

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

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FRESAMENTO FRONTAL EM AÇO HARDOX® 450  
BASEADA NA RUGOSIDADE E NA FORÇA RESULTANTE

por

Émerson dos Santos Passari

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, dezembro 2019.

## CIP - Catalogação na Publicação

PASSARI, EMERSON S  
OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FRESAMENTO FRONTAL EM  
AÇO HARDOX@450 BASEADA NA RUGOSIDADE E NA FORÇA  
RESULTANTE / EMERSON S PASSARI. -- 2019.  
17 f.  
Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Matheus dos Santos Polly.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Otimização de Parâmetros. 2. Hardox 450. 3.  
Fresamento Frontal. 4. Rugosidade. 5. Força  
Resultante. I. Souza, André João de, orient. II.  
Polly, Matheus dos Santos, coorient. III. Título.

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

Émerson dos Santos Passari

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FRESAMENTO FRONTAL EM AÇO HARDOX®450  
BASEADA NA RUGOSIDADE E NA FORÇA RESULTANTE

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

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: M. Eng. Matheus dos Santos Polly

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2019.

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais e avós, por todo o conhecimento e amor.  
À minha namorada, pela compreensão e incentivo.  
Aos amigos da RS Racing.  
Ao meu orientador e mentor.  
E a todos que contribuíram com minha formação acadêmica.

*“A única história que vale alguma coisa é a história que fazemos hoje”.*  
(Henry Ford)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
 ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
 TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FRESAMENTO FRONTAL EM  
 AÇO HARDOX®450 BASEADA NA RUGOSIDADE E NA FORÇA  
 RESULTANTE**

**PASSARI, Émerson dos Santos**  
 emerson.passari@gmail.com

**Resumo.** O Hardox®450 é um aço estrutural laminado e temperado, com alto teor de manganês (o que induz ao encruamento), com alta dureza (450 HB), alta resistência mecânica (1200 MPa), projetado para resistir ao desgaste por abrasão, trincas e quebras. Devido a suas excelentes propriedades mecânicas, tem-se uma maior vida útil de equipamentos como britadores, caçambas e engrenagens. Porém, tais propriedades resultam em baixa usinabilidade. Assim, objetiva-se encontrar os parâmetros ideais de fresamento frontal em aço Hardox®450 visando menores valores de rugosidade média ( $R_a$ ) e força resultante ( $F_R$ ). Com a utilização do projeto de experimentos Box-Behnken, os parâmetros de entrada (velocidade de corte  $v_c$ , avanço por dente  $f_z$  e profundidade axial de corte  $a_p$ ) foram combinados em três níveis cada. A partir da análise de variância, observou-se que  $a_p$  foi o parâmetro mais significativo. Na otimização dos parâmetros, a otimização multivariada sugere a combinação  $v_c = 88$  m/min,  $f_z = 0,10$  mm/dente e  $a_p = 0,20$  mm para obtenção de um processo com menores valores de  $F_R$  (111 N) e  $R_a$  (0,135  $\mu$ m) simultaneamente. Além disso, a presença do desgaste precoce da ferramenta sugere um estudo mais aprofundado sobre o fenômeno.

**Palavras-chave:** Hardox®450, fresamento frontal, rugosidade média, força resultante, otimização.

**Abstract.** Hardox®450 is a rolled, hardened structural steel that has high manganese content (which induces work hardening), high hardness (450 HB), and high mechanical strength (1200 MPa), which is designed to resist by abrasion wear, cracks, and breakages. This material allows a longer service life of equipment such as crushers, buckets, and gears due to their excellent mechanical properties. However, these properties result in low machinability. Therefore, the objective is to find the best Hardox®450 steel end milling parameters aiming at lower values of average roughness ( $R_a$ ) and machining force ( $F_R$ ). The input parameters (cutting speed  $v_c$ , feed per tooth  $f_z$ , and axial depth of cut  $a_p$ ) were combined on every three levels using the Box-Behnken design of experiments. The analysis of variance showed that  $a_p$  was the most significant parameter. Improving the combination of input parameters, the multivariate optimization suggests  $v_c = 88$  m/min,  $f_z = 0.10$  mm/tooth and  $a_p = 0.20$  mm to obtain a process with lower  $F_R$  (111 N) and  $R_a$  (0.135  $\mu$ m) values simultaneously. Besides, the occurrence of early tool wear suggests a more detailed study of this phenomenon.

**Keywords:** Hardox®450, end milling, average roughness, machining force, optimization.

## 1. INTRODUÇÃO

Utilizado em ambientes de alta abrasão, o Hardox®450 possui propriedades singulares, características de materiais de elevada resistência ao desgaste. Devido ao elevado teor de manganês (Mn), componente que induz ao encruamento, aliado aos demais componentes de liga, este material é comumente empregado para aumentar a vida útil de equipamentos como britadores, caçambas, peneiras, alimentadores, engrenagens etc. Desta forma, devido a tais características mecânicas, este material apresenta baixa usinabilidade (SSAB, 2018).

Dentre os processos possíveis para a usinagem deste material, tem-se o fresamento como um dos processos mais recorrentes, possuindo ampla diversidade de configurações entre peça e ferramenta, garantindo a possibilidade de geometrias complexas. Neste processo, a superfície usinada é fixada na máquina enquanto a ferramenta rotativa de geometria definida (fresa) é responsável pelo movimento de remoção de material (Souza, 2016).

A usinagem possui diferentes variáveis independentes de entrada (ou variáveis controláveis) tais como o material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, parâmetros de corte e e

tipo de máquina-ferramenta. Porém, uma vez definido o material a ser usinado, por vezes tem-se a geometria e material de ferramenta, bem como a própria máquina-ferramenta, de difíceis alterações para executar determinado processo, tornando-se mais simples alterar os parâmetros de corte aplicados. Dessa forma, tais parâmetros tornam-se variáveis de maior maleabilidade e maior adaptação ao processo.

