

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE AS FORÇAS DE USINAGEM
GERADAS NO FRESAMENTO FRONTAL DE AÇOS INOXIDÁVEIS: UMA REVISÃO

por

Eduardo Sperotto

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, maio de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Sperotto, Eduardo

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE AS FORÇAS DE
USINAGEM GERADAS NO FRESAMENTO FRONTAL DE AÇOS

INOXIDÁVEIS: UMA REVISÃO / Eduardo Sperotto. -- 2021.

19 f.

Orientador: André João de Souza.

Coorientadora: Júlia Caniçali.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. aços inoxidáveis. 2. fresamento frontal. 3.
forças de usinagem. 4. planejamento de Box-Behnken. I.
Souza, André João de, orient. II. Caniçali, Júlia,
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Eduardo Sperotto

EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE AS FORÇAS DE USINAGEM
GERADAS NO FRESAMENTO FRONTAL DE AÇOS INOXIDÁVEIS: UMA REVISÃO

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientadora: Eng. Júlia Caniçali

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, 21 de maio de 2021

Aos meus pais, Vera e Cláudio.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. André João de Souza, pelos ensinamentos que garantiram a execução deste trabalho e ao apoio no meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Guilherme Vargas Schirmer, pela disponibilidade de auxílio e ensino técnico, apesar de não ter sido realizada a experimentações, por motivos de força maior.

À coorientadora e engenheira Júlia Caniçali, pelo grande apoio ao longo do trabalho e orientações durante o desenvolvimento do trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo ensino gratuito e de alta qualidade.

À minha família, por todo apoio e incentivo para alcançar meus objetivos, principalmente minha mãe Vera.

À minha namorada e amor da minha vida, Caroline Canani, pelo companheirismo, compreensão e apoio em tudo.

Sperotto, Eduardo. **Efeitos dos parâmetros de corte sobre as forças de usinagem geradas no fresamento frontal de aços inoxidáveis: uma revisão**. 2021. 19 fls. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas resistentes à corrosão devido ao seu alto teor de cromo, e são amplamente utilizadas em ambientes agressivos em altas temperaturas. Essas ligas possuem grande importância e utilidade para diversos setores industriais e tecnológicos devido às suas propriedades físico-químicas, principalmente a anticorrosiva. Portanto, a análise das forças geradas no fresamento de aços inoxidáveis é fundamental para o controle e a otimização do processo. Entretanto, o alto custo deste material exige uma adequada estruturação dos experimentos e pesquisas a respeito. Desse modo, o planejamento experimental de Box-Behnken possibilita trabalhar simultaneamente com um conjunto de fatores que visam demonstrar as variáveis controláveis de entrada que mais influenciam uma determinada variável de resposta do processo. Nessa perspectiva, uma revisão da literatura foi realizada acerca da influência dos parâmetros de corte sobre as forças de usinagem no fresamento frontal de aços inoxidáveis, demonstrando que o avanço por dente e a profundidade de corte influenciam fortemente essas forças.

Palavras-chave: aços inoxidáveis, fresamento frontal, forças de usinagem, planejamento de Box-Behnken.

Sperotto, Eduardo. **Cutting parameters effects on the machining forces generated in the front milling of stainless steels: a review**. 2021. 19 p. Mechanical Engineering End of Course Monography, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

Stainless steels are ferrous alloys resistant to corrosion due to their high chromium content, and they are widely used in aggressive environments at high temperatures. These alloys have great importance and utility for several industrial and technological sectors due to their physical and chemical properties, especially the anti-corrosion. Therefore, the analysis of the forces generated in stainless steel milling is fundamental for process control and optimization. However, the high cost of this material demands an adequate structuring of the experiments and researches about it. Thereby, the Box-Behnken experimental design makes it possible to work simultaneously with a set of factors that aim to highlight the controllable input variables that most influence a given process response variable. In this perspective, a literature review was carried out about the influence of the cutting parameters on the machining forces in the front milling of stainless steels, demonstrating that the feed per tooth and the axial depth of cut strongly influence these forces.

Keywords: stainless steels, front milling, machining forces, Box-Behnken Design.

NOMENCLATURA

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	Análise de Variância
ASS	<i>Austenitic Stainless Steel</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBD	<i>Box-Behnken Design</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DSS	<i>Duplex Stainless Steel</i>
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
FSS	<i>Ferritic Stainless Steel</i>
IMOA	<i>International Molybdenum Association</i>
MSS	<i>Martensitic Stainless Steel</i>
PREN	<i>Pitting Resistance Equivalent Number</i>
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
a_p	Profundidade de corte [mm]
a_e	Largura de corte [mm]
f_z	Avanço por dente [mm/rev.]
v_c	Velocidade de corte [m/min]
F_a	Força axial [N]
F_f	Força de avanço [N]
F_{ap}	Força de apoio [N]
F_r	Força radial [N]
F_p	Força passiva [N]
F_t	Força tangencial [N]
F_c	Força de corte [N]
F_x	Força na direção transversal [N]
F_y	Força na direção longitudinal [N]
F_z	Força na direção axial [N]
F_u	Força de usinagem [N]
μF_u	Parcela estática da força de usinagem [N]
ΔF_u	Parcela dinâmica da força de usinagem [N]
n	Rotação [rpm]
r_ϵ	Raio de ponta da ferramenta [mm]
L_H	Comprimento da haste da fresa [mm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO	2
2.1	O Processo de Fresamento	2
2.2	Os Aços Inoxidáveis	4
2.3	A Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis	6
2.4	As Forças de Usinagem	7
2.5	Box-Behnken Design	9
3	REVISÃO DA LITERATURA: RESULTADOS	10
4	CONCLUSÃO	14
5	REFERÊNCIAS	15

1 INTRODUÇÃO

Dentre as formas de usinagem convencional, o processo de fresamento envolve a utilização de uma ferramenta com geometria definida, geralmente multicortante, que executa o movimento de rotação em torno de seu próprio eixo, enquanto a peça e/ou a própria ferramenta desloca-se em trajetória definida. Os desgastes e as avarias das ferramentas de corte no fresamento estão associados a características como variações de temperatura e esforços mecânicos [Diniz et al., 2013; Ferraresi, 2018].

A teoria fundamental da usinagem e os processos envolvidos estão em constante desenvolvimento. O conhecimento das variáveis que governam um processo de usinagem promove elevado aumento da produtividade na indústria. Frequentemente, ligas de aço estão em contínuo desenvolvimento com foco em elevada resistência mecânica, menor custo, leveza e maior resistência ao calor e à corrosão. Nesse aspecto, o desenvolvimento de novos materiais traz obstáculos na sua usinabilidade [Nomani, 2014].

Os aços inoxidáveis são ligas a base de ferro (Fe) e cromo (Cr) e outros elementos de liga como titânio, níquel, alumínio, etc. [Callister, 2002]. São divididos em cinco classes: ferríticos, martensíticos, austeníticos, endurecíveis por precipitação e duplex. Além disso, a formação de uma película resistente de óxido de cromo, ou camada passiva, que apresenta alta estabilidade e aderência, atenuando a ação de meios ambientes agressivos. [Filho, 1997]. A seleção de aços inoxidáveis pode ser baseada principalmente na resistência à corrosão e oxidação, características de fabricação, disponibilidade, propriedades mecânicas em determinada faixa de temperaturas e custo de produção [Lula, 1986].

Uma forma de avaliar a usinabilidade de um material é através das forças geradas no processo. Geralmente, quanto maior a força de usinagem, maior a dificuldade de usinar o material [Barbosa, 2014]. Informações sobre as parcelas estáticas e dinâmicas da força de usinagem são importantes para o processo, uma vez que fornecem uma melhor compreensão da dinâmica da ferramenta e da operação de corte. Ademais, investigar estas forças contribui com a otimização de geometrias de corte, com o monitoramento da vida da ferramenta e com as circunstâncias que envolvem o processo, a peça e os elementos de fixação da máquina [Nassif, 2012].

A possibilidade de trabalhar de forma simultânea com um conjunto de fatores que exercem influência sobre um determinado processo é de grande interesse em pesquisas. Nesse contexto, o experimento de *Box-Behnken* (BBD), baseado na metodologia de superfície de resposta (RSM – *Response Surface Methodology*), fundamenta-se em: (i) estabelecer os objetivos, (ii) realizar a formulação de hipóteses, (iii) planejar e executar experimentos, (iv) analisar resultados, e (v) otimizar o processo. Esse método, desenvolvido em 1960 por George E. P. Box e Donald Behnken, consiste em um planejamento fatorial incompleto de segunda ordem, composto por três ou mais fatores em três níveis cada, que associa uma resposta a um gráfico de superfície (3D) ou de contorno (2D) [Montgomery, 2013].

