

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA - IFSC

CAMPUS JOINVILLE
ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO MAIA ARNAUD

**APLICAÇÃO DO CONCEITO DE USINAGEM DE ALTA PERFORMANCE (HPC)
PARA DESBASTE DE PEÇAS EM ABS UTILIZANDO ABORDAGEM SEIS SIGMA**

Joinville

2022

GUSTAVO MAIA ARNAUD

APLICAÇÃO DO CONCEITO DE USINAGEM DE ALTA PERFORMANCE (HPC)
PARA DESBASTE DE PEÇAS EM ABS UTILIZANDO ABORDAGEM SEIS SIGMA

Monografia apresentada ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Campus Joinville do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Ivandro Bonetti

Coorientador: Prof. Dr. Anael Preman
Krelling

Joinville

2022

Arnaud, Gustavo Maia.

Aplicação do conceito de Usinagem de Alta Performance (HPC) para desbaste de peças em ABS utilizando abordagem seis sigma / Arnaud, Gustavo Maia – Joinville, 2022.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, Joinville, 2022.

Orientador: Ivandro Bonetti.

Coorientador: Anael Preman Krelling.

1. HPC. 2. Desbaste. 3. Seis Sigma. II. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. II. Título.

APLICAÇÃO DO CONCEITO HPC PARA DESBASTE DE PEÇAS EM ABS
UTILIZANDO ABORDAGEM SEIS SIGMA

GUSTAVO MAIA ARNAUD

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 11 de Julho de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Ivandro Bonetti, Dr
Orientador

Prof. Anael Preman Krelling, Dr
Coorientador

Prof. Jefferson Luiz Jerônimo, Me.
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida.

À minha esposa Dafne Fix Arnaud e meu filho Otto Arnaud, que além de acompanharem de perto, foram parte fundamental e grandes incentivadores desta trajetória.

Aos meus pais, Geferson de Jesus Arnaud e Janaina Maia Arnaud pela incansável dedicação na minha construção educacional.

Aos meus irmãos Felipe e Letícia, por toda a parceria, suporte e trocas de experiências.

A todos os amigos e parentes, que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta etapa.

A todo o corpo docente do Instituto Federal de Santa Catarina, por todo o aprendizado transmitido durante os anos de estudo.

Aos master black belts e black belts que dedicaram seu tempo para transmitir conhecimento, sobre seis sigma e Minitab®, durante os treinamentos e durante o desenvolvimento dos projetos de melhoria.

RESUMO

Frequentemente é notada a alta solicitação de serviços de prototipagem de peças poliméricas por meio do processo de usinagem, tornando esta atividade gargalo, o que força a tomada de medidas como terceirização de serviços, ou mesmo a negociação por um prazo de entrega de peças mais prolongado. Ainda que necessário, espera-se que a conclusão da etapa de desbaste seja sucinta. Contudo, é evidente a ineficiência das indústrias na utilização de recursos que aceleram este processo, delongando o tempo de finalização da peça e consequentemente aumentando o custo agregado. O emprego de metodologias como seis sigma, vem contribuindo para que diferentes campos da indústria se beneficiem das resoluções obtidas através de ferramentas estatísticas. Com a finalidade de otimizar o tempo despendido na confecção de peças em Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), este trabalho apresenta um estudo de caso, onde é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de Corte de Alta Performance (HPC) e metodologia seis sigma, um estudo sobre as variáveis independentes que influenciam as respostas de tempo de desbaste e usinabilidade de uma peça e uma análise estatística da qualidade dos dados obtidos em experimentação. A partir da utilização de um otimizador de respostas com o *software* Minitab®, foi possível averiguar uma combinação de parâmetros os quais, a partir dos modelos analisados por delineamento de experimentos (DOE), é possível minimizar o tempo de desbaste e maximizar a usinabilidade das peças.

Palavras-chave: HPC; Desbaste; Seis Sigma.

ABSTRACT

The high demand for polymeric prototyping services by the process of milling have been noticed very frequently, which results, most of the time, in bottlenecks. These bottlenecks force the companies to take actions such as outsourcing or even being obligated to negotiate longer deadlines. Even though being a necessary step, the duration of the roughing process is expected to be as small as possible. Nonetheless it is evident the inefficiency of the industries in managing resources to speed up the roughing time, prolonging the conclusion of the process and consequently increasing the added cost. The use of methodologies such as six sigma, has contributed for different fields of the industry to take advantages from the resolutions obtained through statistical tools. In order to optimize the time spent in roughing out ABS parts, this work presents a case study, where a bibliographic review is presented on the concepts of HPC and six sigma methodology, a study on the independent variables that influence the part roughing time and machinability responses and a statistical analysis of the quality of data obtained by experimentation. Using a response optimizer with Minitab® software, it was possible to determine a combination of parameters which, from the models analyzed by DOE, minimize the roughing time and maximize the machinability of the parts.

Keywords: HPC; Roughing ; Six Sigma.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distinção entre alta performance de corte (HPC) e alta velocidade de corte (HSM)	14
Figura 2 - Materiais versus horas de desbaste 2021	15
Figura 3 - Parâmetros de corte (ae, ap)	18
Figura 4 - CIRP principais atividades sobre HSM/HPC	19
Figura 5 - Comparação entre quatro sigmas e seis sigma	21
Figura 6 - Interação entre fatores	23
Figura 7 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados	25
Figura 8 - Gráfico dos efeitos principais	26
Figura 9 - Exemplo de FRD	28
Figura 10 - FRD de DOE com réplica	30
Figura 11: Diagrama esquemático do experimento	35
Figura 12 - Pareto dos materiais mais usinados	36
Figura 13 - Método de fixação da matéria prima	37
Figura 14 - Ferramenta utilizada nos experimentos	39
Figura 15 - Geometria da peça escolhida	40
Figura 16 - Diferentes tipos de percurso no software Creo Parametric	41
Figura 17 - Cronômetro da máquina	43
Figura 18 - FRD do experimento	45
Figura 19 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para Q teórico	49
Figura 20 - Gráfico dos dados Q experimental versus Q teórico ordenados de forma crescente	53
Figura 21 - Fotos das amostras	55
Figura 22 - Plotagem dos dados puros do tempo	56
Figura 23 - Plotagem dos dados ranqueados do tempo	57
Figura 24 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados e de probabilidade normal para rank do Q	59
Figura 25 - Gráfico dos efeitos principais para o Q	60
Figura 26 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o ruído	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de experimentação	24
Tabela 2 - Atributos de classificação de ruído	44
Tabela 3 - Matriz de planejamento	46
Tabela 4 - Valores dos níveis dos fatores	47
Tabela 5 - Matriz de planejamento com os níveis	48
Tabela 6 - Dados do experimento para Q	52
Tabela 7 - Dados do experimento para ruído	54
Tabela 8 - ANOVA da variável resposta Q	58
Tabela 9 - Valores de R ² e R _{ajustado} ² para o modelo do Q	60
Tabela 10 - ANOVA da variável resposta Q	61
Tabela 11 - Valores de R ² e R _{ajustado} ² para o modelo do ruído	64
Tabela 12 - Avaliação de concordância dentro de avaliador	65
Tabela 13 - Kappa dentro de cada avaliador	66
Tabela 14 - Kappa entre avaliadores	67
Tabela 15 - Configuração de parâmetros depois de otimizado	68
Tabela 16 - Ranqueamento dos Q experimental	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 PROBLEMA	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 PROCESSO DE USINAGEM DE DESBASTE	16
2.2 PARÂMETROS DE CORTE	16
2.3 CORTE DE ALTA PERFORMANCE (HPC)	18
2.4 CONCEITO DE SEIS SIGMA	20
2.5 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS	22
2.5.1 DOE fatorial completo de 2^3	23
2.5.2 Análise gráfica do DOE	25
2.6 DADOS DISCRETOS E DADOS CONTÍNUOS	27
2.7 DIAGRAMA DE RELAÇÃO DE FATORES	28
2.7.1 Definição de ruído	29
2.7.2 Réplica	29
2.7.3 Aleatorização	30
2.8 TRANSFORMAÇÃO DA VARIÁVEL RESPOSTA ATRAVÉS DO RANK	31
2.9 MODELO DE REGRESSÃO	32
2.9.1 Coeficiente de determinação r^2	32
2.9.2 Coeficiente de correlação ajustado $r_{ajustado}^2$	33
2.10 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	34
2.11 OTIMIZADOR DE RESPOSTA	34
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.2 VARIÁVEIS DE PROCESSO	40