No fresamento, destacam-se os seguintes parâmetros de corte: profundidade axial de corte ( $a_p$ ), profundidade radial de corte ( $a_e$ ), velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço por dente ( $f_z$ ). A influência de cada parâmetro irá variar de acordo com a operação de corte e a aplicação. Além disso, as diferentes combinações desses parâmetros também podem representar mudanças significativas no processo.

Dentre as variáveis dependentes de saída (ou variáveis de resposta) que sofrem influência direta desses parâmetros de corte, pode-se ter as forças geradas pelo processo e o acabamento da superfície usinada. A primeira trata da avaliação da usinabilidade do material através da intensidade da força de usinagem, sendo maior a usinabilidade quanto menor for a magnitude da força (Barbosa, 2014). O acabamento da superfície usinada, por sua vez, diz respeito à rugosidade resultante e indica a qualidade da superfície obtida pelo processo.

A combinação destas duas análises possibilita verificar, através de análises estatísticas, a influência das variáveis de controle, sendo possível ser obtida através de planejamento e análise de experimentos (Duran, 2018). Essa abordagem é viável através da utilização da metodologia da superfície de resposta via Box-Behnken Design (BBD), que permite a obtenção de parâmetros de entrada otimizados para determinadas condições de parâmetros de saída.

De acordo com Ferreira et al. (2007), o BBD realiza o planejamento e análise dos três fatores mais influentes do processo através da atribuição de níveis (-1, 0, +1) para as variáveis de cada fator. Possui também a vantagem de necessitar um número pequeno de amostras (ou testes), visto que a atribuição de níveis permite um cruzamento de dados a serem avaliados em cada ensaio.

Assim, o presente trabalho visa encontrar níveis ideais para os parâmetros de corte (velocidade de corte  $v_c$ , profundidade axial de corte  $a_p$ , e avanço por dente  $f_z$ ) no fresamento frontal de Hardox<sup>®</sup> 450 a fim de se obter os menores valores de rugosidade média  $R_a$  e força resultante  $F_R$ .

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1. Hardox<sup>®</sup> 450

Conhecido por sua alta resistência à abrasão e excelentes propriedades estruturais, o Hardox<sup>®</sup>450 apresenta dureza nominal de 450 HB e limite de escoamento típico de 1250 MPa (SSAB, 2018).

Sua composição química conta a presença de elevado teor de manganês (entre 1,3% e 1,6%), sendo considerado um aço ao manganês ou mesmo um aço ao manganês-níquel, quando o Níquel atinge teores satisfatórios (de 0,5% a 2,5%). A adição de Ni nos aços-manganês aumenta a resistência ao choque e diminui a fragilidade do revenido (Chiaverini, 1988).

Segundo Chiaverini (1988), a faixa de composição típica de aços-manganês é de 0,25~0,50% C, 1,0~3,0% Mn e 0,25~0,70% Si. O autor também destaca a aplicação desta liga em equipamentos de escavação e construções rodoviárias que necessitam de tenacidade e alta resistência à abrasão.

A Tabela 1 apresenta os valores máximos dos elementos químicos presentes nos diferentes tipos de configurações das quais o Hardox<sup>®</sup> é comercializado.

Tabela 1 – Composição Química de Hardox<sup>®</sup> (SSAB, 2018)

Grau	C (máx %)	Si (máx %)	Mn (máx %)	P (máx %)	S (máx %)	Cr (máx %)	Ni (máx %)	Mo (máx %)	B (máx %)
Tiras a Frio	0,18	0,25	1,30	0,015	0,004	0,10	0,10	0,04	0,003
Chapas grossas e tiras	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,005

## 2.2. Parâmetros de Fresamento

As variáveis do processo de fresamento dividem-se entre variáveis independentes de entrada, das quais pode-se intervir, e as dependentes de saída, cujos valores são resultados do processo (ASM, 1995). Para o fresamento frontal, destacam-se os seguintes parâmetros: profundidade axial de corte ( $a_p$ ), profundidade radial de corte ( $a_e$ ), rotação ( $n$ ) ou velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço por volta ( $f$ ) ou avanço por dente ( $f_z$ ).

A profundidade axial de corte ( $a_p$ ) no fresamento frontal é definida como a profundidade de penetração da ferramenta no plano perpendicular ao de trabalho. Já a profundidade radial de corte ( $a_e$ ) é dada pelo diâmetro da fresa e representa a largura de penetração da ferramenta paralela ao plano de trabalho (Diniz et. al, 2013). A velocidade de corte ( $v_c$ ) é definida como a velocidade tangencial instantânea de um ponto da aresta de corte em relação à peça, sendo esta função da rotação ( $n$ ) e do diâmetro ( $d$ ) da fresa (Souza, 2016). Avanço é o deslocamento do centro da ferramenta por volta na direção de usinagem (Sória, 2016).

Uma das formas de avaliar a usinabilidade do material é através das pressões específicas de corte, sendo uma relação entre força e área da seção de corte da ferramenta. Assim, as forças envolvidas no processo são parâmetros significativos a se avaliar durante a usinagem. No fresamento, a força de usinagem resultante pode ser decomposta em três componentes ortogonais definidas como radial ( $F_r$ ), Tangencial ( $F_t$ ) e Axial ( $F_a$ ).