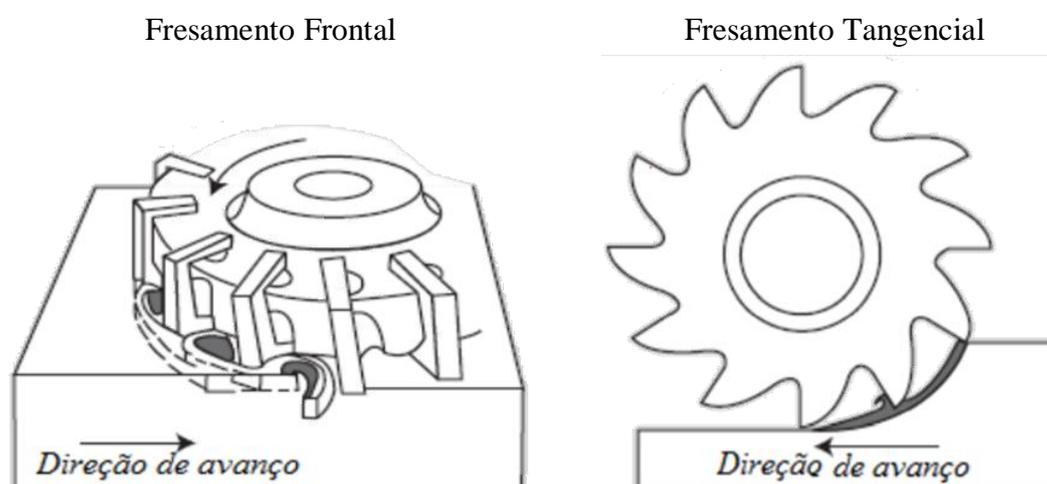
Dentro deste escopo, uma revisão da literatura foi realizada acerca dos efeitos dos parâmetros de corte sobre as forças geradas no fresamento frontal dos aços inoxidáveis, sendo este um assunto que possui relevância e aplicabilidade nos mais diversos setores industriais. O entendimento do comportamento das grandezas que governam o processo torna-o propenso a um melhor desenvolvimento e aplicação.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 O Processo de Fresamento

O fresamento é um processo de usinagem convencional com ferramenta de geometria definida denominada fresa, composta de arestas dispostas simetricamente em torno de um eixo. Esse processo tem como característica principal uma grande versatilidade, permitindo a geração de peças com inúmeras formas. Essa operação pode ser classificada como fresamento frontal (ou de topo), quando o plano da superfície usinada situa-se perpendicular ao eixo da ferramenta de corte; ou fresamento tangencial (ou periférico), quando o plano da superfície usinada encontra-se paralelo ao eixo da fresa [Diniz et al., 2013; Klocke, 2011]. A Figura 1 ilustra os processos de fresamento frontal e tangencial.

Figura 1 – Figura ilustrativa exemplificando o fresamento frontal e o tangencial.



Fonte: Adaptado de Machado et al.(2009).

No processo de fresamento, a espessura do cavaco varia constantemente em razão da rotação da fresa e do avanço da peça. A aresta de corte (ou gume) da fresa remove uma pequena porção de material na forma de cavacos individuais em uma operação com corte interrompido, onde cada dente da fresa atua num tempo inferior à metade do necessário para a ferramenta completar uma revolução [Drozda e Wick, 1983]. Apesar de ser complexo, o fresamento é um dos processos de usinagem mais universais, contendo amplas variações em ferramentas e máquinas. Como principais vantagens, tem-se a capacidade de produção de superfícies complexas com elevada qualidade, a grande variedade de ferramentas disponíveis e a alta taxa de remoção de material [Sandvik, 1994; Stemmer, 1993].

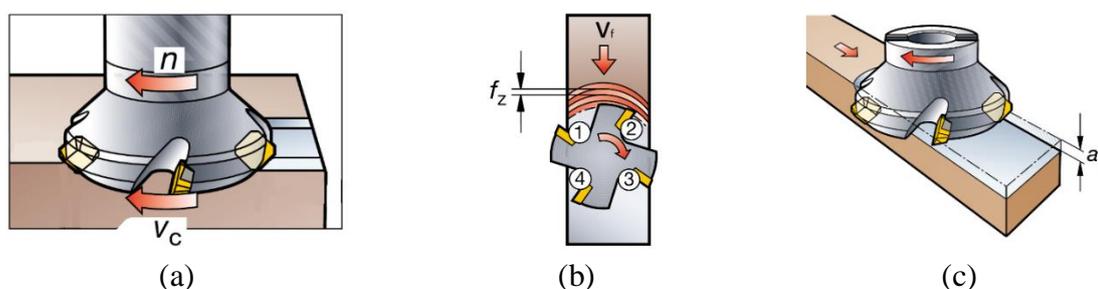
Tanto o fresamento frontal quanto o tangencial pode ser classificado como discordante ou concordante, dependendo do sentido de rotação da fresa em comparação com o sentido de avanço da peça. No primeiro (discordante), a espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo e o contato dos dentes da fresa é realizado com a superfície da peça encruada, causada pelo corte do dente anterior. Isso causa um aumento dos desgastes dos dentes da fresa. Além disso, a componente da força de usinagem puxa a peça da mesa. Já no segundo (concordante), a penetração da fresa na peça inicia com espessura de corte máxima e segue até atingir um valor nulo, promovendo um choque inicial que pode aumentar as avarias nos dentes da fresa. No entanto, a componente vertical empurra a peça em direção à mesa. No fresamento frontal

com fresa de topo (usinagem de rasgos) é comum a presença dos movimentos concordante e discordante de forma simultânea, denominado de corte combinado, estes movimentos relacionam a rotação com o avanço da fresa em relação à peça [Diniz et al., 2013; Klocke, 2011].

Kiswanto et al. (2014) citam que uma superfície de alta qualidade é obtida em fresamento através da seleção adequada dos parâmetros de corte. Dessa forma, em fresamento frontal, dados empíricos sugerem que o diâmetro efetivo da fresa (d_e) seja de 20 a 50% maior que a largura de corte (a_e) devido ao fato que o choque fresa-peça não deve ocorrer com espessura de corte próxima de zero ($h \cong 0$) em decorrência da formação de cavacos muito finos com alto valor de pressão específica de corte (K_s).

Para Diniz et al. (2013), os principais fatores a serem levados em conta com relação ao desgaste da ferramenta são a profundidade de corte e as variações de temperatura e esforços mecânicos. Entretanto, para obter um bom acabamento, as grandezas fundamentais do processo de fresamento são a velocidade de corte (v_c), a velocidade de avanço (v_f) e a profundidade de corte (a_p), ilustradas na Figura 2 e descritas a seguir.

Figura 2 – Parâmetros de corte no fresamento frontal: (a) rotação n e velocidade de corte v_c ; (b) avanço por dente f_z e velocidade de avanço v_f ; (c) profundidade de corte a_p



Fonte: Adaptado de Sandvik (1994)

Velocidade de corte (v_c) é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça [Diniz et al., 2013]. No fresamento, depende do diâmetro efetivo da ferramenta (d_e), em mm, e da rotação da ferramenta (n), em rpm, conforme Equação (1).

$$v_c [m/min] = \frac{\pi \cdot d_e [mm] \cdot n [rpm]}{1000} \quad (1)$$

Velocidade de avanço (v_f) é a velocidade instantânea do movimento de avanço em um ponto selecionado do gume em relação à peça [Stemmer, 1993]. Esse parâmetro está ligado diretamente ao acabamento da superfície e à potência da máquina [Wrublack et al., 2008] e depende do avanço por dente (f_z), do número de dentes da fresa (Z) e da rotação da ferramenta de corte (n), como mostra a Equação (2).

$$v_f [mm/min] = n [rpm] \cdot f_z [mm/dente] \cdot Z \quad (2)$$

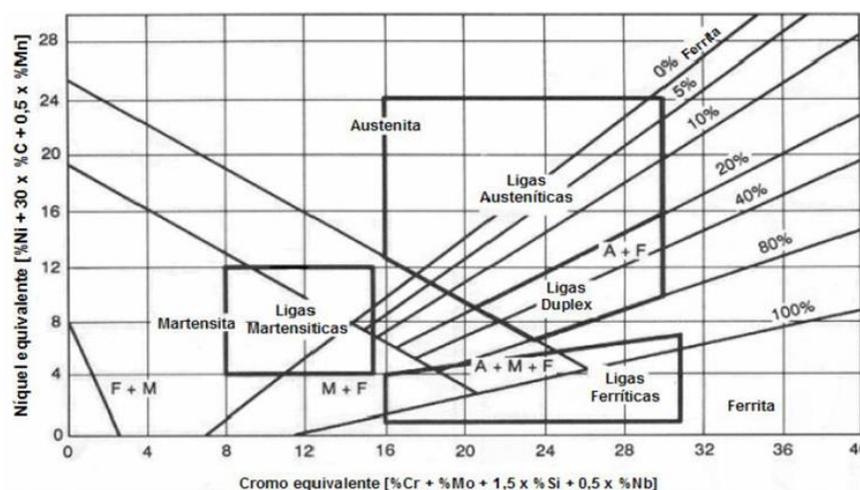
A profundidade de corte (a_p) é definida como a distância, em mm, na qual a ferramenta remove material na face da peça.