3.2.1 Método de medição da variável taxa de remoção de material (Q)	42
3.2.2 Método de medição da variável ruído gerado pelo desbaste	43
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	44
3.4 ANÁLISE DE CONCORDÂNCIA DE ATRIBUTOS	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 COLETA DE DADOS NA EXPERIMENTAÇÃO	51
4.2 ANÁLISE DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS	55
4.2.1 Avaliação dos resultados para taxa de remoção de material	56
4.2.1 Avaliação dos resultados para o ruído gerado pela usinagem	61
4.3 Análise de concordância dos avaliadores	65
4.4 OTIMIZAÇÃO DAS RESPOSTAS OBTIDAS	67
5 CONCLUSÕES	70
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Os principais desafios da usinagem hoje estão no desenvolvimento e aplicação de estratégias inovadoras que visam, em primeiro lugar, reduzir o tempo de ciclo e os custos para melhor produtividade e maior lucratividade, mas também para melhorar o desempenho e, principalmente, reduzir a quantidade de energia e recursos utilizados (MARCONDES E SANTOS, 2003).

Este trabalho é direcionado à melhoria do processo de desbaste de peças feitas de material Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Nas palavras de Machado et al. (2015) no desbaste, a principal preocupação é garantir elevada taxa de remoção de material, sendo, portanto, limitado pela potência da máquina-ferramenta.

Atualmente os programadores do laboratório de protótipos de uma multinacional da linha branca, utilizam a estratégia convencional de desbaste com uma ferramenta de Ø16mm e altura entre 100 à 160mm de altura durante o processo de fresamento em centros de usinagem CNC. A estratégia de desbaste convencional é baseada em um grande aporte de penetração de trabalho (a_e) e um pequeno aporte de profundidade de corte (a_p). A proposta do Corte de Alta Performance (HPC) é a redução dos tempos de usinagem, aplicando velocidades de corte e/ou taxas de avanço aumentadas, levando em consideração o desgaste da ferramenta e a qualidade da superfície da peça gerada. Logo, deseja-se entender a parametrização ideal que garanta o menor tempo de desbaste. Utilizando para isto ferramentas da metodologia seis sigma como delineamento de experimentos (DOE), diagrama de relação de fatores (FRD), análise de atributos, gráfico de probabilidade normal e gráfico de pareto.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar uma configuração de parâmetros do processo de usinagem em peças de ABS que resultem no menor tempo de desbaste considerando as variáveis independentes críticas do processo e comparar a combinação dos parâmetros obtidos através de métodos seis sigma, com o modelo convencional utilizado no laboratório.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

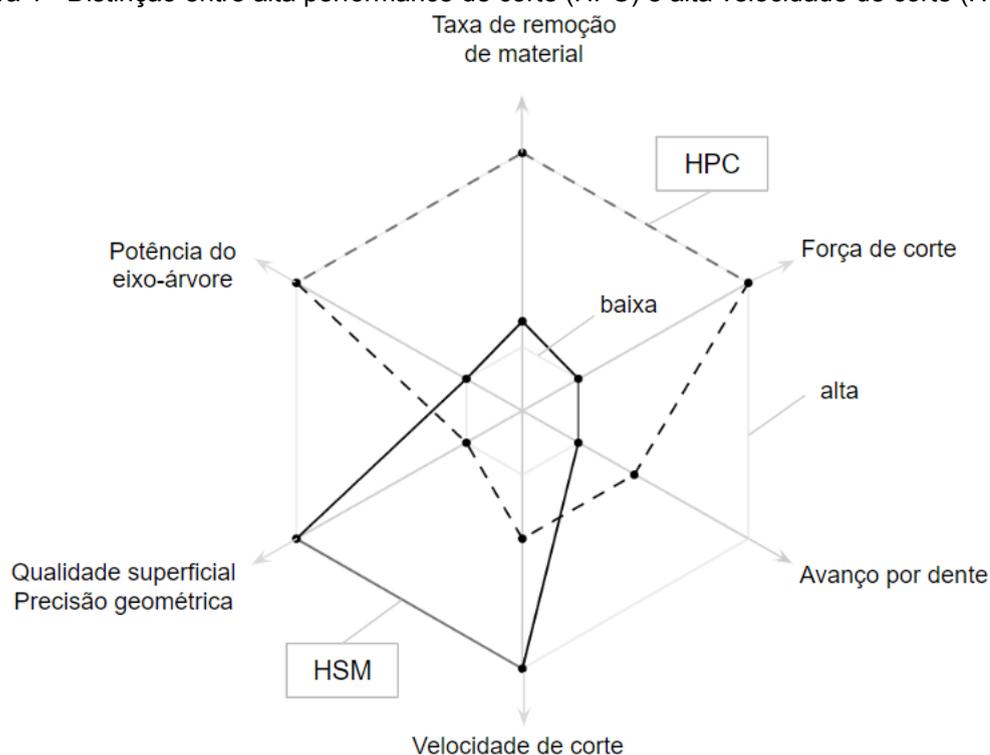
- Elaborar uma aplicação de DOE fatorial completo com dois níveis e três fatores, utilizando réplicas.
- Padronizar uma configuração de parâmetros que obtenha maior taxa de remoção de material, para processo de desbaste, amparado pelo método HPC (corte de alta performance), limitando-se a operações de fresamento.
- Manter os níveis de ruído gerado pelo fresamento de desbaste com pontuação maior que 0,7 tendo como base a avaliação sonora dos técnicos de usinagem do laboratório.

1.3 JUSTIFICATIVA

Estudos em usinagem dos metais utilizando altas velocidades de corte deram início no começo do século XX com Carl J. Salomon na Alemanha, utilizando para isso serras com grandes diâmetros. Após a segunda guerra mundial os estudos sobre usinagem com altas velocidades (HSM) retomaram principalmente nos Estados Unidos, desde então vem sendo assunto muito discutido e pesquisado mundialmente (FLOM E KOMANDURI, 1989).