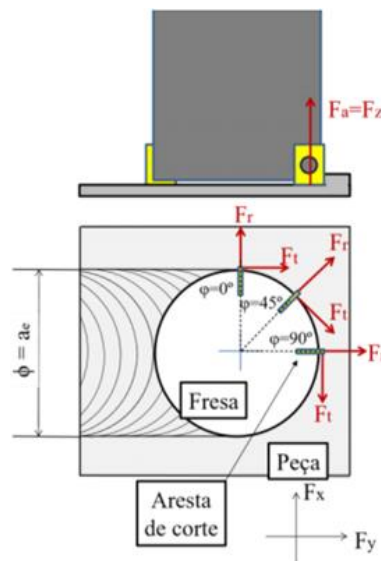


Figura 1 – Forças geradas pelo processo de fresamento.

Por se tratarem de forças ortogonais, o valor da força de usinagem (ou força resultante) é obtido através da Eq. (1), esta é definida como a força de usinagem.

$$F_R \text{ [N]} = \sqrt{F_r^2 + F_t^2 + F_a^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

O acabamento da superfície usinada, resultante do fresamento, é uma variável de saída que fornece dados significativos para a análise da usinabilidade do material. A superfície usinada pode ser avaliada através de erros macrogeométricos (formas, dimensões e orientações) e microgeométricos (rugosidades e ondulações). A textura permite avaliar variações no processo, como características do material, desgaste excessivo da ferramenta, parâmetros de corte e instabilidades na máquina (Santos



e Sales, 2007). Segundo Machado et. al (2011), fatores presentes na usinagem como deformações plásticas, vibração, geração de calor, reações químicas e tensões residuais possuem influência sobre a superfície usinada.

Rugosidade média ( $R_a$ ) é definida como a média aritmética dos valores absolutos de afastamento em relação à linha média, avaliados em um determinado percurso de medição. O parâmetro é usualmente utilizado para mensurar a qualidade do acabamento da superfície usinada e permitir a análise dos parâmetros de corte empregados. É um dos parâmetros mais comumente utilizados e de fácil equacionamento. Apesar de não definir a forma das irregularidades do perfil pode ser empregada em superfícies geradas pelo fresamento, por possuírem sulcos bem orientados e marcas superficiais que não alteram excessivamente seu valor (Tavares, 2012).

### 2.3. Box-Behnken Design

Por definição, o projeto de experimento de Box-Behnken (BBD) é um tipo de metodologia de superfície de resposta que não contém um experimento fatorial completo ou fracionado incorporado. (Minitab, 2019).

Conforme Baumgaertner (2017), o método BBD pode ser aplicado tanto para otimizações estatísticas como para análise da relevância de cada fator de entrada do processo e de suas combinações, que irão influir sobre a variável de resposta, levando-se em consideração os coeficientes de regressão. De acordo com Ferreira et al. (2007), esse método baseia-se na combinação dos fatores através de três níveis: baixo (-1), médio (0) e alto (+1). Como vantagem, a técnica apresenta estimativas eficientes para coeficientes de primeira e segunda ordem. Além disso, pode ser executada com um menor número de amostras. Para uma experimentação com três fatores de entrada, o número de amostras é reduzido para 12, acrescidos de 3 amostras do ponto central.

Ao predizer a otimização de parâmetros, a análise de significância de cada fator e suas combinações resulta em parâmetros ideias para o processo. Assim, o BBD utiliza a tabela de coeficientes de regressão e probabilidade de significância (p-valor) para a criação de uma análise de variância (ANOVA). Os p-valores informam a significância estatística de cada fator de entrada, considerando como significativos os fatores que tenham seu valor atribuído inferior ao nível de significância estipulado ( $\alpha$ ) (Minitab, 2010).

Durante a ANOVA, ao erro estão associados não apenas os erros aleatórios e estatísticos do processo como também as variáveis que apresentaram p-valor elevado, representando muito baixa significância ao processo. Assim, à medida que se filtra a análise, estes fatores passam a compor a faixa de erros, o que permite apresentar apenas valores significativos. Esta abordagem se dá através da utilização de uma ANOVA reduzida que analisa apenas as variáveis que possuem significância para o modelo (Minitab, 2010). Segundo Montgomery (2007), o valor do coeficiente de determinação  $R^2 > 70\%$  já permite representar um modelo estatístico adequado.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma chapa de aço Hardox<sup>®</sup>450 com certificação conforme descrita na Tabela 2 (Certificado de Inspeção do Fabricante SSAB nº EN 10 204 - 3.1), foi utilizada na experimentação.

Tabela 2 – Composição Química do Corpo de Prova

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Outros
0,177	0,170	1,29	0,011	0,001	0,25	0,05	0,02	0,0015	0,073

A chapa apresenta 3,5 mm de espessura e o corpo de prova foi projetado conforme os requisitos prévios para a fixação no dinamômetro. Devido à pequena espessura, os corpos de provas permitiram

que apenas um dos lados (uma face) fosse utilizado na experimentação. Assim, foram planejados seis passes de fresamento em cada corpo de prova, resultando em seis amostras (Fig. 2).

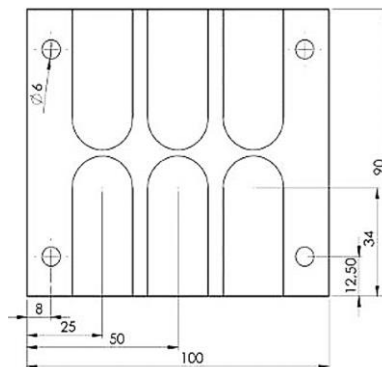


Figura 2 – Desenho do corpo de prova com as dimensões após a usinagem.

A máquina utilizada para o processo foi o centro de usinagem ROMI Discovery 308 localizada no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS), Fig. 4a. Esta possui rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW. Durante o processo utilizou-se lubrificação em abundância (540 l/h) do biolubrificante isento de óleos Bondmann BD-Fluid B90 com diluição 1:20.