2.2 Os Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas à base de ferro contendo pelo menos 10,5% de cromo (indispensável para a formação de um filme passivo que previne corrosões atmosféricas leves a moderadas) e são divididos em cinco classes em função da sua microestrutura: ferríticos, martensíticos, austeníticos, endurecíveis por precipitação e duplex. Na seleção, os fatores mais importantes são a resistência à corrosão e às propriedades mecânicas para determinada faixa de temperatura [Washko e Aggen, 1990]. Estes aços possuem excelente resistência à corrosão e à oxidação devido a ação passivadora de cromo e níquel, que forma um filme superficial de óxido aderente e estável, protegendo contra ambientes corrosivos [Mariano et al., 2007].

O Diagrama de Schaeffler, presente na Figura 3, determina a classificação da estrutura de um aço inoxidável a partir da intersecção do eixo das abscissas (referente ao cromo equivalente) com o eixo das ordenadas (níquel equivalente), calculados a partir das Equações (3) e (4), respectivamente.

Figura 3 – Diagrama de Schaeffler utilizado na determinação da estrutura dos aços inoxidáveis a partir do cromo equivalente e níquel equivalente.



Fonte: Schaeffler (1949)

$$Ni_{equivalente} = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn \quad (3)$$

$$Cr_{equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb \quad (4)$$

Os aços inoxidáveis ferríticos (FSS) são definidos como ligas *Fe-Cr* contendo de 11 a 26% em massa de cromo e teor de carbono abaixo de 0,1%. Em temperatura ambiente, são formados por uma matriz ferrítica (α), com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Além do carbono, o nitrogênio também está presente na composição, e contribuem para a estabilização da fase austenita. Os FSS não contêm níquel, o que torna seu custo mais baixo e mais estável do que os aços inoxidáveis austeníticos, sendo principalmente aplicados na fabricação de utensílios domésticos, revestimentos internos e tubulações de soluções aquosas contendo cloretos ou água do mar [Labiapari et al., 2015].

Nos aços inoxidáveis martensíticos (MSS), o carbono está em uma concentração que permite a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas e durante o resfriamento a

austenita se transforma em martensita, sendo uma fase rica em carbono, frágil e muito dura. A alta dureza do material promove uma alta resistência ao desgaste. Destaca-se que estes materiais passam a ser resistentes à corrosão somente depois da têmpera [Carbó, 2008]. Os MSS possuem boa resistência à corrosão e oxidação, devido à ação passivante do cromo e níquel. São utilizados principalmente em indústrias de petróleo [Mariano, 2007].

Os aços inoxidáveis austeníticos (ASS) são formados pela adição de níquel ou manganês, possuem estrutura cúbica de face centrada (CFC). Com isso, ocorre a expansão da região da fase gama (austenita), suprimindo a formação de ferrita alfa. Assim, com um mínimo de 8% de níquel pode-se obter uma estrutura austenítica estável à temperatura ambiente. Devido sua alta porcentagem de cromo e níquel, são os aços inoxidáveis mais resistentes à corrosão dos grupos dos aços inoxidáveis. Essa classe não sofre nenhuma transformação durante o tratamento térmico, mas podem ser significativamente endurecidos por trabalho a frio. Além disso, a substituição do níquel pelo manganês traz algumas vantagens econômicas, afetando pouco sua resistência a corrosão [Diniz et al., 2013]. Os ASS representam a maior parcela de todo o aço inoxidável produzido, sendo que em temperatura ambiente, possuem baixo limite de escoamento e elevada ductilidade. Suas principais aplicações são nos setores de indústrias químicas, alimentícias, refino de petróleo e em diversos casos em que é necessária uma boa resistência à corrosão, facilidade de limpeza e boas características de fabricação [Camargo, 2008].

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação foram desenvolvidos a partir da necessidade da indústria aeroespacial de utilizar aços com resistência mecânica e à corrosão em temperaturas mais elevadas, superiores aos dos aços inoxidáveis tradicionais [Bressan, 2008]. As composições são cuidadosamente balanceadas para produzirem um endurecimento por meio da transformação da austenita em martensita e posterior precipitação, via tratamento térmico de envelhecimento [Peckner et al., 1977].

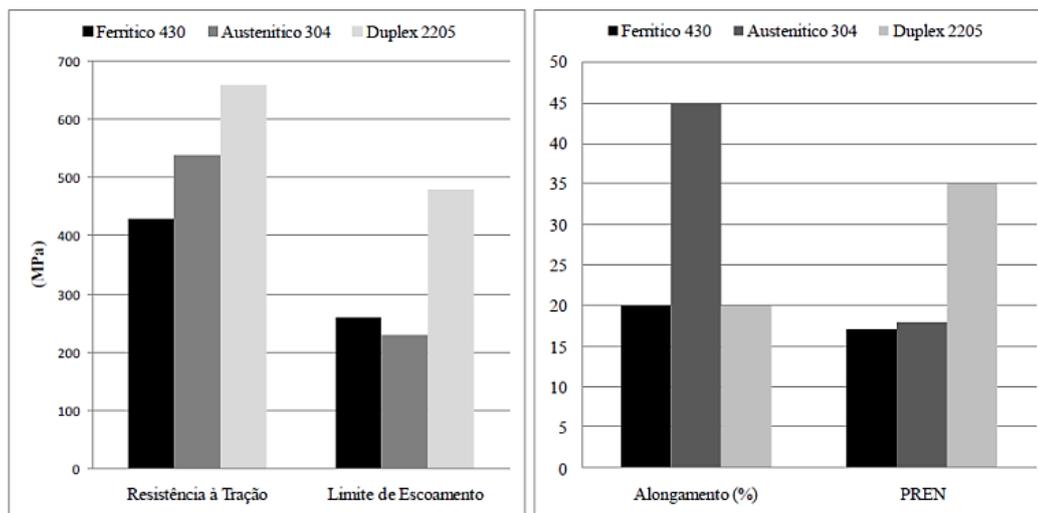
O aço inoxidável duplex (DSS) é formado principalmente por ferro, cromo, níquel e outros elementos em menor porcentagem. As duas fases constituintes são formadas por uma estrutura ferrítica (CCC) e outra austenítica (CFC), geralmente em proporções equivalentes [IMOA, 2014; Solomon e Devine, 1979]. Dentre as principais vantagens na sua utilização, tem-se: elevado limite de escoamento, baixo coeficiente de expansão térmica, alta resistência à corrosão (com possibilidade de aumento pela adição de molibdênio), e a alternativa de realizar tratamento térmico (o que aumenta a sua resistência mecânica). As aplicações de ligas de DSS estão em contínua expansão, sendo utilizadas em oleodutos, em usos estruturais na terra ou no mar, em tratamento de água, leite e produtos químicos, além de indústrias de celulose, digestores, válvulas e tanques de navios petroleiros. O DSS mais utilizado nessas aplicações é o *standard* DSS 2205 [Nomani, 2014; Olsson e Snis, 2007].