O conceito HPC, é um método inovador e relativamente recente, sendo estudado desde meados dos anos 2000. Para Tonshoff HK (2011), tem como principal objetivo promover uma usinagem com altas taxas de remoção de material, se mostrando, acima de tudo, indicado para operações de desbastes. Essa característica é claramente observada na Figura 1.

Figura 1 - Distinção entre alta performance de corte (HPC) e alta velocidade de corte (HSM)



Fonte: Adaptado de Tonshoff et al. (2001)

A usinagem de metais de fabricação mecânica, é constantemente tema de trabalhos e pesquisas que visam otimização do processo de manufatura. Porém, o mesmo interesse não é tão frequentemente observado na usinagem de materiais poliméricos, o que não diminui a importância da redução de custos na manufatura destes.

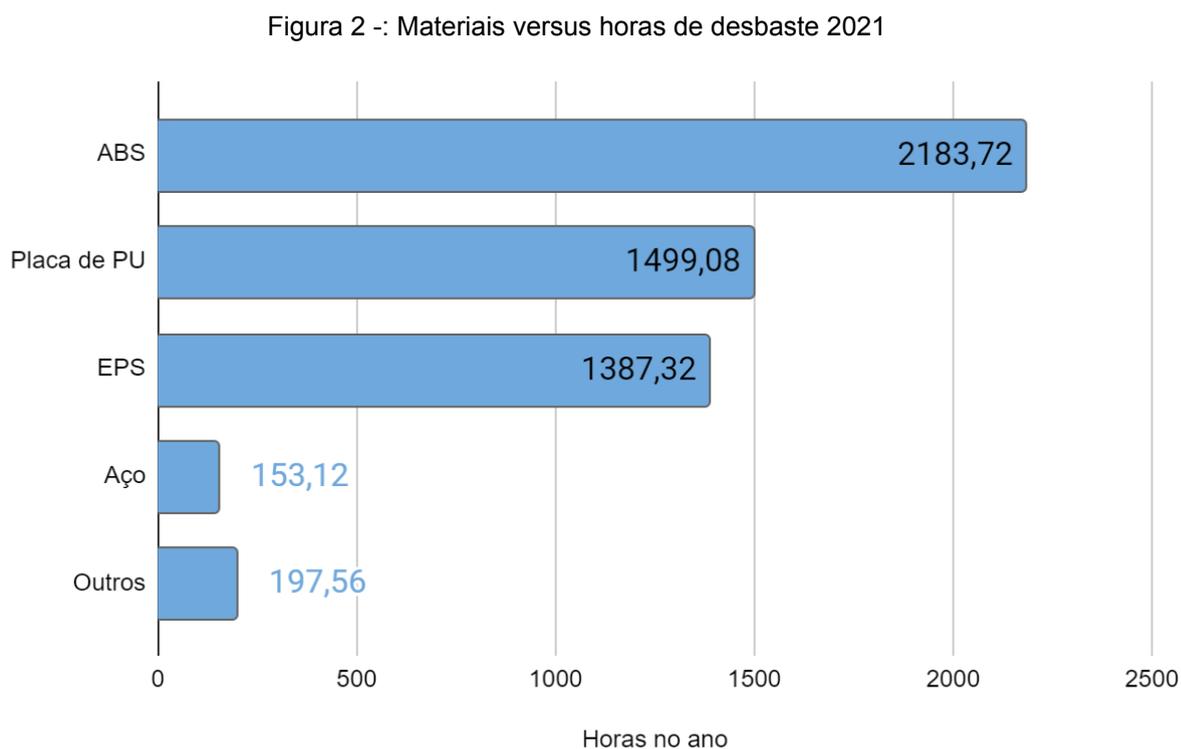
1.4 PROBLEMA

O afunilamento de demandas no processo de usinagem dentro do laboratório hoje é o principal empecilho, ocasionando alta dificuldade de entregar as demandas solicitadas no prazo solicitado. Se faz necessário a terceirização de serviço, o que eleva o custo de confecção e ainda aumenta o prazo de entrega das peças solicitadas.

Os centros de usinagem operam em regime de três turnos e o indicador de disponibilidade global das máquinas hoje é de 81%, o que representa que 81% do tempo útil disponível as máquinas estão rodando, sendo que dentro dos outros 19%

estão as paradas de máquina, tais como: *setup*, manutenção e profissional alocado em outra atividade.

A Figura 2 traz um gráfico dos principais materiais usinados no laboratório de protótipos no ano de 2021 representados pela quantidade de horas despendidas no processo de desbaste.



Fonte: Próprio autor

Entende-se que cada material difere-se em vários aspectos um dos outros e possivelmente terão tratativas diferentes para reduzir a quantidade de horas de desbaste. Visto isso, o material que despende a maior parcela de tempo de ocupação da máquina, terá o maior retorno de eficiência e logo, do ponto de vista corporativo, sendo o mais indicado para resolução do estudo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura que se segue tem como objetivo apresentar um apanhado dos conceitos de usinagem com altas velocidades (HSM) e corte de alta performance (HPC) e entender como esses conceitos se conectam com o processo de fresamento de desbaste e os parâmetros envolvidos. E ainda, trazer à discussão conceitos e definições de ferramentas, gráficos e métodos que serão utilizados nos experimentos subsequentes e análises.

2.1 PROCESSO DE USINAGEM DE DESBASTE

Pode-se entender como usinagem, toda atividade que com auxílio de uma ferramenta de corte e uma máquina ferramenta, realiza o processo de remoção de material de um bloco bruto. Dentro deste processo, é possível classificar as etapas em dois macro processos, desbaste e o acabamento (VALIM, 2018).

Machado et al. (2015) afirma que dentro do processo de desbaste o principal objetivo é obter uma alta taxa de remoção de material, deixando uma camada de material sobressalente chamado de sobremetal, que na sequência será retirado no processo de acabamento.

2.2 PARÂMETROS DE CORTE

Durante o processo de usinagem, alguns parâmetros, como velocidade de corte, diâmetro da ferramenta, quantidade de arestas cortantes, avanço por aresta, incremento, sentido de corte, tipo de corte e demais outros, precisam ser definidos a fim de promover a retirada de material e todos os movimentos envolvidos na usinagem de fresamento.

Nas palavras de Valim (2018) a velocidade de corte é dada pela velocidade linear relativa entre a aresta de corte da ferramenta e a rotação da mesma.

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2000) pode-se definir a velocidade de corte como sendo a velocidade tangencial instantânea que resulta da rotação da ferramenta em torno da peça. A equação 1 apresenta a fórmula da V_c .

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c = Velocidade de corte [m/min]

d = Diâmetro da ferramenta [mm]

n = Rotação da ferramenta [rpm]

Diniz, Marcondes e Coppini (2000) citam ainda a velocidade de avanço, e explica que é o resultado do avanço multiplicado pela rotação da ferramenta, mostrado na equação 2.