Foram utilizados dois insertos Walter Tools Tiger-tec Silver ADMT10T304R-F56 WKP35S, com raio de ponta  $r_\epsilon = 0,4$  mm (Fig. 3a), fixados em um cabeçote Walter Tools Xtra-tec F4042R.W20.02 de diâmetro  $d = 20$  mm. De classes ISO P e ISO K, estes insertos são indicados tanto para a usinagem de aços quanto de ferros fundidos. Em sua composição, possuem revestimento CVD TiCN +  $Al_2O_3$  (Walter Tools, 2010). A verificação do erro de batimento durante o *preset* da ferramenta através do relógio apalpador Digimess (resolução de 0,01 mm) indicou um desvio de 0,04 mm (Fig. 3b).

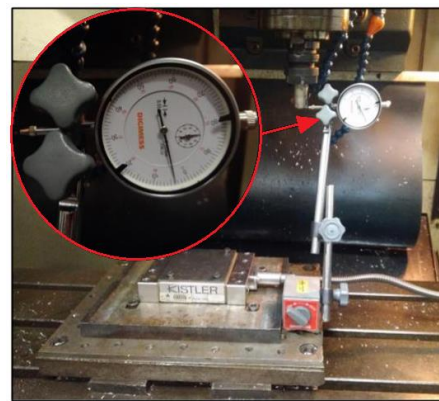
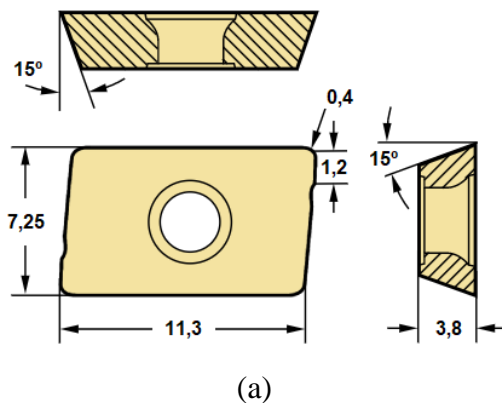


Figura 3 – (a) Dimensões do inserto; (b) verificação do erro de batimento da ferramenta.

A aquisição dos valores das componentes ortogonais da força de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) foram obtidos através da utilização do dinamômetro piezelétrico Kistler®9129A, conectado a um condicionador de sinais Kistler®5070A10100 (Fig. 4b). O primeiro é composto de quatro cristais de quartzo dispostos simetricamente, capazes de medir os valores das componentes ortogonais de força em qualquer região da plataforma. O condicionador de sinais possui a função de amplificar, filtrar e condicionar o sinal analógico, transformando a carga elétrica recebida ( $pC$ ) em tensão elétrica (V) proporcional à força aplicada ( $F$ ). Para o experimento, é necessário também determinar um valor de fundo de escala, que corresponde ao máximo valor de força medido pela máxima tensão de saída. O valor de fundo de escala adotado no processo foi de 5 kN. A taxa de aquisição de 5000 pontos por

segundo (5 kS/s) captada pela placa de aquisição de dados PCIM-DAS 1602/16 da *Measuring Computing*<sup>®</sup>. Através desta, os sinais digitais das componentes ortogonais de força são enviados e processados para o software LabVIEW<sup>™</sup>9.0.

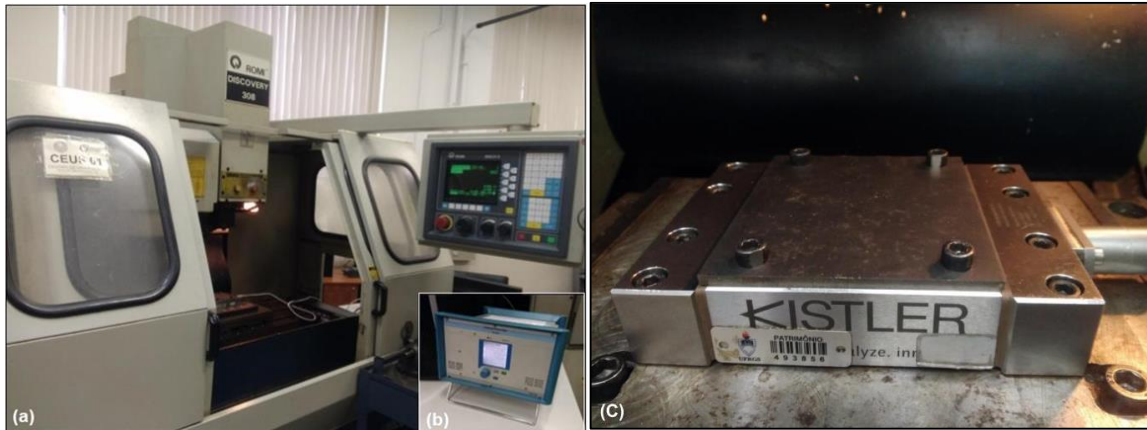


Figura 4 – (a) Centro de usinagem Romi Discovery 308; (b) Condicionador de sinais KISTLER 5070A; (c) Dinamômetro piezelétrico Kistler<sup>®</sup>9129A com o corpo de prova fixado.

No procedimento, utilizou-se o BBD para a definição da sequência do experimento. Os parâmetros de entrada definidos foram: velocidade de corte  $v_c$  [m/min], avanço por dente  $f_z$  [mm/dente] e profundidade axial de corte  $a_p$  [mm] em três níveis cada (Tab. 3). Definiu-se então um total de 15 passes (dentre estes, três passes da configuração central) variando os valores conforme os níveis de parâmetros recomendados. Utilizando o software Minitab<sup>®</sup>18, o BBD permitiu que as combinações destes parâmetros fossem aleatorizadas, resultando em configurações distintas, porém, não apresentando os três parâmetros em níveis máximos ou mínimos (Tab. 4).