Uma das equações mais utilizadas na comparação da resistência à corrosão por pite diz respeito ao equivalente de resistência a pite (*PRE*), que é calculado a partir da composição química do material (Equação 5) [Senatore et al., 2007]. A Figura 4 apresenta dados comparativos de propriedades mecânicas de diferentes classes de aços inoxidáveis.

$$PRE = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%Ni \quad (5)$$

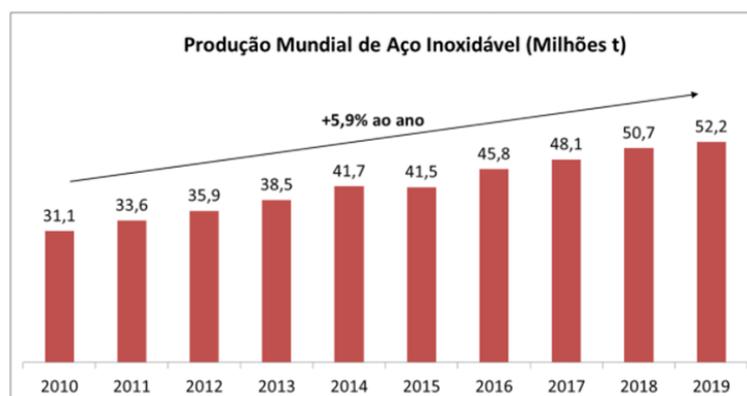
De acordo com a Associação Brasileira do Aço Inoxidável [ABINOX, 2021], uma das grandes vantagens do aço inoxidável é a sua reciclabilidade, ou seja, a característica de poder ser reciclado inúmeras vezes sem perder as suas propriedades. No caso do Brasil, aproximadamente 30% de todo o aço produzido é proveniente de sucata. Sendo assim, vale destacar que as taxas de crescimento do consumo do aço inoxidável apresentaram níveis muito expressivos e a sua produção mundial cresce em média 5,9% ao ano desde 2010, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 4 – Análise comparativa das propriedades mecânicas de diferentes aços inoxidáveis



Fonte: BSSA (2011)

Figura 5 – Produção mundial do aço inoxidável, em milhões de toneladas, entre 2010 e 2019.



Fonte: ABINOX (2021)

2.3 A Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis

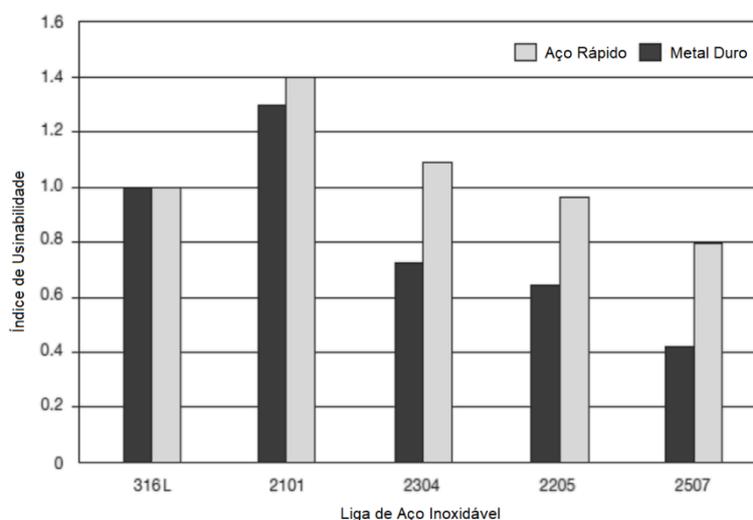
A usinabilidade é definida como uma grandeza tecnológica que compara um conjunto de propriedades de usinagem do material em relação a outro tomado como padrão, ou seja, indica o grau de dificuldade de se usinar um material [Ferraresi, 2018]. Esse parâmetro depende das propriedades mecânicas (resistência, tenacidade, ductilidade e dureza), da composição química, da microestrutura, das inclusões e das operações a frio ou a quente as quais o material foi submetido [Diniz et al., 2013].

Segundo a ASM Handbook (1997), a usinabilidade dos aços inoxidáveis mostra uma tendência de formação de cavacos longos e flexíveis, que aderem à ferramenta ou formam aresta postiça de corte, além de dificultarem sua remoção. Essa baixa usinabilidade é consequência da sua composição química que apresenta propriedades de elevada resistência mecânica e à corrosão. [Belejchack, 1997]. Entretanto, existem diferenças quando comparados entre suas diferentes classes; enquanto os ASS têm tendência gerar cavacos pastosos e com tendência de formação de aresta postiça de corte, os MSS possuem altos teores de carbono e são difíceis de usar devido

sua alta dureza, exigindo um maior esforço e corte [Diniz et al., 2013]. Ademais, DSS possuem baixa usinabilidade devido à sua alta taxa de endurecimento por deformação, o que causa um alto grau de encruamento, sendo que o baixo teor de enxofre dificulta a quebra do cavaco, o tornando abrasivo e prejudicial à ferramenta [IMOA, 2014].

Dados da fabricante finlandesa de aços inoxidáveis Outokumpu (2018) mostram comparativamente a usinabilidade de diferentes ligas de aços inoxidáveis com ferramentas de aço rápido e metal duro. As ligas DSS 2304, 2205 possuem uma baixa usinabilidade em comparação com o ASS 316L. Além disso, o *lean* DSS 2101 apresenta a melhor usinabilidade e o *super* DSS 2507 a pior em comparação com as demais ligas, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Comparação da usinabilidade de alguns aços inoxidáveis com ferramentas de aço rápido e metal duro.



Fonte: Adaptada de Outokumpu (2018)

2.4 As Forças de Usinagem

Em termos quantitativos, a análise das forças envolvidas na usinagem é de grande importância para o controle e a otimização dos processos [Zheng e Liang, 1997]. Além de permitir um maior entendimento da dinâmica das máquinas-ferramentas, também auxilia no projeto dos elementos mecânicos da máquina, na determinação dos níveis dos parâmetros de corte, na estimativa do desgaste da ferramenta e na precisão dimensional para certas condições de corte [Diniz et al., 2013; Ferraresi, 2018]. Um dos fatores relevantes no monitoramento da força de usinagem é a possibilidade de estimar a potência necessária ao corte, o que permite um estudo sobre a viabilidade econômica do processo [Machado et al., 2011].

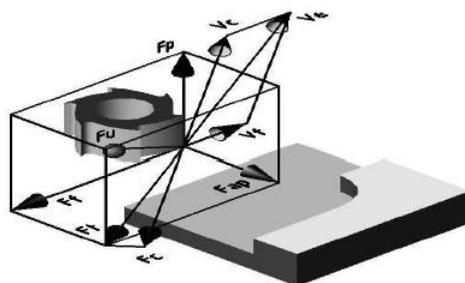
A média de uma amostragem de dados da força de usinagem (F_u) em um determinado intervalo de tempo representa sua parcela estática (μF_u), já a oscilação em torno do valor médio está associada com sua parcela dinâmica (ΔF_u) [Toh, 2004]. Assim, pela Equação (6):

$$F_u = \mu F_u \pm \Delta F_u \quad (6)$$

A força total resultante, ou força de usinagem F_u , pode ser decomposta em componentes e direções conhecidas e, assim, calculados os esforços resultantes [Diniz et al., 2013, Ferraresi, 2018; Klocke (2011); Machado et al., 2011]. Nessa perspectiva, a Norma DIN 6584 (1982)

apresenta a decomposição de F_u ao longo do plano de trabalho, denominada de força ativa F_t , e em uma componente perpendicular a este plano, denominada de força passiva F_p . A força ativa pode ser decomposta em força de corte F_c e força de avanço F_f , e é utilizada no cálculo da potência de usinagem, já que está posicionada no plano onde os movimentos de usinagem são realizados. Finalmente, a projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular ao avanço é denominada de força de apoio F_{ap} . A Figura 7 indica a direção das componentes da força de usinagem em fresamento.