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

Onde:

f = Avanço [mm/volta]

V_f = Velocidade de avanço [mm/min]

De acordo com König e Klocke (1997) nos casos onde a ferramenta possuir duas ou mais arestas cortantes, é utilizado o parâmetro de avanço por aresta (f_z) juntamente com a quantidade (z) de arestas cortantes, o que relaciona o desenvolvimento da usinagem em duas superfícies simultâneas.

$$f = f_z \cdot z \quad (3)$$

Onde:

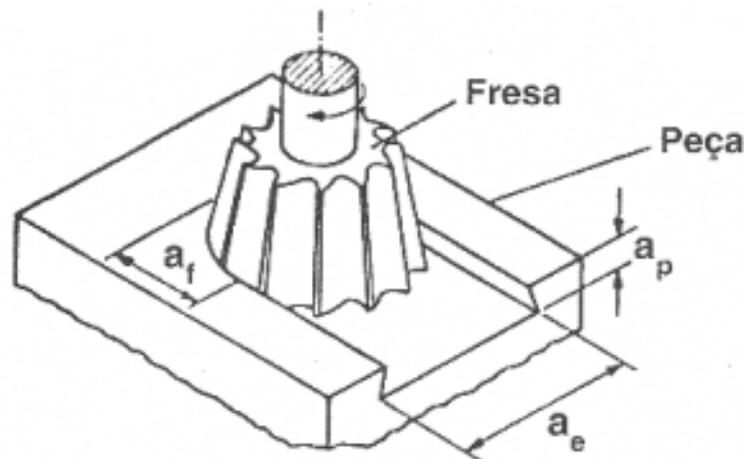
z = Quantidade de arestas cortantes da ferramenta

f_z = Avanço por aresta [mm/aresta]

Outros dois parâmetros envolvidos no processo de usinagem são os incrementos de corte, que representam os valores de penetração da ferramenta no material. A profundidade de corte (a_p) é o parâmetro medido perpendicularmente ao plano de trabalho. Já o parâmetro de penetração de trabalho (a_e) é a distância que a ferramenta penetra na peça medido a partir do plano de trabalho e perpendicular ao à direção do avanço da ferramenta (DINIZ et al., 2006). A Figura 3 ilustra os parâmetros mencionados acima. Estes incrementos tem uma influência direta na potência de corte gerada pela usinagem e quando multiplicados juntamente com a velocidade de avanço (V_f), determina-se a taxa de remoção de material (Q) a qual está apresentada na equação 4 (DINIZ et al. 2006).

$$Q = V_f \cdot a_p \cdot a_e \quad (4)$$

Figura 3 - Parâmetros de corte (a_e, a_p)

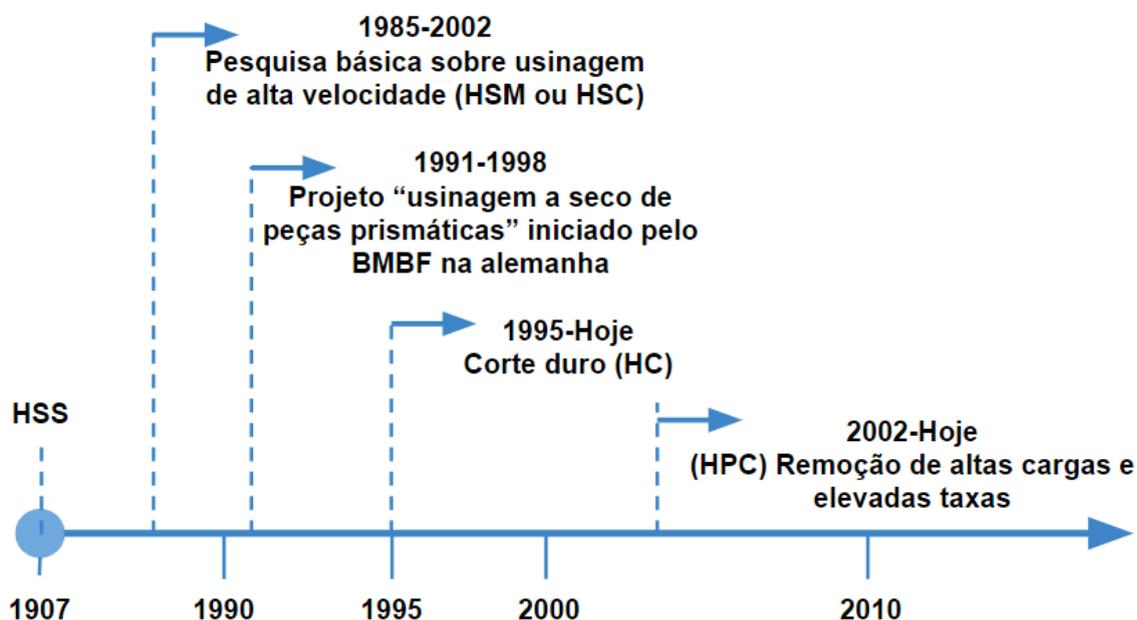


Fonte: Diniz et al. (2006)

2.3 CORTE DE ALTA PERFORMANCE (HPC)

Estudos sobre os conceitos de Usinagem de Alta Velocidade (HSM) vêm sendo experienciados desde meados dos anos 1920 por Carl J. Salomon na Alemanha (SCHUTZER, 2001). Porém, apenas nos últimos vinte anos, o conceito de HPC começou a ser discutido e estudado (CIRP, 2014), conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - CIRP principais atividades sobre HSM/HPC



Fonte: Adaptado de CIRP (2014)

O que irá determinar se faz sentido utilizar os conceitos de HSM ou HPC, é uma combinação de fatores como custo envolvido, taxa de produção, eficiência energética e de recursos, e lucratividade (NEUGEBAUER et al. 2011). Os valores ótimos de parâmetros de corte como profundidade de corte (a_p) e (a_e), velocidade de corte e outros, irão definir a maior taxa de produtividade (CIRP, 2014).

Para Toenshoff et al. (2001) HPC utiliza de menores valores de velocidade de corte relacionados a altas taxas de avanço, desta forma, sendo mais indicado para usinagens no processo de desbaste. Por outro lado, HSM aplica velocidades de corte muito mais elevadas e taxas de avanço mais baixas, objetivando operações de acabamento.

O objetivo do corte de alto desempenho HPC é a redução do tempo de usinagem através da aplicação de maiores taxas de avanço com a devida consideração do desgaste da ferramenta e da qualidade da superfície da peça usinada (UHLMANN, 2010). Porém, o emprego de condições que resultem em altas velocidades de corte, são, muitas vezes, limitadas pela capacidade tecnológica das máquinas (CIRP, 2014).

A utilização de usinagem de alta performance consiste em promover a alta remoção de material e minimizar ao máximo o tempo de desgaste das peças

(BUREK et al. 2018). Segundo Fink (2011), polímeros termoplásticos possuem um coeficiente de condutividade térmica baixa. Significa dizer que, o calor gerado na face contato de um polímero demora mais tempo para se dissipar quando comparado a uma material com coeficiente maior, como aço ou alumínio.