Tabela 3 – Parâmetros de Corte

Variáveis de Controle	Níveis		
	Inferior (-1)	Central (0)	Superior (+1)
Velocidade de corte $v_c$ [m/min]	60	90	120
Avanço por dente $f_z$ [mm/dente]	0,08	0,1	0,12
Profundidade axial de corte $a_p$ [mm]	0,2	0,4	0,6

Por tratar-se de um material de difícil usinagem, os parâmetros adotados apresentaram-se mais conservadores aos recomendados pelo fabricante ( $v_c = 110 \sim 150$  m/min e  $f_z = 0,10 \sim 0,25$  mm/dente para insertos Classe P30). Além disso, a utilização de fluido de corte em abundância busca a redução da “agressividade” do processo em relação a ferramenta e máquina.

A medição de rugosidade do perfil, após a realização de todos os passes, deu-se através da avaliação da rugosidade média  $R_a$  utilizando o rugosímetro digital Mitutoyo SurfTest SJ-201P, com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$ . Para avaliar visualmente o desgaste apresentado pela ferramenta e a superfície usinada, utilizou-se o microscópio digital USB Dino-Lite Pro modelo AM 413ZT.

Para a avaliação da rugosidade, utilizou-se o valor médio de três medições, ambas distribuídas aleatoriamente na região transversal do perfil usinado. Os resultados obtidos foram processados no *software* dedicado SJ Tools a fim de analisar graficamente as características dos perfis de rugosidade.

A análise através do BBD permite avaliar os efeitos principais e as contribuições de cada parâmetro (variável de controle) para as variáveis de resposta (força resultante e rugosidade média) do processo

de fresamento. Desta forma, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) para determinar as principais contribuições.

#### 4. RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta os resultados de força resultante e rugosidade média (variáveis de resposta) em função das variáveis de controle ( $v_c$ ,  $f_z$  e  $a_p$ ). Os passes de nível central determinados via BBD, conhecidos como pontos médios, estão destacados na tabela. Estes são os únicos passes no método cujo os parâmetros de corte se repetem, permitindo avaliar tendências durante o processo.

Tabela 4 – Forças de Usinagem por Passe

Passe	Variáveis de Controle			Variáveis de Resposta	
	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm/dente]	$a_p$ [mm]	$F_R$ [N]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	60	0,10	0,20	71,0	0,347
2	90	0,12	0,60	177,9	0,680
3	90	0,10	0,40	125,8	0,087
4	60	0,08	0,40	136,4	0,497
5	120	0,10	0,20	137,2	0,150
6	60	0,10	0,60	173,6	0,507
7	120	0,10	0,60	196,1	0,483
8	90	0,10	0,40	162,0	0,113
9	90	0,08	0,20	96,6	0,150
10	90	0,12	0,20	137,5	0,120
11	90	0,08	0,60	224,8	0,290
12	120	0,12	0,40	195,6	0,127
13	60	0,12	0,40	173,1	0,370
14	90	0,10	0,40	207,6	0,123
15	120	0,08	0,40	223,4	0,103

##### 4.1. Força Resultante

Observa-se diretamente através da Tabela 4 que os menores valores de forças resultantes ( $F_R$ ) registrados se encontram nos passes onde há menor profundidade axial de corte ( $a_p$ ). Nesta análise direta, supõe-se que há influência significativa de  $a_p$  sobre as forças geradas no processo, conforme esperado através de análise da literatura. Outra análise apresenta o aumento no valor de  $F_R$  nos passes centrais destacados (passes 3, 8 e 14). Este aumento, não apenas do ponto central como dos valores das forças resultantes ao longo do experimento, é ilustrado no gráfico da Figura 5.

A tendência do aumento dos valores das forças  $F_R$  pode ser justificada através do desgaste precoce da ferramenta de corte observado durante a experimentação. A Figura 6 apresenta o desgaste do inserto após os passes 6, 12 e 15.

Nota-se a presença de desgaste de flanco de forma bastante visual. Apesar de não haver análise quantitativa do desgaste, o aumento do valor da força sobre os pontos médios de usinagem e a análise visual permitem supor que a usinagem do Hardox<sup>®</sup>450 conduz a acelerado desgaste da ferramenta.

#### 4.1.1. Análise de Variância da Força

Para os valores de  $F_R$ , a ANOVA apresentou  $R^2 = 72,4\%$ . Considerando um intervalo de confiança de 95%, cujo valor-p  $< 0,05$ , nota-se que  $a_p$  apresentou elevada significância bem como alta contribuição deste fator na análise (48,1%), conforme demonstra a Tabela 5.