Figura 7 – Componentes ortogonais da força de usinagem para o processo de fresamento



Fonte: DIN 6584 (1982)

De acordo com Ribeiro et al. (2006), a força ativa pode ser expressa como a resultante das componentes F_{ap} , F_c e F_f no fresamento, já que o ângulo de contato da ferramenta com a peça (φ) varia constantemente no processo. Por outro lado, a resultante da força ativa também pode ser obtida mais facilmente pela análise vetorial das componentes F_x e F_y , conforme Equação (7). Já a força passiva F_p representa a projeção da força de usinagem em um plano perpendicular ao plano de trabalho e que não contribui para a potência de usinagem, pois é perpendicular aos movimentos de corte e de avanço, coincidindo com a força exercida no eixo z, como mostra a Equação (8). Entretanto, F_p é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte e consequente variação das tolerâncias de forma e dimensionais. Assim, a força de usinagem F_u pode ser determinada a partir da soma vetorial das suas componentes ativa F_t e passiva F_p (Equação 9).

$$F_t = \sqrt{F_{ap}^2 + F_c^2 + F_f^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (7)$$

$$F_p = F_z \quad (8)$$

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad (9)$$

Sória (2016) cita que as três componentes da força de usinagem (F_u) podem ser determinadas a partir da área da seção transversal de corte [$a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(\varphi)$] em função do ângulo de contato (φ) e das pressões específicas de corte nas três direções (K_{sr} , K_{st} e K_{sa}). Dessa maneira, obtêm-se as forças radial (F_r), tangencial (F_t) e axial (F_a) através das Equações (10), (11) e (12).

$$F_r = K_{sr} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (10)$$

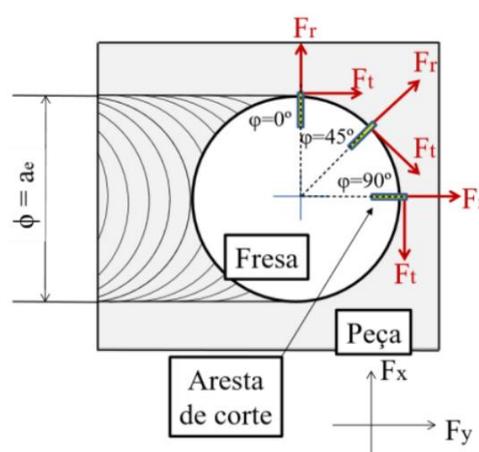
$$F_t = K_{st} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (11)$$

$$F_a = K_{sa} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (12)$$

Nessa perspectiva, tanto a resultante da soma vetorial das forças nas direções ortogonais x , y e z como a resultante da soma vetorial nas direções radial, tangencial e axial representam a força de usinagem, conforme mostra a Equação (13). A Figura 8 ilustra a decomposição das forças ortogonais na direção radial, tangencial e axial.

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_a^2} \quad (13)$$

Figura 8 – Decomposição das forças ortogonais nas direções radial, tangencial e axial



Fonte: Sória (2016)

Segundo Castillo (2005), os sistemas mais utilizados na determinação das componentes ortogonais da força durante o processo de usinagem são compostos por transdutores piezelétricos, que são capazes de emitir um sinal elétrico proporcional à deformação sofrida pelo material a partir de um carregamento. Nesse caso, com a amplificação e a digitalização deste sinal elétrico, pode-se realizar uma análise qualitativa e quantitativa das componentes da força. Além disso, os dinamômetros piezelétricos são capazes de medir os esforços nos planos cartesianos e assim, viabilizar a avaliação dessas componentes ortogonais.

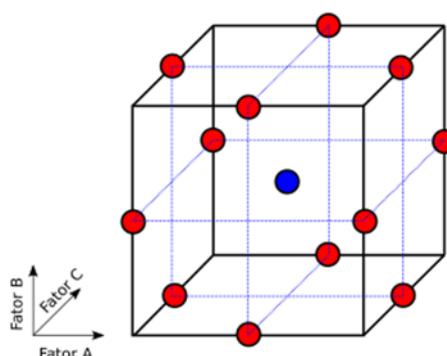
2.5 Box-Behnken Design

Um planejamento adequado de um experimento requer um método de otimização estatística que trabalha de forma simultânea com um conjunto de fatores capaz de informar os parâmetros que mais exercem influência sobre determinado processo [Ferreira et al., 2007; Gomes, 2013]. Diante disso, o experimento de Box-Behnken (BBD), que foi desenvolvido pela primeira vez em 1960 por George E.P. Box e Donald Behnken, envolve uma técnica de otimização estatística capaz de reduzir o número de condições de um experimento a partir de um planejamento em níveis rotacionais, ou quase rotacionais [Gomes, 2013; Montgomery, 2013]. Após a definição do número de variáveis controláveis de entrada (k) que influenciam no processo, distribui-se essas

variáveis em três níveis: alto (+1), central (0) e baixo (-1); a partir disso, geram-se combinações aleatórias. Através do ponto central, a repetitividade do experimento é testada de forma aleatória por “ r ” vezes [Hackenhaar, 2016]. Esse projeto é de segunda ordem com base em experimentos fatoriais incompletos de três níveis. Uma das vantagens é que esta técnica não contém combinações para as quais todos os fatores encontram-se simultaneamente em seus níveis mais altos ou mais baixos, ou seja, evitam experimentos em condições extrema para os quais podem ocorrer resultados insatisfatórios [Ferreira et al., 2007]. Deste modo, o número de execuções (N) requeridas no BDD é definido pela Equação (14). A Figura 9 ilustra de que maneira é distribuído o conjunto de fatores em torno do ponto central.

$$N = 2k \cdot (k - 1) + r \quad (14)$$

Figura 9 – Projeto de experimentos Box-Behnken para três fatores.



Fonte: Montgomery (2013)

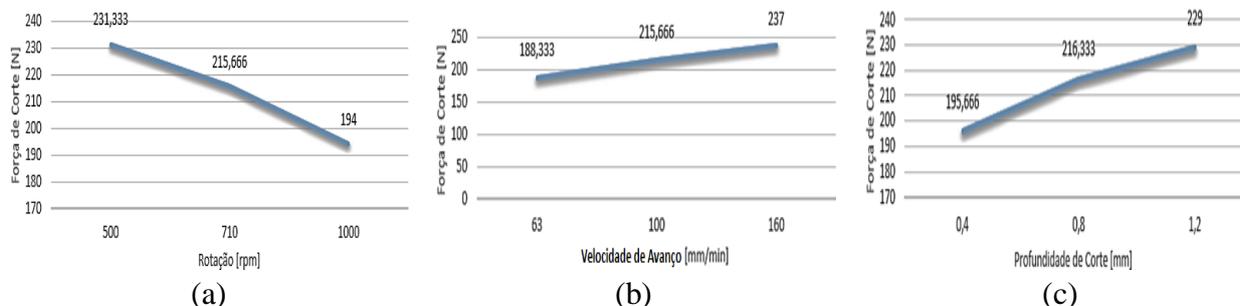
Policena et al. (2018) investigaram a influência dos parâmetros de corte v_c , f_z e a_p utilizados no fresamento frontal de acabamento sobre a rugosidade do DSS 2205 através do BDD. O desempenho do par ferramenta-peça mostrou que o avanço por dente (f_z) foi o parâmetro mais significativo sobre o acabamento. A combinação otimizada, em que os menores valores de f_z (0,05 mm/dente), v_c (30 m/min) e a_p (0,2 mm) utilizados geraram os níveis mais baixos das rugosidades R_a e R_z , comprova a eficácia do método.

3 REVISÃO DA LITERATURA: RESULTADOS

Selvaraj (2017) estudou a influência de certos parâmetros de entrada no fresamento a seco do aço inoxidável superduplex SDSS 2750 a fim de otimizá-los em função da força de corte (F_c), medições ocorreram através de um dinamômetro *Kistler*. Os parâmetros analisados foram rotação (n), velocidade de avanço (v_f) e profundidade de corte (a_p). Na análise, o incremento de n de 500 para 710 rpm aumentou a média da F_c em torno de 7,2%. Quando o aumento foi de 710 para 1000 rpm, a média da F_c diminuiu em 10%. Além disso, o aumento de v_f de 63 para 100 mm/min aumentou a média da F_c em 14,5%, enquanto no aumento de 100 para 160 mm/min, a média da F_c aumentou em torno de 9,9%. Por fim, o aumento de a_p de 0,4 para 0,8 mm aumentou a média da F_c em 10,5 %, enquanto no aumento de 0,8 para 1,2 mm, o aumento na média da F_c foi de 5,8%. A Figura 10 ilustra a variação da F_c com os parâmetros n , v_f e a_p . Para validação dos resultados obtidos, a análise de variância (ANOVA) foi realizada, demonstrando que o parâmetro mais

significativo foi v_f , seguido de n , e por último a_p , influenciando F_c em 46%, 27% e 21%, respectivamente. Os níveis ótimos em que F_c foi reduzida significativamente no processo foram $n = 1000$ rpm, $v_f = 63$ mm/min e $a_p = 0,4$ mm.