Alguns polímeros apresentam um comportamento de derretimento de cavaco e este por sua vez agarra à face da ferramenta de corte (DING et al. 2018). Estudos aplicados com Usinagem de Alta Performance (HPC) em poliamida foram conduzidos e segundo Uysal et al. (2020), não foi possível realizar experimentos com velocidade de corte acima de 500m/min devido a alta temperatura gerada na face de contato. Entretanto, diferentemente de aplicações de Usinagem de Altas Velocidades (HSM) onde é sugerido a diminuição da profundidade de corte (a_p) e penetração de corte (a_e) (BAUCO, 2003). Quando aplicado o conceito de Usinagem de Alta Performance (HPC) especialmente em materiais com baixa dureza é possível atingir maiores taxas de remoção de cavaco empregando maiores aportes radiais e axiais (DENKENA et al. 2018).

2.4 CONCEITO DE SEIS SIGMA

Perante a execução e acompanhamento de projetos de melhoria e/ou diminuição de variações em um processo, diversas podem ser as abordagem e as metodologias a fim de identificar oportunidades de melhorias. O que determina a abordagem a ser escolhida, muitas vezes, advém da necessidade de se ter um maior entendimento das variáveis inerentes ao processo, as quais irão influenciar os resultados. O seis sigma oferece uma abordagem prescritiva e sistemática para a melhoria da qualidade e coloca muita ênfase na responsabilidade e nos resultados finais. Muitas empresas em todo o mundo usam o gerenciamento Seis Sigma para melhorar a eficiência, cortar custos, eliminar defeitos e reduzir a variação do produto. Um dos aspectos que distinguem o Seis Sigma de outras abordagens é um foco claro na obtenção de resultados finais em um período relativamente curto de três a seis meses (LEVINE, 2006).

Seis Sigma baseia-se em técnicas de qualidade comprovadas para sua implementação. Sendo, Sigma (σ) uma letra usada por estatísticos para medir a variabilidade em qualquer processo. Em vista disso, o Sigma é então utilizado pelas

empresas como medida de variação em seus processos. Assim sendo, era comum observar companhias aderindo sigmas três ou quatro como padrão aceitável, ainda que isto represente entre 6.200 e 67.000 erros por milhão (PYZDEK E KELLER, 2010). A convenção de 3,4 erros por milhão é um movimento reativo ao constante aumento de expectativa dos clientes e o incremento da complexidade dos processos (ROTONDARO, 2002).

Segundo Werkema (2012) o principal objetivo do seis sigma é a obtenção do patamar de zero defeitos, ou seja, 3,4 defeitos para cada milhão de operações realizadas. A Figura 5 mostra a comparação entre o padrão convencional comumente encontrado nas empresas de quatro sigmas e Seis sigma.

Quando comparado às porcentagens 99,38% e 99,99966% a diferença pode parecer muito pequena, porém, quando esta diferença é observada na prática o número se torna bem mais significativo. Neste contexto, os exemplos trazidos por Werkema (2012) na Figura 5, evidenciam o quanto de erros de processos as empresas estarão evitando, operando em nível seis sigma.

Figura 5 - Comparação entre quatro sigmas e seis sigma

Quatro Sigma (99,38% conforme)	Seis Sigma (99,99966% conforme)
Sete horas de falta de energia elétrica por mês	Uma hora de falta de energia elétrica a cada 34 anos
5.000 operações cirúrgicas incorretas por semana	1,7 operação cirúrgica incorreta por semana
3.000 cartas extraviadas para cada 300.000 cartas postadas	Uma carta extraviada para cada 300.000 cartas postadas
Quinze minutos de fornecimento de água não potável por dia	Um minuto de fornecimento de água não potável a cada sete meses

Fonte: Werkema, 2012.

Wernke (2011) explica que a metodologia seis sigma deu-se início por volta dos anos 80 na Motorola com o intuito de melhorar a qualidade de seus produtos frente aos concorrentes que, na época, eram superiores. Depois da implementação da metodologia, a Motorola recebeu o Prêmio Nacional da Qualidade Malcolm Baldrige. Com isso, o uso da metodologia tornou-se público e diversas empresas

associaram o sucesso da Motorola com seis sigma, passando a utilizar e implementar a metodologia com sucesso (MATSUNAGA, 2016).

2.5 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Segundo Moen (1999), o Delineamento de experimentos (DOE) é uma técnica bem estruturada que visa estudar qualquer situação na qual envolvem variáveis independentes, que influenciam em uma determinada variável resposta. Sendo uma ferramenta desenvolvida para resolver problemas complexos onde mais de uma variável independente podem afetar a variável resposta e duas ou mais variáveis podem interagir entre elas. Para Czitrom (1999) a experimentação planejada se mostra muito mais eficiente do que métodos mais tradicionais tais como um fator por vez (OFAT) o qual busca investigar apenas os efeitos de um fator isolado a cada rodada.

Os dados coletados de um experimento planejado podem ser analisados estatisticamente para determinar o efeito das variáveis independentes ou combinações de mais de uma variável independente. Um plano experimental também deve incluir disposições para lidar com variáveis estranhas, ou seja, variáveis não identificadas explicitamente como variáveis independentes (PYZDEK; KELLER, 2010).

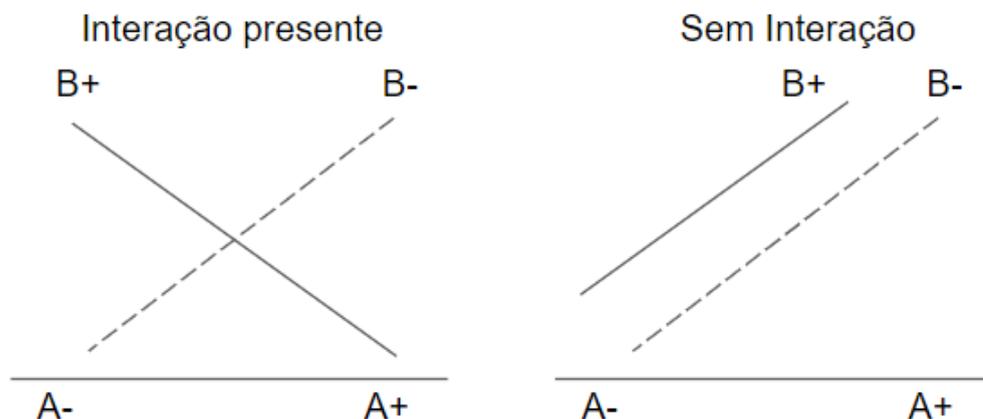
Durante um experimento é necessário realizar o levantamento das variáveis que estão envolvidas no processo no qual o objeto de estudo está presente. No intuito de realizar esta atividade com maior clareza, se faz necessário o completo conhecimento dos tipos de variáveis que podem existir, segundo Pyzdek e Keller (2010), tais variáveis podem ser listadas como:

- Variável de resposta: A variável que está sendo investigada, também chamada de variável resposta
- Variáveis Independentes: As variáveis controláveis que se acredita terem maior probabilidade de ter um efeito. Estes podem ser quantitativos, como temperatura, pressão ou velocidade, ou podem ser qualitativos, como fornecedor, método de produção e operador.

- Variáveis conhecidas: Variáveis, identificadas previamente, que podem ter um efeito, mas não podem ou não devem ser deliberadamente manipuladas ou mantidas constantes.
- Erro experimental: Aquelas variáveis que não são consideradas explicitamente são análogas a causas comuns de variação. Eles representam o “nível de ruído” do processo e seus efeitos são impedidos de contaminar os efeitos das variáveis primárias por aleatorização.
- Interação: Uma condição em que o efeito de um fator depende do nível de outro fator.

