornando a rugosidade média R_a insensível a este parâmetro. Ti e V que, em função de suas propriedades, poderiam afetar o comportamento de R_a , não apresentaram influências perceptíveis. A causa provável está relacionada a altos valores de v_c (> 100 m/min) combinados com a utilização de fluido biolubrificante em abundância (auxiliam na quebra e remoção do cavaco gerado).

A partir dos resultados gerados, nota-se a importância do estudo mais detalhado sobre as quantidades dos elementos de liga na confecção de matérias-primas. O controle rigoroso sobre os percentuais aceitáveis para elementos “secundários” é de fundamental importância, uma vez que variações não controladas dos mesmos podem afetar aspectos importantes do material. A usinabilidade pode ser prejudicada ou favorecida em função de diferentes teores destes elementos, capazes de afetar, em especial, forças médias e suas flutuações (instabilidades) geradas durante o corte em operações de fresamento frontal de acabamento.

REFERÊNCIAS

- ASM. “**Metals Handbook**”. 10. ed.: Machining, v. 16, 1995.
- Barbosa, R.S., “**Avaliação dos esforços de corte no fresamento frontal da liga de alumínio-silício (A356) quando mantido constante a produção de peças**”. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Minas Gerais: UFSJ, 2014.
- Baumgaertner Filho, 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) em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, RS, 91 p.
- Capus, J.M.; “**More roads point to cheaper titanium powder**”, Metal Powder Report, Vol. 60, pp. 22-23, 2005.
- Cunat, P. J., “**Alloying Elements in Stainless Steel and Other Chromium-Containing Alloys**”. Published in cooperation with the International Chromium Development Association, Euro Inox, Paris, 2004.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L., “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”. 8.ed. São Paulo, Artliber, 2013.
- Diniz, A. E., Scandiffio, I., “**Uma contribuição ao estudo do corte a seco e do corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço**”, 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (Anais do I COBEF), 02 a 04 Abr., Curitiba, PR, 2001, 8p.

Ferreira S.L.C, Bruns R. E., Silva E. G. P. da, Santos W. N. L. dos, Quintella C. M., David J. M., Andrade J. B. de, Breitzkreitz M. C., Jardim I. C. S. F., Neto B. B., **“Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems”**. Journal of Chromatography A, Vol. 1158, No. 1-2, pp. 2-14, 2007.

Krabbe, D.F.M., **“Otimização do fresamento do aço inoxidável aeronáutico 15-5 PH”**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2006.

Machado, Á. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B., **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**. 3ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015.

Minitab, **“StatGuide”**, 2010.

Moisă, B., **“Influence of chemical composition on stainless steel mechanical properties”**. Department of Materials Science, Mechatronics and Robotics, University ValahiaTârgoviste, Romênia, 2011.

Montgomery, D.C., **“Applied statistics and probability for engineers”**. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.

Santos, S. C.; Sales, W. F., **“Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”**, São Paulo: Artliber, 2007.

Satyendra, 2014, **“Boron in Steels”**. Disponível em: <<http://ispatguru.com/boron-in-steels/>>. Acesso em 03 de Maio de 2018.

Sperotto, J. P., **“Estudo dos parâmetros de saída gerados no fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316 para diferentes condições de usinagem”**, 23 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Sobiyi, K.K., **“Machining of powder metal titanium”**, Thesis (Master of Science in Engineering), Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, University of Stellenbosch, South Africa, 2011.

Sória, B. S., **“Estudo do comportamento das vibrações em fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316 utilizando transformada de Wavelet”**. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Tavares, J. M. R. S., **“Indicação dos estados de superfície”**. CFAC – Concepção e Fabrico Assistidos por Computador. FEUP – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2012. Em: <<http://paginas.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFAC-G/Downloads/Apontamentos/>>.

Tither, G., **“Niobium in Steel Castings and Forgings”**, In: Proceedings of the International Symposium Niobium. Orlando, 2001.

Trent, E.M., **“Metal Cutting”**, 3rd ed. Oxford [England], Boston: Butterworth Heinemann, 1991.

Yamamoto, T., Kobayashi, R.; Ozone, T.; Kurimoto, M., **“Precipitation Strengthened Spring Steel for Automotive Suspensions”**. In: International Conference on Technology and Applications of High Strength Low Alloy Steels. Philadelphia, 1983.

Zaman, H.A., Sharif, S., Kim, D.W., Idris, M.H., Suhaimi, M.A. and Tumurkhuyag, Z., **“Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys – A Review”**, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, Modena, Italy, 2017.

APÊNDICES

I – Cálculos das taxas de aquisição para cada passe da Tabela 5.1.

Considerando um percurso $L = 48$ mm e uma fresa com diâmetro $d = 20$ mm, o tempo de corte t_c [s] é dado pela Equação (A.1):

$$t_c = \frac{L}{v_f} = \frac{L}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{60 \cdot L \cdot \pi \cdot d}{f_z \cdot z \cdot 1000 \cdot v_c} = \frac{60 \cdot 48 \cdot \pi \cdot 20}{2000 \cdot f_z \cdot v_c} = \frac{90,5}{f_z \cdot v_c} \quad (\text{A.1})$$

Passe	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	Tempo de corte [s]	Taxa aquisição [kS/s]	Nº Pontos coletados
1	200	0,05	9,0	3333	29997
2	120	0,10	7,5	3979	30001
3	200	0,10	4,5	6631	29998
4	200	0,10	4,5	6631	29998
5	160	0,10	5,7	5305	29999
6	160	0,10	5,7	5305	29999
7	160	0,05	11,3	2653	30005
8	120	0,15	5,0	5968	29998
9	160	0,10	5,7	5305	29999
10	120	0,05	15,1	1989	29993
11	160	0,05	11,3	2653	30005
12	200	0,15	3,0	9947	29999
13	120	0,10	7,5	3979	30001
14	160	0,15	3,8	7958	30001
15	160	0,15	3,8	7958	30001

II – ANOVA completa para parcela estática da força de usinagem gerada (μF_U).