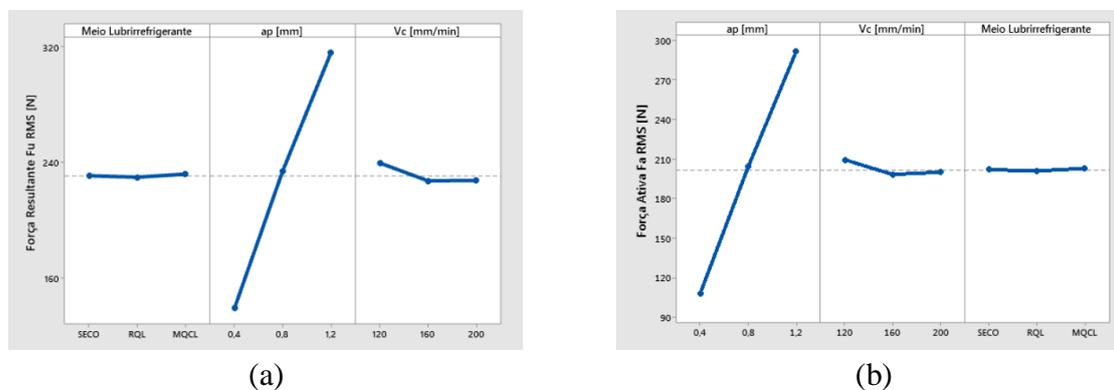
Figura 10 – Variação da força de corte (F_c) com o incremento dos parâmetros de entrada: (a) rotação (n), (b) velocidade de avanço (v_f); (c) profundidade de corte (a_p).



Fonte: Adaptado de Selvaraj (2017)

Gonzaga (2019) realizou uma análise através do método BBD sobre a influência da aplicação de métodos alternativos de lubrificação nas forças de usinagem (resultante F_u e ativa F_a) geradas durante o fresamento frontal do ASS 304. Foram avaliados três métodos lubrificantes: mínima quantidade de lubrificante refrigerado (MQCL), quantidade reduzida de lubrificante (RQL) e usinagem a seco. Os resultados da ANOVA para um intervalo de confiança de 95% mostraram que as forças não sofreram influência dos métodos lubrificantes, sendo o a profundidade axial de corte o único parâmetro significativo. Além disso, constatou que o maior e o menor valor para F_u foi observado quando aplicou-se o maior e o menor nível de a_p , respectivamente. A Figura 11 apresenta os gráficos dos efeitos principais da variação do meio lubrificante, da profundidade de corte e da velocidade de corte sobre a força de usinagem e sobre a força ativa. Nota-se que o efeito linear da profundidade de corte influencia quase que exclusivamente no comportamento das forças e que a velocidade de corte não apresenta nenhuma influência significativa nos resultados obtidos.

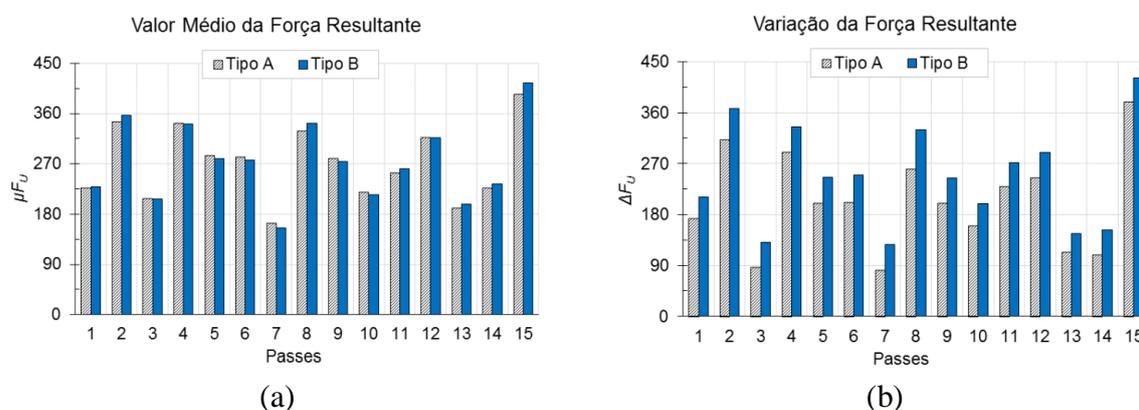
Figura 11 – Efeito da variação do meio lubrificante, da profundidade de corte e da velocidade de corte sobre : (a) F_u ; (b) F_a .



Fonte: Gonzaga (2019)

Duran (2018) investigou as componentes estática e dinâmica da força de usinagem no fresamento frontal de acabamento do ASS 316 em amostras com diferentes percentuais de elementos de liga. As amostras foram divididas em tipos A e B em função da sua composição química e suas porcentagens máxima e mínima dos principais elementos estão de acordo com ASM, 1995. Os parâmetros variados no estudo foram v_c (de 120 m/min até 200 m/min) f_z (de 0,05 até 0,015 mm/dente) e a_p (de 0,6 até 1,8 mm). Nesse contexto, percebeu-se que μF_u praticamente não difere entre os tipos A e B (Fig. 12a). Entretanto, a ΔF_u do tipo B foi superior em todos os passes (Fig. 12b). Esta maior instabilidade pode ter sido causada pela maior dureza do tipo B e pela maior resistência ao cisalhamento, resultantes dos maiores teores de boro e cobalto. A Análise de Variância (ANOVA) realizada com um intervalo de confiança de 95% indicou que os comportamentos de μF_u e ΔF_u sofrem influência significativa da profundidade axial de corte (a_p) e do avanço por dente (f_z).

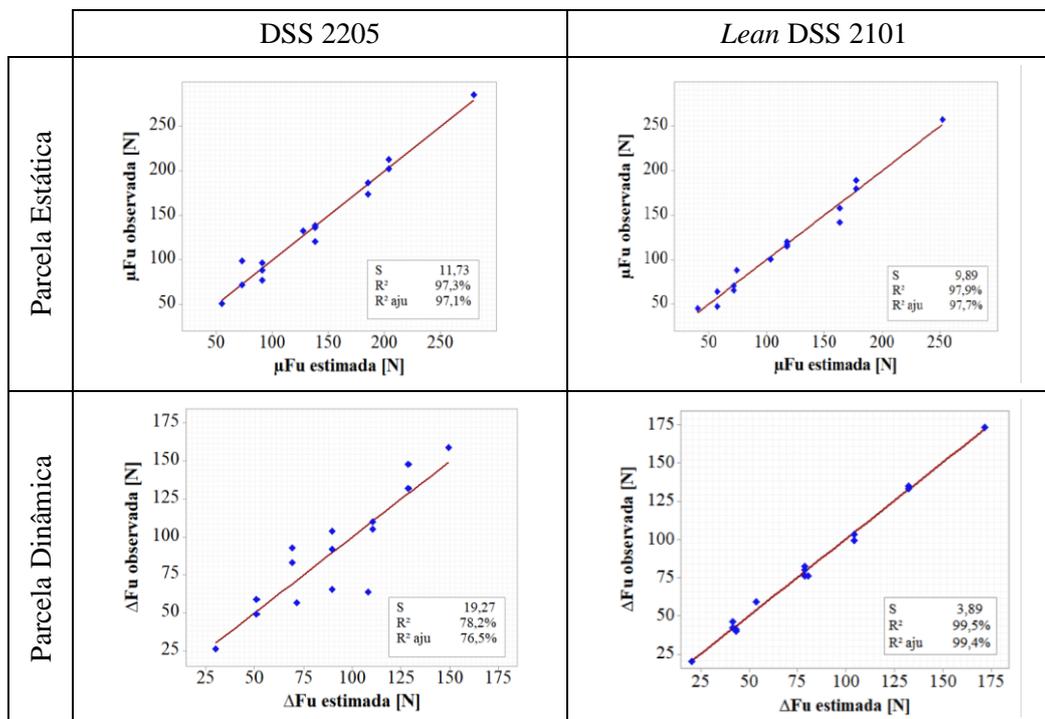
Figura 12 – Comportamento da força de usinagem gerada no fresamento do ASS 316 com diferentes composições químicas (a) μF_u ; (b) ΔF_u .