Quando analisada a interação de dois fatores, é observado se as linhas são paralelas ou se não são paralelas. Conforme mostrado na Figura 6 quando as linhas não são paralelas, significa que há interação entre os fatores A e B, por outro lado, quando as linhas são paralelas, os dois fatores não têm interação.

Figura 6 - Interação entre fatores



Fonte: Adaptado de Pyzdek e Keller (2010)

2.5.1 DOE fatorial completo de 2³

Certos tipos especiais de experimentos fatoriais são muito úteis no desenvolvimento e aprimoramento de processos. Uma delas é um planejamento fatorial com k fatores, cada um em dois níveis (MONTGOMERY, 2004).

De acordo com Mathews (2004) o delineamento de experimentos 2^3 tem dois níveis de cada uma das três variáveis e requer $2 \times 2 \times 2 = 8$ execuções . Obedecendo a equação 5:

$$N^{\circ} \text{ Total de rodadas} = (\text{Número de níveis})^k \quad (5)$$

Onde:

$k = \text{Quantidade de fatores}$

Obtém-se a partir desta configuração a matriz de experimento como a no exemplo da Tabela 1.

Tabela 1 - Matriz de experimentação

Std	Run	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}
1	8	-	-	-	+	+	+	-
2	3	-	-	+	+	-	-	+
3	2	-	+	-	-	+	-	+
4	6	-	+	+	-	-	+	-
5	5	+	-	-	-	-	+	+
6	1	+	-	+	-	+	-	-
7	4	+	+	-	+	-	-	-
8	7	+	+	+	+	+	+	+

Fonte: Mathews, 2004.

A primeira rodada do experimento, a rodada um, deve ser configurada com x_1 em seu nível +1, x_2 em seu nível -1 e x_3 em seu nível +1. Após a conclusão da primeira rodada, o processo deve ser reconfigurado para a segunda rodada, rodada dois, assim por diante até que todas as oito execuções sejam concluídas.

Conforme Montgomery (2004), este experimento possui oito combinações de nível de fator. E permite que três efeitos principais sejam estimados (A, B e C) juntamente com três interações de segunda ordem (AB, AC e BC) e uma interação de terceira ordem (ABC). Assim, o modelo fatorial completo poderia ser escrito simbolicamente de acordo com a equação 6.

$$y = \mu + A + B + C + AB + AC + BC + ABC + \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

y = Variável resposta

μ = Média geral

ε = Erro aleatório

Letras maiúsculas = Efeitos principais e interações

2.5.2 Análise gráfica do DOE

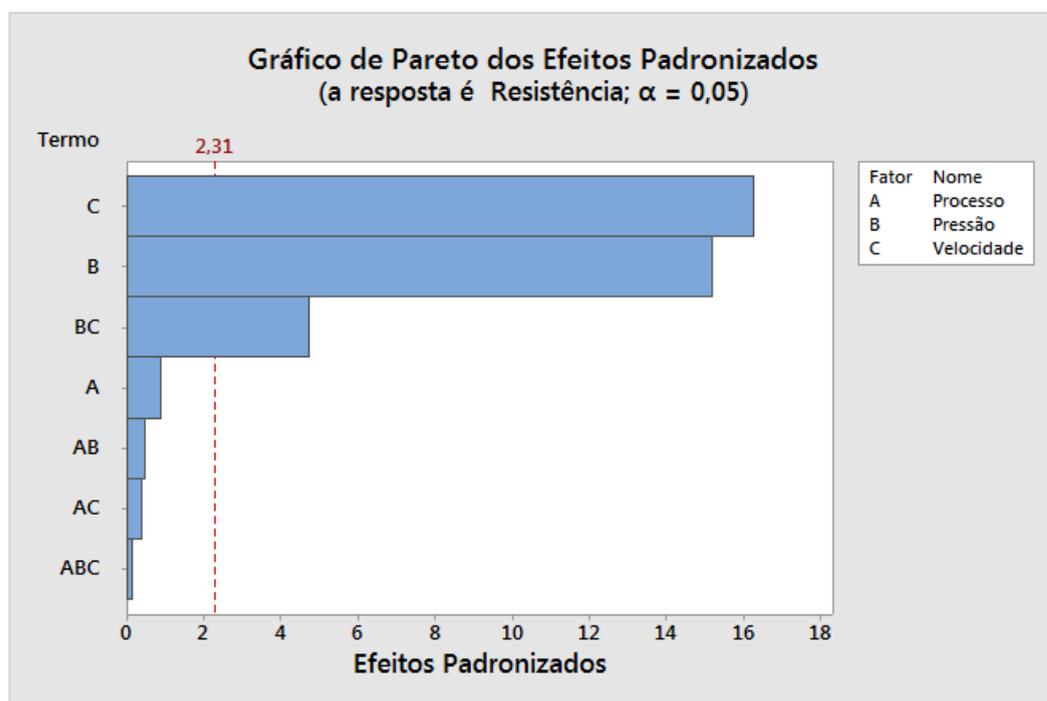
Quando a análise do delineamento de experimento é executado por software de análise estatística, como por exemplo, Minitab®, alguns gráficos são utilizados como recurso avaliativo, são eles, gráfico de pareto dos efeitos padronizados, gráfico de probabilidade normal e o gráfico dos efeitos principais.

Werkema (2014) explica que o gráfico de pareto é uma representação de barras que tem como principal objetivo a priorização de temas.

O gráfico de pareto dos efeitos padronizados é usado para interpretar os resultados obtidos no delineamento de experimentos. Neste gráfico o interesse é observar os fatores individualmente, os quais serão representados por letras, sendo as letras sozinhas os fatores individuais e as combinações de letras, as interações de ordens mais altas. Os fatores que ultrapassam a linha pontilhada, são considerados estatisticamente significativos (NEVES, 2013). A Figura 7 apresenta um exemplo de gráfico de Pareto.

Os dois fatores C e B, pela barra do gráfico ultrapassar a linha pontilhada, são estatisticamente significativos e a interação de segunda ordem BC também é significativa. Os demais efeitos, para o exemplo da Figura 7, não são estatisticamente significativos.

Figura 7 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados



O gráfico de probabilidade normal é uma ferramenta estatística que busca verificar a validade da suposição de que a amostra de interesse tenha sido extraída de uma distribuição normal (ALBIERO et al., 2012).

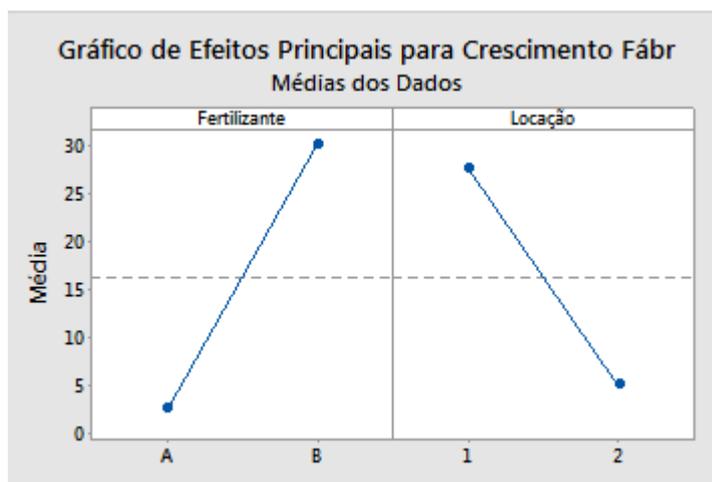
O Minitab® usa uma abordagem para o gráfico de probabilidade normal que transforma o eixo Y vertical de uma maneira especial para que, se os dados forem distribuídos normalmente, um gráfico dos dados do menor para o maior seguirá uma linha reta, explica Levine (2006).