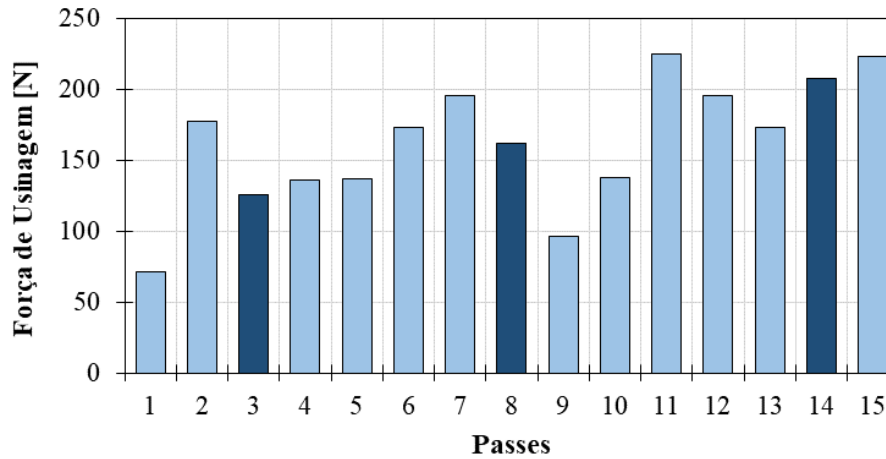
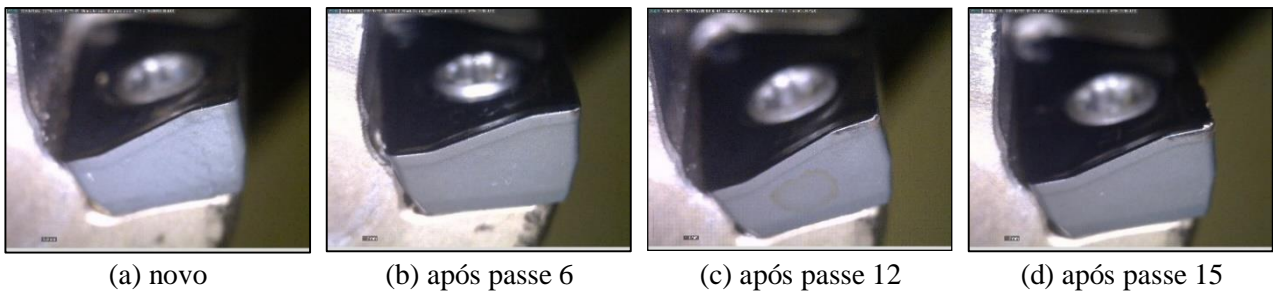


Figura 5 – Forças resultantes por passe.



(a) novo

(b) após passe 6

(c) após passe 12

(d) após passe 15

Figura 6 – Desgaste do inserto durante o experimento.

Tabela 5 – ANOVA reduzida dos efeitos principais sobre a força resultante.

Fator	GL	SQ	Contribuição	Valor-F	Valor-P
$v_c$	1	4909	17,3%	8,33	0,016
$a_p$	1	13627	48,1%	23,11	0,001
$a_p * a_p$	1	1971	7,0%	3,34	0,097
$f_z * a_p$	1	1926	6,8%	3,27	0,101
Erro	10	5895	20,8%	---	---
<b>Total</b>	14	28329	100%	---	---

A velocidade de corte também foi significativa, porém com menor contribuição sobre a variável resposta ( $F_R$ ), 17,3%. Já a contribuição do erro foi a segunda maior (20,8%) devido à soma dos fatores associados a ele visando tornar a análise dos efeitos principais mais significativas.

## 4.2. Rugosidade Média

A Figura 7 mostra os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) gerados ao longo do experimento. Na análise de  $R_a$ , nota-se que os pontos centrais apresentaram baixa rugosidade.

A Figura 8 exhibe o perfil de rugosidade (a) medido no passe 3 ( $v_c = 90$  m/min,  $f_z = 0,10$  mm/dente,  $a_p = 0,4$  mm) e sua respectiva imagem de superfície (b). Nota-se que o perfil é orientado, indicando a presença das marcas de avanço por dente bem definidas pela ferramenta de corte. O mesmo não se observa no passe 6 ( $v_c = 60$  m/min,  $f_z = 0,10$  mm/dente,  $a_p = 0,6$  mm), onde o perfil de rugosidade (c), bem como sua imagem de superfície (d), não apresentam ordenamento das marcas, indicando uma possível dificuldade no cisalhamento do cavaco, o que acarretou em um aumento da rugosidade.