Fonte: Duran (2018)

Garcia (2019) avaliou as forças de usinagem F_u no fresamento frontal a seco das ligas DSS 2205 e *lean* DSS 2101 através do método BBD. No experimento, os fatores controláveis do processo v_c , f_z e a_p foram aleatorizadas e constatou-se que os menores valores de força para ambos os materiais foram verificados na combinação $v_c = 95$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/dente e $a_p = 0,2$ mm (menor área da seção transversal de corte), enquanto os maiores valores de força foram obtidos na combinação de $v_c = 95$ m/min, $f_z = 0,2$ mm/dente e $a_p = 0,6$ mm (maior área da seção de corte). Com isso, demonstrou-se a grande influência dos parâmetros f_z e a_p sobre os esforços de corte. Notou-se também que as parcelas dinâmicas da força de usinagem (ΔF_u) sempre foram menores que as parcelas estáticas (μF_u), demonstrando que a usinagem ocorreu sempre em regime estável. No decorrer do estudo, o autor comparou os dados experimentais com o modelo de regressão linear múltipla proposto via análise estatística. Nesse contexto, observou-se que a ΔF_u do DSS 2205 apresentou maior desvio-padrão (s) dos dados em relação ao *lean* DSS 2101, provavelmente devido à menor usinabilidade do primeiro (maior dispersão dos valores). Entretanto, para os dois materiais, os coeficientes de determinação (R^2) e de determinação ajustado (R^2_{aju}) foram semelhantes e acima de 70%, indicando que os modelos propostos são eficientes para a aplicação nas condições testadas. A Figura 13 demonstra graficamente a comparação entre os dados experimentados com os estimados de μF_u e ΔF_u , nas quais as retas em vermelho representam o modelo de regressão linear múltipla e os pontos em azul, os dados experimentais.

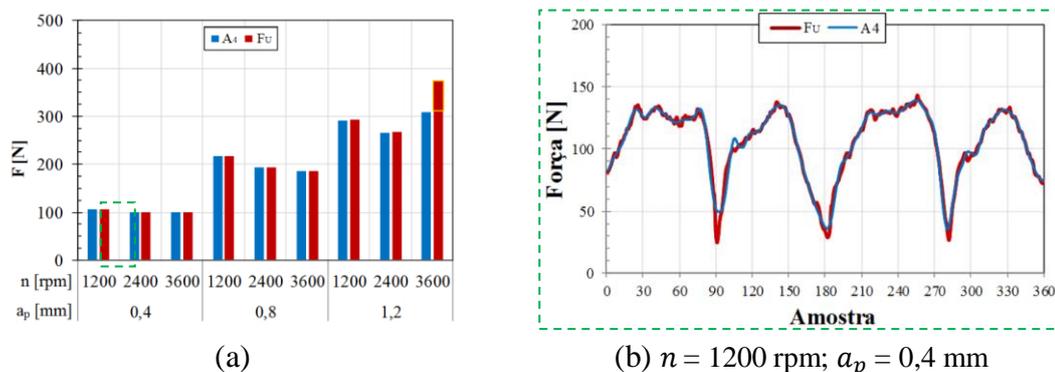
Figura 13 – Comparação entre os dados experimentais com os dados estimados das parcelas estáticas e dinâmicas das forças de usinagem no fresamento frontal do DSS



Fonte: Garcia (2019)

Sória (2016) verificou a influência dos parâmetros de entrada (rotação n , profundidade de corte a_p , raio de ponta da ferramenta r_ϵ e o comprimento da haste da fresa L_H) na força de usinagem (F_u) durante o fresamento frontal a seco do ASS 316. Nos sinais monitorados, o autor afirma que as amplitudes máxima e mínima representam os instantes em que a espessura de corte é máxima e mínima, respectivamente. A partir disso, aplicou-se a transformada discreta de Wavelet (DWT), a qual é capaz de representar uma função (ou uma série de dados) originalmente descrita no domínio tempo de forma a ser possível analisá-la em diferentes escalas de frequência e tempo. A aproximação A_4 da DWT, a qual representa as vibrações de baixa frequência, foi bastante semelhante à F_u para todos os níveis de n e a_p analisados (Fig. 14).

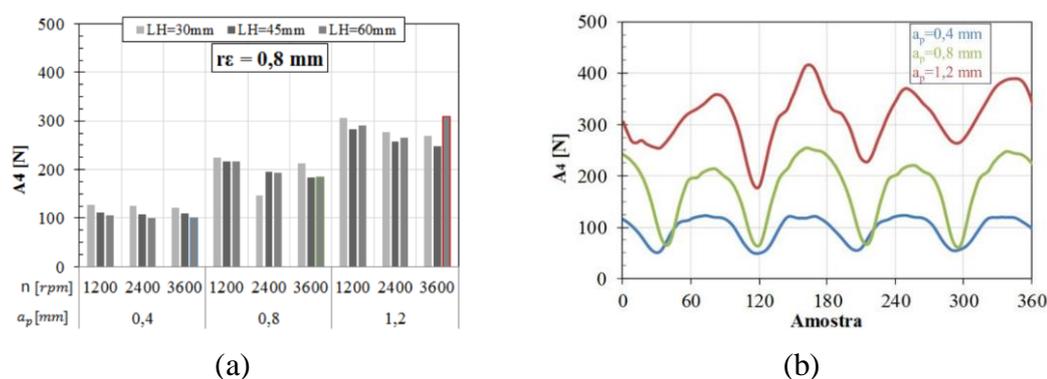
Figura 14 – Semelhança entre A_4 e F_u para todos os níveis de n e a_p analisados.



Fonte: Sória (2016)

Por fim, o autor constatou que o aumento de a_p intensifica a vibração em baixas frequências de F_u em razão do aumento da área de contato ferramenta-peça, o que resulta em um aumento diretamente proporcional da força de corte (F_c). Além disso, observou que quando $\Delta F_u > \mu F_u$, o corte é realizado em regime instável, causando vibrações que podem afetar a qualidade da superfície usinada e danificar a ferramenta de corte. A Figura 15a ilustra graficamente um aumento praticamente proporcional da vibração em baixas frequências da força de usinagem com o aumento de a_p para os três comprimentos de haste L_H (30, 54 e 60 mm), enquanto que a Figura 15b mostra o comportamento da aproximação A4 da DWT com a variação de a_p (0,4; 0,8 e 1,2 mm) considerando $n = 3600$ rpm e $L_H = 60$ mm.

Figura 15 – Vibrações de baixa frequência “A4” geradas com: (a) $r_\epsilon = 0,8$ mm; (b) variação de a_p com $n = 3600$ rpm e $L_H = 60$ mm.



Fonte: Sória (2016)

4 CONCLUSÃO

Nesse trabalho realizou-se uma revisão bibliográfica acerca dos sinais da força de usinagem no fresamento frontal de aços inoxidáveis. Além disso, avaliou-se um crescente acréscimo na produção desse material, com aplicabilidade em inúmeros setores industriais. Com base na literatura, as investigações sobre o comportamento dos aços inoxidáveis são fundamentais para o desenvolvimento da tecnologia, pois requerem uma pesquisa intensiva no campo da otimização dos parâmetros de usinagem para promover uma ótima qualidade superficial, capaz de aumentar a vida útil da peça ou componente em serviço.

Através do experimento de Box-Behnken (BBD) e da análise de variância (ANOVA), atesta-se que o avanço por dente (f_z) é a variável de entrada mais significativa nas forças de usinagem. Ademais, a combinação adequada de f_z com níveis apropriados de velocidade de corte (v_c) e profundidade de corte (a_p) propicia a atenuação das forças no processo de fresamento. Na análise, constatou-se um aumento praticamente proporcional da vibração em baixas frequências da força de usinagem com o aumento de a_p no fresamento frontal dos aços inoxidáveis. Notou-se ainda que o incremento dos parâmetros f_z e a_p resultam em um aumento da área da seção de corte, promovendo um aumento considerável da força de usinagem (F_u). A partir dos sinais apresentados de F_u no fresamento frontal dos aços inoxidáveis, demonstrou-se que a usinagem ocorre em um regime estável quando $\mu F_u > \Delta F_u$ e quando o corte é realizado em regime instável, podem ocorrer vibrações que afetam a qualidade da superfície usinada e o desempenho da ferramenta de corte.

A investigação da influência dos parâmetros de corte na usinabilidade do aço inoxidável contribui no conhecimento acerca do melhor acabamento da superfície usinada, maior tempo de vida útil da ferramenta e menores forças de usinagem. Sendo assim, o estudo do material em questão possui notável relevância na indústria e no desenvolvimento de novas pesquisas, visto que as dificuldades intrínsecas do processo de usinagem podem ser enfrentadas através do conhecimento e otimização do processo.

5 REFERÊNCIAS

ABINOX – Associação Brasileira do Aço Inoxidável Disponível em:

<<https://www.abinox.org.br/site/biblioteca-tecnica.php?cat=artigos-tecnicos>> - Acesso em: 24 de março de 2021.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia–Transformação**. Editora Arte & Ciência, v. 2, 1997.

BARBOSA, P. A. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**.

Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, USP, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/T.3.2014.tde-12122014-153825>>

BARROS B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4.ed., Bookman Editora, 2010.

BELEJCHACK, P. **Machining stainless steel. Advanced materials and process**, n. 12, p. 23-25, 1994.