O gráfico de efeitos principais é usado para interpretar os resultados obtidos no delineamento de experimentos. A interpretação dos gráficos de efeitos principais é relativa, linhas com declives mais acentuados, tanto de cima para baixo quanto de baixo para cima, significam um maior impacto nas médias das variáveis resposta. Porém, se o declive se apresenta suave, ou quase nulo, o impacto também será pequeno (NEVES, 2013).

Para o caso da Figura 8, imagina-se que uma empresa de fertilizante está testando os fertilizantes de uma empresa B e uma outra empresa A, medindo o crescimento de plantas. O gráfico mostra que o fertilizante B obteve uma média

maior do que o fertilizante B. No mesmo contexto, a média de crescimento das plantas foi maior na locação 1 do que na locação 2, de acordo com o gráfico.

Figura 8 - Gráfico dos efeitos principais



Fonte: Minitab, LCC (2021)

É necessário observar que quando a linha é horizontal, os efeitos principais são nulos. Os níveis do fator afetam a variável resposta igualmente. Porém, quando a linha não é horizontal, evidencia-se um efeito principal. Os níveis do fator afetam a variável resposta de modo diferente. (MINITAB,LCC, 2021).

2.6 DADOS DISCRETOS E DADOS CONTÍNUOS

Dado contínuo é todo dado que segue uma escala que pode ser infinitamente dividida, logo, do ponto de vista estatístico, sendo mais fácil de ser analisada. Todas as variáveis qualitativas são discretas, como a cor das peças de um produto ou número de alunos em uma escola. Mas também as variáveis quantitativas podem ser discretas, um exemplo é o tamanho dos sapatos, pois o número de valores que essas variáveis podem assumir é limitado. As variáveis que podem assumir um número infinito de valores são chamadas de variáveis contínuas (HEUMANN; SHALABH, 2016).

Para Allen (2019) os dados são discretos quando assumem apenas um número finito de pontos que podem ser representados pelos inteiros não negativos. Um exemplo de dados discretos é o número de defeitos em uma amostra. Os dados são

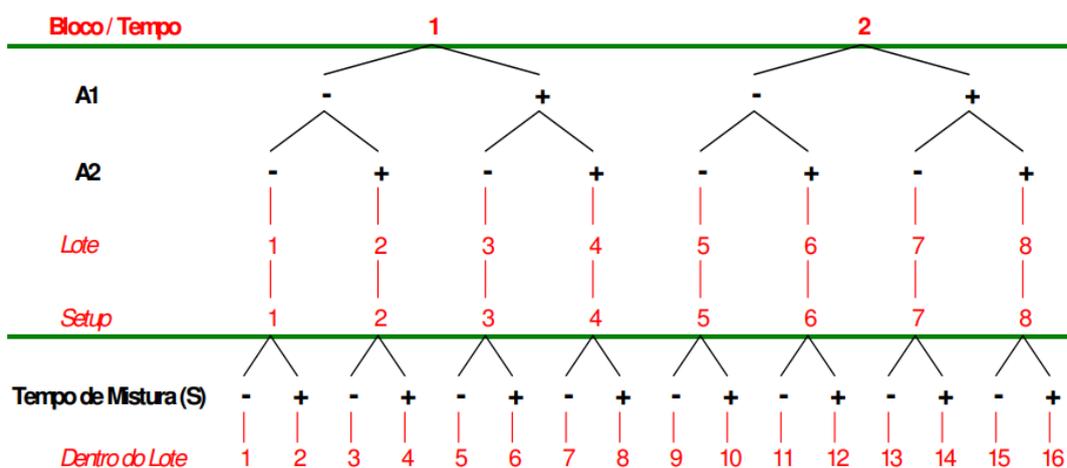
ditos contínuos quando existem em um intervalo ou em vários intervalos. Um exemplo de dados contínuos é a medição de pH.

2.7 DIAGRAMA DE RELAÇÃO DE FATORES

Dentro de um projeto de melhoria, muitas pessoas podem estar envolvidas: líder de projeto, técnicos, engenheiros, operadores e demais indivíduos que venham a agregar ao interesse comum de melhoria. Tão importante como um bom planejamento de experimento, é a boa comunicação entre os integrantes sendo que, por comunicação entende-se todos os níveis, incluindo nível documental. Desta forma, algumas técnicas são utilizadas a fim de ter todos os indivíduos falando a mesma língua.

Ramm (2007) explica que o diagrama de relação de fatores (FRD) é uma ferramenta gráfica muito importante, a qual irá orientar os investigadores a fazer perguntas corretas e assim, tomar decisões apropriadas. O diagrama de relação de fatores contribuirá para um melhor entendimento e análise antes do experimento ser realizado. O FRD mostra as relações entre as restrições do experimento, fatores, manipulados e não manipulados, conforme observado na Figura 9.

Figura 9 - Exemplo de FRD



Fonte: Sanders (1995)

FRD se mostra muito importante na prática para os investigadores, principalmente por ajudar a reduzir a probabilidade de fatores não conhecidos se

alinharem com os fatores manipulados, uma vez que esta ferramenta manifesta a relação entre fatores manipulados e não manipulados (SANDERS e COLEMAN, 2006).

2.7.1 Definição de ruído

Durante os experimentos diversas variáveis estão dentro do processo, algumas variáveis são o próprio objeto de estudo e há o interesse de, através da manipulação de níveis, gerar eventos significativos, e assim entender a contribuição destes no resultado. Mas também há variáveis as quais os efeitos não são desejados dentro do experimento, entretanto influenciam os resultados.

Os ruídos são fatores incontroláveis, difíceis ou muito caros para controlar e ainda há aqueles os quais ignoram-se. Para tais fatores, algumas ações são sugeridas para que a influência dos mesmos seja minimizada. Se o ruído no caso é algo crucial ao produto ou processo, deve-se procurar incluí-lo no experimento. Outra opção seria limitar o escopo do experimento em um nível de ruído. Ainda, quando possível, deve-se buscar manter o ruído constante durante a experimentação (VOEHL et al., 2014).