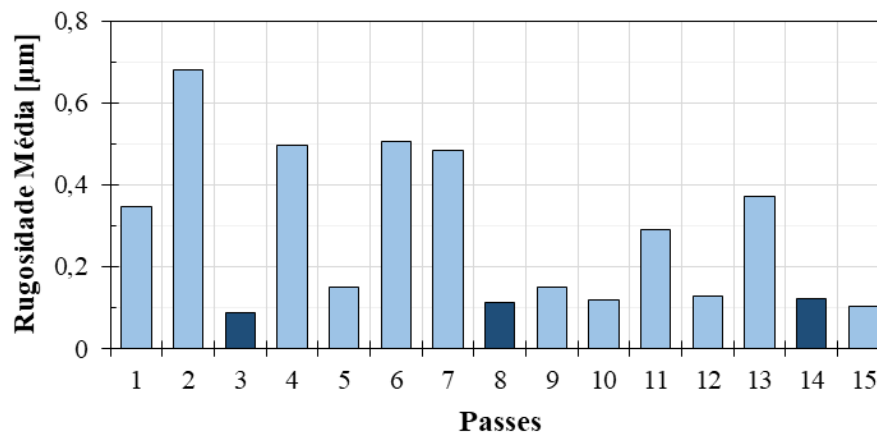


Figura 7 – Rugosidades por passe

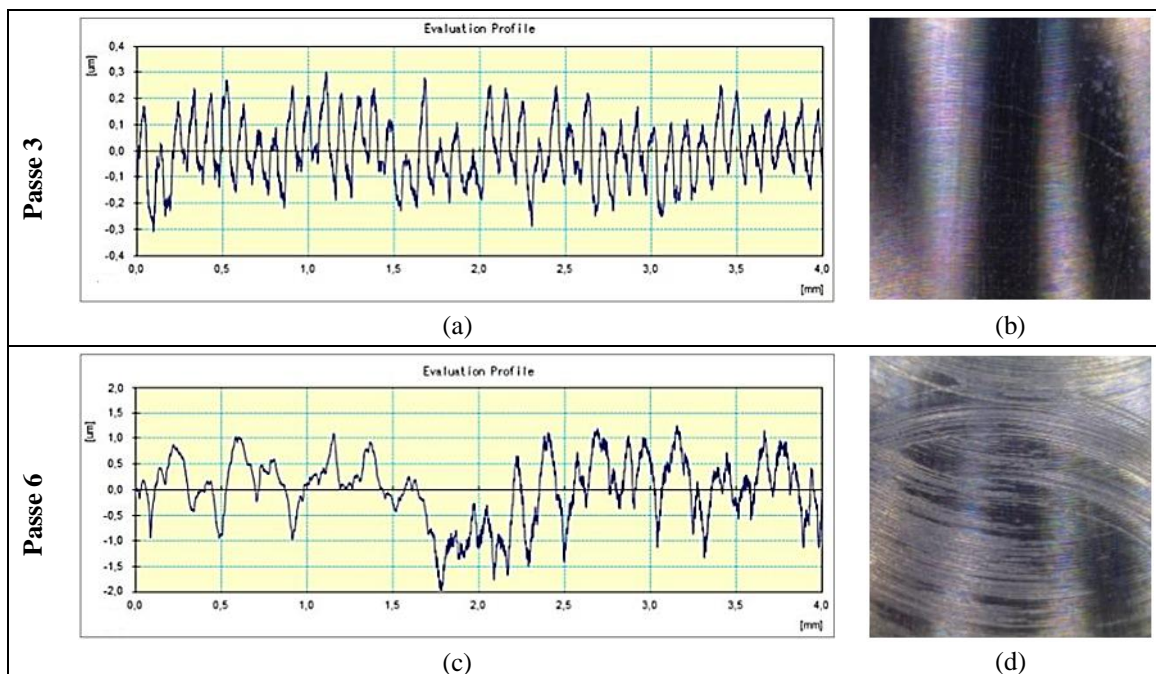


Figura 8 – Perfis de rugosidade e imagens da superfície usinada dos passes 3 e 6

### 4.2.1. Análise de Variância da Rugosidade

Na Tabela 6, apresentam-se as principais variáveis do processo, com análise de valor-p < 0,05 apresentando um intervalo de confiança de 95%. Nota-se que  $a_p$  também apresenta maior contribuição sobre  $R_a$ , seguida pela  $v_c$  e pelo efeito quadrático de  $a_p$ . Já o efeito quadrático de  $v_c$  e a combinação  $f_z * a_p$  são parcialmente significativos. O modelo também apresenta coeficiente de determinação  $R^2 = 83,3\%$ , representando a porcentagem de variação na resposta que é explorada pelo modelo.

### 4.3. Otimização dos Parâmetros

Realizada a análise de influência de cada fator sobre a força resultante ( $F_R$ ) e a rugosidade média ( $R_a$ ), o BBD permite que se combine tais fatores para determinar parâmetros ótimos de usinagem que aliem baixa força de usinagem e baixa rugosidade. Através da otimização multivariada, obtêm-se uma solução de parâmetros e predição de valores.

Tabela 6 – ANOVA reduzida dos efeitos principais sobre a rugosidade

Fator	GL	SQ Seq	Contribuição	Valor-F	Valor-P
$v_c$	1	0,091735	17,8%	9,59	0,013
$a_p$	1	0,178006	34,5%	18,61	0,002
$v_c * v_c$	1	0,037023	7,2%	4,70	0,058
$a_p * a_p$	1	0,078993	15,3%	8,26	0,018
$f_z * a_p$	1	0,044100	8,5%	4,61	0,060
<b>Erro</b>	9	0,086088	16,7%	---	---
<b>Total</b>	14	0,515944	100%	---	---

A Figura 9 apresenta as curvas características de cada variável para  $F_R$  e  $R_a$ , indicando também o comportamento da sobreposição de ambas, os parâmetros de entrada otimizados são indicados através das linhas verticais vermelhas e a predição dos valores de resposta são apresentados através da linha horizontal tracejada azul.

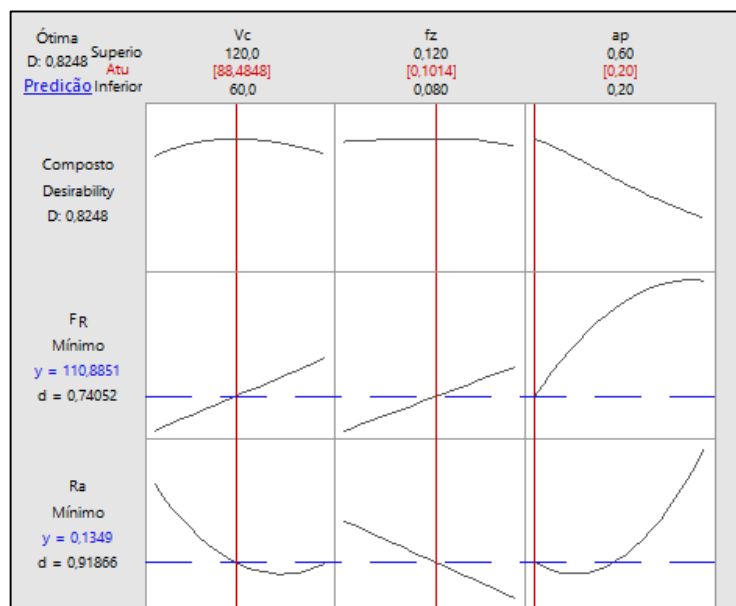


Figura 9 – Curvas características das variáveis de controle

Nota-se que  $v_c$  e  $f_z$  comportam-se de formas diferentes para  $F_R$  e  $R_a$ , sendo apenas  $a_p$  de comportamento similar nas duas análises. Também se observa que  $a_p$  é o único parâmetro cujo valor escolhido para a otimização do processo é o menor possível, enquanto a escolha dos valores de  $v_c$  e  $f_z$  aproximaram-se dos valores médios do experimento.