BRESSAN, J. D. et al. **Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing. Journal of materials processing technology**, v. 205, n. 1-3, p. 353-359, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.251>>

BSSA - British Stainless Steel Association. **Introduction to Stainless Steel**. 2011. Disponível em: <<http://bssa.org.uk/technical-help/technical-library/>> - Acesso em: 10 de março de 2021.

CAMARGO, Robson de et al. Verificação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos através do processo de furação. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008.

CARBÓ, HÉCTOR MARIO. **Aços inoxidáveis: aplicações e especificações**. Belo Horizonte: ArcelorMittal Inox, 2008.

CALLISTER, W. D. J. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. John Wiley & Sons, Inc., 2002. 589 p.

CASTILLO, W. J. G. et al. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**. 2005. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101938>>

CHARLES, J. **Composition and properties of duplex stainless steels**. Welding in the World/Le Soudage Dans Le Monde, n. 36, p. 43-54, 1995. Disponível em: <<https://www.infona.pl/resource/bwmetal.element.elsevier-3962ba2b-c776-31e1-9302-0671de33d0ea>>.

DAVIS, J. R. et al. (Ed.). **Stainless steels**. ASM international, 1994.

DIB, M. H. M. **Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – São Paulo. Disponível em: <http://doi.org/10.11606/D.18.2013.tde-31102013-165527>>

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 8.ed., São Paulo: Artliber, 2013.

DROZDA, T. J.; WICK, C. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**, Vol. 1. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1983.

DURAN, Matheus Nunes. **Estudo comparativo do fresamento frontal de acabamento do aço inoxidável austenítico AISI 316 em amostras com diferentes percentuais de certos elementos de liga**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em:<<http://hdl.handle.net/10183/181395>>

FERREIRA, S. L. C. et al. "Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems." *Journal of chromatography A* 1158.1-2, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.03.051>>

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**, 18ª reimpressão, Editora Blücher, São Paulo – SP, 2018.

FILHO, V.L.F., 1997, **Acabamentos dos Aços Inoxidáveis**, Apostila – ACESITA, p. 51.

GAITONDE, V. N. et al. **Integrating Box-Behnken design with genetic algorithm to determine the optimal parametric combination for minimizing burr size in drilling of AISI 316L stainless steel**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 37, n. 3-4, p. 230-240, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-007-0957-4>>

GARCIA, R. F. **Análise comparativa do fresamento frontal de acabamento em aços inoxidáveis duplex DX 2205 e LDX 2101**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/194547>>

GOMES, S. V. F. **Aplicação do planejamento Box-Behnken na otimização de método de extração de flavonoides usando extração acelerada com solventes (ASE) e quantificação de marcadores químicos por CLAE-DAD-UV em espécies do gênero Passiflora**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/16138>>

GONZAGA, Douglas Ferreira. **Investigação sobre a aplicação de métodos alternativos de lubrificarrefrigeração no fresamento frontal de acabamento de um aço inoxidável AISI 304**.

2019. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/211367>>

GOWTHAMAN, P. S.; JEYAKUMAR, S.; SARAVANAN, B. A. **Machinability and tool wear mechanism of Duplex stainless steel—A review**. *Materials Today: Proceedings*, v. 26, p. 1423-1429, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.295>>

GUNN, R. (Ed.). **Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications**. Woodhead Publishing, 1997.

HACKENHAAR, W. **Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem MAG em diferentes geometrias de juntas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/141208>>

HÜBNER, H. B.; SOUZA, A. J. **Avaliação da rugosidade gerada no fresamento frontal assimétrico do ferro fundido nodular DIN GGG50**. 8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Agosto, 2014.

IMO, 2014. **Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels**. International Molybdenum Association, Pittsburgh, 3ª edição. Disponível em: <<https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads>>

KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. L.; KO, T. J. **The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation**. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, n. 4, p. 435-450, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.05.003>>

KLOCKE, F., **Manufacturing Processes 1: Cutting**, RWTH-Aachen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

KOYEE, R. D. et al. **Modeling and optimization of turning duplex stainless steels**. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, n. 4, p. 451-467, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.05.004>>

LABIAPARI, Wilian da Silva et al. **Abrasão-corrosão em aços inoxidáveis ferríticos**. 2015. Universidade Federal de Uberlândia – Minas Gerais. 2015. Tese de Doutorado. Disponível em: <<https://doi.org/10.14393/ufu.te.2015.72>>

LULA, R.A. **Stainless Steel**. USA: American Society for Metals, 1986. 173p.

MACHADO A. R., ABRÃO A. M., COELHO R. T., SILVA M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2ª ed. São Paulo – SP: Blucher, 2011.

MARIANO, N.A. et al. **Caracterização da temperabilidade e das curvas de transformação de fase de aços inoxidáveis martensítico do tipo FeCrNi**. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto* 60(1), p.163-167, 2007.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc. Arizona State University, USA. 8ªEd., 2013.

NASSIF, F. B. **Análise das forças resultantes da aplicação de ferramentas de corte alisadora (wiper) e convencional (standard) no torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420.** (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/66444>>

NEVES, D., CAMARGO, R., DEONÍSIO, C. C. C.; NOVASKI, 2003, " **Evaluation of the Machinability of Stainless Steel ABNT 304 and Stainless Steel Villares 304 UF with hss Tin Coated Twisted Drills**", Proceedings of 17th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), São Paulo - SP

NOMANI, Jr. **Built-up edge mechanisms in the machining of duplex stainless steels.** Deakin University, 2014. Tese de Doutorado. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10536/DRO/DU:30074699>

OLSSON, J.; SNIS, M. **Duplex – A new generation of stainless steels for desalination plants.** Desalination, v. 205, n. 1-3, p. 104-113, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.051>

Outokumpu. **Handbook.** <https://www.outokumpu.com/en/products/forms/hot-rolled-coil-strip-and-plate>, 2018, Acesso em: 22-05-2021.

PECKNER, D. et al. **Wrought precipitation-hardenable stainless steel.** Handbook of Stainless Steel, Mc Graw-Hill Book Company, p. 7-1, 1977.

POLICENA, M, et al. **Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 98, p. 1617. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2356-4>>

RIBEIRO, J. L. S.; ABRÃO, A. M.; SALES, W. F. **Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes.** 16º POSMEC, p. 1-10, 2006.

SANDVIK COROMANT (FIRM). **Modern metal cutting: a practical handbook.** Sandvik Coromant, 1994. Disponível em <http://www.sandvik.coromant.com/br>. Acessado em 15 de Abril de 2021.

SCHAEFFLER, Anton L. **Constitution diagram for stainless steel weld metal.** Metal progress, v. 56, n. 11, p. 680, 1949. Disponível em: <<https://ci.nii.ac.jp/naid/10026309068/>>

SELVARAJ, D. P. **Optimization of cutting force of duplex stainless steel in dry milling operation,** Materials Today: Proceedings, vol. 10: p. 11141-11147, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.078>>

SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L.** Rem: Revista Escola de Minas, v. 60, n. 1, p. 175-181, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000100027>>.

SOLOMON, H.; DEVINE, T. "**Influence of microstructure on the mechanical properties and localized corrosion of a duplex stainless steel,**" in *MiCon 78: Optimization of Processing, Properties, and Service Performance Through Microstructural Control*, ed. H. Abrams, G. Maniar, D. Nail, and H. Solomon (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1979), 430-461. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/STP36883S>>.

SÓRIA, B. S. **Estudo do comportamento das vibrações em fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316 utilizando transformada de Wavelet**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/152768>>

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 1993. Ed. da UFSC.

TAN, H. et al. **Annealing temperature effect on the pitting corrosion resistance of plasma arc welded joints of duplex stainless steel UNS S32304 in 1.0 M NaCl**. Corrosion Science, v. 53, n. 6, p. 2191-2200, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.02.041>>

TOH, C. K. **A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling**. Journal of Materials Processing Technology, versão 152, n. 3, p. 346-356, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.382>>

WASHKO, S. D.; AGGEN, D. v.1: **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. ASM Handbook, 1990.

WRUBLACK, O. PILATTI, L.A. PEDROSO, B. **Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto**. 4º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Campos Gerais, MG, Agosto, 2008.

ZHENG, L.; LIANG, S. Y. **Identification of cutter axis tilt in end milling**. 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2831093>

ZUCAS, R. A. **Aços inoxidáveis Duplex: Características, aplicação na indústria de Óleo & Gás e soldabilidade**. p. 1-11, 2004.