	Fator	SQ	GL	MQ	F	P-valor	Proporção (%)
Tipo A	v_c	13,7	1	13,7	0,36	0,571	0,02
	f_z	20589,4	1	20589,4	546,39	0,000	33,73
	a_p	37694,3	1	37694,3	1000,32	0,000	61,75
	v_c^2	4,5	1	4,5	0,12	0,746	0,01
	f_z^2	419,8	1	419,8	11,14	0,020	0,69
	a_p^2	543,8	1	543,8	14,43	0,012	0,89
	$v_c \times f_z$	97,8	1	97,8	2,60	0,169	0,16
	$v_c \times a_p$	81,6	1	81,6	2,17	0,202	0,13
	$f_z \times a_p$	1457,1	1	1457,1	38,67	0,002	2,38
	Erro	188,4	5	37,7			
				R ² = 99,69%			
Tipo B	v_c	50,6	1	50,6	4,44	0,090	0,07
	f_z	25019,7	1	25019,7	2196,88	0,000	36,02
	a_p	42103,7	1	42103,7	3696,95	0,000	60,55
	v_c^2	68,7	1	68,7	6,03	0,058	0,10
	f_z^2	101,0	1	101,0	8,87	0,032	0,15
	a_p^2	102,7	1	102,7	9,02	0,031	0,15
	$v_c \times f_z$	423,1	1	423,1	37,15	0,092	0,08
	$v_c \times a_p$	158,5	1	158,5	13,91	0,014	0,23
	$f_z \times a_p$	1416,9	1	1416,9	124,41	0,000	2,04
	Erro	56,9	5	11,4			
				R ² = 99,92%			

SQ: soma dos quadrados **GL:** graus de liberdade **MQ:** média quadrática **F:** valor F calculado

III – ANOVA completa para parcela dinâmica da força de usinagem (ΔF_U).

	Fator	SQ	GL	MQ	F	P-valor	Proporção (%)
Tipo A	v_c	302,6	1	302,6	4,74	0,081	0,29
	f_z	15242,6	1	15242,6	238,98	0,000	14,48
	a_p	85160,6	1	85160,6	1335,18	0,000	80,89
	v_c^2	106,2	1	106,2	1,66	0,253	0,10
	f_z^2	70,3	1	70,3	1,10	0,342	0,07
	a_p^2	84,6	1	84,6	1,33	0,301	0,08
	$v_c \times f_z$	194,6	1	194,6	3,05	0,141	0,19
	$v_c \times a_p$	6,0	1	6,0	0,09	0,771	0,01
	$f_z \times a_p$	3776,1	1	3776,1	59,20	0,005	3,59
	Erro	319	5	63,8			
				R ² = 99,70%			
Tipo B	v_c	739,2	1	739,2	17,85	0,008	0,66
	f_z	18460,8	1	18460,8	445,86	0,000	16,48
	a_p	87529,3	1	87529,3	2113,99	0,000	78,16
	v_c^2	147,3	1	147,3	3,56	0,118	0,13
	f_z^2	73,7	1	73,7	1,78	0,240	0,07
	a_p^2	239,8	1	239,8	5,79	0,061	0,21
	$v_c \times f_z$	214,1	1	214,1	4,46	0,081	0,37
	$v_c \times a_p$	69,7	1	69,7	1,68	0,251	0,06
	$f_z \times a_p$	3850,2	1	3850,2	92,99	0,000	3,44
	Erro	207	5	41,4			
				R ² = 99,82%			

SQ: soma dos quadrados **GL:** graus de liberdade **MQ:** média quadrática **F:** valor F calculado

IV – ANOVA completa para a rugosidade R_a gerada no fresamento do AISI 316.

	Fator	SQ	GL	MQ	F	P-valor	Proporção (%)
Tipo A	v_c	0,000200	1	0,000200	0,01	0,908	0,04
	f_z	0,013068	1	0,013068	0,96	0,372	2,42
	a_p	0,280001	1	0,280001	20,59	0,006	51,77
	v_c^2	0,046385	1	0,046385	3,41	0,124	8,58
	f_z^2	0,024878	1	0,024878	1,83	0,234	4,60
	a_p^2	0,024878	1	0,024878	1,83	0,234	4,60
	$v_c \times f_z$	0,013611	1	0,013611	1,00	0,363	2,52
	$v_c \times a_p$	0,059211	1	0,059211	4,36	0,091	10,95
	$f_z \times a_p$	0,003403	1	0,003403	0,25	0,638	0,63
	Erro	0,067981	5	0,013596			
				$R^2 = 87,43\%$			
Tipo B	v_c	0,005168	1	0,005168	0,58	0,480	2,19
	f_z	0,011001	1	0,011001	1,24	0,316	4,65
	a_p	0,128356	1	0,128356	14,47	0,013	54,31
	v_c^2	0,000157	1	0,000157	0,02	0,899	0,07
	f_z^2	0,005386	1	0,005386	0,61	0,471	2,28
	a_p^2	0,000132	1	0,000132	0,01	0,908	0,06
	$v_c \times f_z$	0,003403	1	0,003403	0,38	0,563	1,44
	$v_c \times a_p$	0,020544	1	0,020544	2,32	0,189	8,69
	$f_z \times a_p$	0,017778	1	0,017778	2,00	0,216	7,52
	Erro	0,044355	5	0,008871			
				$R^2 = 81,23\%$			

SQ: soma dos quadrados **GL:** graus de liberdade **MQ:** média quadrática **F:** valor F calculado