Assim, os valores dos parâmetros de entrada que geram a melhor combinação das variáveis de resposta são:  $v_c = 88,5$  m/min,  $f_z = 0,1$  mm/dente e  $a_p = 0,2$  mm. Isto propicia a estimação dos valores de tais variáveis em  $F_R = 111$  N e  $R_a = 0,135$   $\mu$ m.

## 5. CONCLUSÕES

A análise e o projeto de experimentos via Box-Behnken Design possibilitou investigar a influência dos parâmetros de corte no acabamento da superfície usinada e na força de usinagem resultantes do processo de fresamento frontal em aço Hardox<sup>®</sup>450.

Em relação à força resultante ( $F_R$ ), o menor valor encontrado (71 N) foi no passe 1 ( $v_c = 60$  m/min,  $f_z = 0,10$  mm/dente e  $a_p = 0,20$  mm). Este comportamento se justifica pela influência da profundidade axial de corte ( $a_p$ ) e da velocidade de corte ( $v_c$ ), nos valores de  $F_R$  averiguadas na ANOVA reduzida. Outra constatação é a ausência do desgaste da ferramenta no primeiro passe visto que o inserto estava novo.

O desgaste prematuro da ferramenta de corte ocorreu devido à elevada dureza e ao encruamento do material. Desta forma, a força resultante tende a aumentar ao longo do processo. Isto foi observado no crescimento constante de  $F_R$  nos passes 3 (126 N), 8 (162 N) e 14 (208 N), que correspondem às réplicas nos pontos centrais ( $v_c = 90$  m/min,  $f_z = 0,10$  mm/dente e  $a_p = 0,40$  mm).

Na análise da rugosidade média ( $R_a$ ), a presença do desgaste da ferramenta não teve significativa influência nos valores de  $R_a$  principalmente devido aos baixos níveis alcançados na experimentação. No entanto, o menor valor encontrado foi após o passe 3 (0,087  $\mu$ m), e o mesmo foi incrementado após os passes 8 (0,113  $\mu$ m) e 14 (0,123  $\mu$ m), indicando uma possível interferência dos desgastes. A ANOVA reduzida mostrou que  $a_p$  e  $v_c$  também apresentam influência significativa sobre  $R_a$ .

A predição dos parâmetros ótimos através da otimização multivariada, combinando as análises de  $F_R$  e  $R_a$  sugere a utilização de valores médios para  $v_c$  e  $f_z$  devido ao seu comportamento distinto para cada uma dessas resultantes. Entretanto, em ambos os casos,  $a_p$ , cuja contribuição mostrou-se mais significativa para as duas análises, apresenta-se como uma variável a ser minimizada quando busca-se obter menores valores de  $F_R$  e  $R_a$ . Assim, a combinação  $v_c = 88$  m/min,  $f_z = 0,10$  mm/dente e  $a_p = 0,20$  mm pode resultar em um processo com valores de  $F_R$  (111 N) e  $R_a$  (0,135  $\mu$ m).

A validação do modelo pode ser aferida através da utilização dos parâmetros sugeridos e gerando dados práticos que são comparados com os preditos. Porém recomenda-se um estudo mais detalhado sobre a influência do desgaste da ferramenta no processo, visto que a mesma pode indicar a presença de vibrações ou, mesmo um detalhamento maior sobre o comportamento do Hardox<sup>®</sup>450 quanto ao corte (formação de cavaco) e a presença de seus elementos de liga no fresamento frontal.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. André João de Souza, pelo auxílio e tutoria ao longo do trabalho. Ao coorientador M. Eng. Matheus dos Santos Polly pelos ensinamentos e auxílios. Ao amigo e técnico do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) da UFRGS Guilherme Vargas Schirmer, por todo conhecimento e auxílio na execução dos experimentos. Ao mestrando Nicholas Hoffmann pela ajuda no esclarecimento de dúvidas. Às empresas Walter Tools (ferramenta), SSAB (material) e Bondmann Química (fluido de corte) pelas doações e contribuições à esta pesquisa.

## REFERENCIAS

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.
- Chiaverini, V., “**Aços e Ferros Fundidos**”, 7. Ed.: ABM, 1996.
- Duran, M. N. “**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 em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 8.ed., São Paulo: Artliber, 2013.
- Montgomery, D.C., “**Applied statistics and probability for engineers**”. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007
- Minitab, “**StatGuide**”, 2018.
- Santos, S. C., Sales, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. Artliber, São Paulo, 2007.
- 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.
- Souza, A. J., “**Apostila ENG03343 – Processos de Fabricação por Usinagem**”, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- SSAB, 2014a, **Hardox®450 Data Sheet**, 2 f. Disponível em: <[www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-450](http://www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-450)>. Acesso em 12/09/2019.
- SSAB, 2014b, **Machining recommendations for Strenx and Hardox®**, 32 f. Disponível em: <<https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/strenx/brochures/machining-strenx-and-hardox.pdf?m=20160420085241>>. Acesso em 12/09/2019.
- SSAB, 2014c, **Machining Weldox and Hardox®: Drilling, countersinking, tapping, turning and milling**, 8 f. Disponível em: <[www.aemach.com/hardox/pdf/010\\_SSAB\\_plate\\_machining\\_UK.pdf](http://www.aemach.com/hardox/pdf/010_SSAB_plate_machining_UK.pdf)>. Acesso em 15/09/2019.
- Tavares, J. M. R. S., “**Indicação dos estados de superfície**”. CFAC – Conceção 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/>>.
- Walter, “**Product handbook – Milling**”, USA, 2010.