2.7.2 Réplica

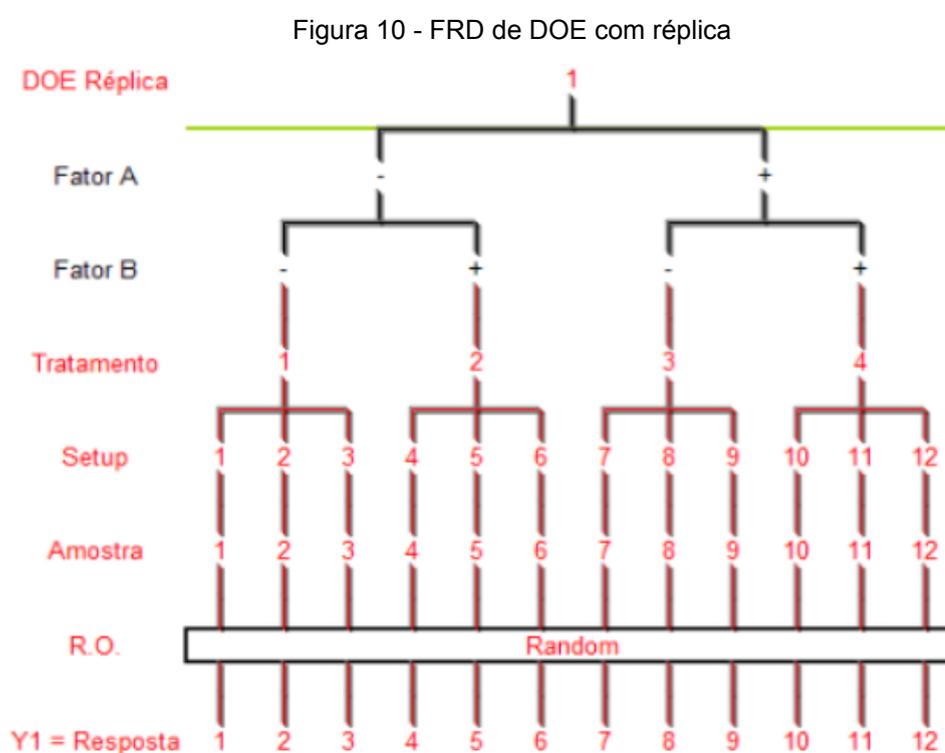
A forma como a experimentação é planejada e construída está diretamente relacionada com a qualidade dos resultados obtidos. Efeitos da interação entre os níveis do tratamento podem ser melhor entendidas e algumas vezes melhor quantificadas, de acordo com a estratégia a ser utilizada. Uma das estratégias usualmente utilizadas é a réplica (LEVINE, 2006).

Quando o mesmo tratamento é rodado duas ou mais vezes dentro do experimento mas em diferentes momentos no experimento, isso é chamado de réplica. Ou seja, quando a rodada é repetida, porém os níveis acima como por exemplo, pressete da ferramenta, fixação do material, centralização da peça, são realizados novamente, desta forma, o ruído de todo o setup está agregado na medida tomada. Desta forma, se as medidas das réplicas resultarem em um valor muito próximo, pode-se dizer que os níveis acima são estáveis (MINITAB, LCC, 2021).

2.7.3 Aleatorização

Segundo George, Rowlands, Price e Maxey (2005) a aleatorização é uma técnica utilizada para diluir o efeito do ruído através de toda a área de experimentação e ainda, reduz a probabilidade da presença de viéses dentro do experimento. Usualmente é realizada a aleatorização na numeração das rodadas.

A Figura 10 ilustra um diagrama de relação de fatores para um experimento planejado com réplica.



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando um experimento é planejado com réplicas, necessariamente é preciso realizar a aleatorização logo após o nível de amostras, assim, é garantido que o mesmo tratamento não seja rodado em sequência, o que seria classificado como repetição e não réplica (MINITAB, LCC, 2021).

2.8 TRANSFORMAÇÃO DA VARIÁVEL RESPOSTA ATRAVÉS DO RANK

Depois das rodadas de experimentos serem executadas e conseqüentemente as relativas medições vierem ao conhecimento do investigador, usualmente a análise com auxílio gráfico, já será possível observar possíveis discrepâncias quando os dados são ordenados do maior para o menor, ou seja, uma não normalidade. Esta discrepância, também conhecida como *outliers*, podem de alguma forma atrapalhar a análise realizada, uma vez que faz uso do pressuposto de que os erros do experimento têm variância comum. Uma vez observada a presença de *outliers* no experimento, se faz recomendado o uso de uma transformação matemática nos dados originais (BOX; FUNG, 2007).

Uma vez necessário o tratamento dos dados originais, algumas são as maneiras de fazê-lo. O investigador pode fazer a transformação com logaritmo, por contagem, por fração e ainda poderá realizar uma transformação por ranqueamento. Mathews (2004) explica que o tratamento por *rank*, transforma os dados brutos do experimento substituindo-os por uma ordem de *rank*. A validade desta transformada, pode ser verificada através de comparativo, após análise, para ambos, dados puros e dados tratados. Assim, pode-se verificar se há diferenças estatisticamente significantes.

2.9 MODELO DE REGRESSÃO

Segundo Chein (2019) o modelo de regressão linear utiliza uma variável independente numérica para prever valores de uma variável dependente numérica. É possível melhorar a previsão, se utilizado mais de uma variável independente.

Quando se tem, dentro do modelo, várias variáveis independentes, assume-se uma relação linear entre cada variável independente e a variável dependente (LEVINE, 2006). Conforme expresso na equação 7.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (7)$$

Nas palavras de George, Rowlands, Price e Maxey (2005) os B_s são as constantes que estamos tentando encontrar, eles nos dizem quanto e de que forma, as entradas afetam as saídas.

2.9.1 Coeficiente de determinação r^2

Levine (2006) define o coeficiente de determinação r^2 como a razão entre a soma dos quadrados da regressão (SSR) e a soma total dos quadrados (SST). Mede a proporção de variação das variáveis dependentes, que é explicada pelas variáveis independentes no modelo de regressão (CHEIN, 2019). Essa proporção é apresentada na equação 8.

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (8)$$

George, Rowlands, Price e Maxey (2005) complementam que r^2 é a porcentagem de variação que pode ser explicada pelo modelo.

Mathews (2004) alerta que quanto mais coeficientes de regressão são adicionados ao modelo, conseqüentemente o valor do coeficiente de determinação aumentará e um valor alto de r^2 não necessariamente significa que o modelo está correto. Do mesmo modo, valores baixos de r^2 não invalidam um modelo. Para tal, é necessário observar o coeficiente de correlação ajustado.

2.9.2 Coeficiente de correlação ajustado $r_{ajustado}^2$

Quando um modelo é composto por várias variáveis dependentes o coeficiente de determinação continua aumentando, e a qualidade com que os preditores explicam a variação do modelo fica comprometida, para estes casos é determinado um valor de $r_{ajustado}^2$ (HEIJ et al., 2004). Desta forma é descontada complexidade adicional. Este coeficiente de determinação ajustado é mostrado na equação 9.

$$r_{ajustado}^2 = 1 - \frac{df_{total} SS_{\varepsilon}}{df_{\varepsilon} SS_y} \quad (9)$$

Onde:

df_{total} = Grau de liberdade total

df_{ε} = Grau de liberdade do erro

SS_{ε} = $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum \varepsilon_i^2$

SS_y = $\sum (y_i - \bar{y}_i)^2$

Portanto, $r_{ajustado}^2$ será sempre menor do que r^2 e entre os dois, quando se trata de uma análise de modelo complexo, o mais indicado é usar o coeficiente de correlação ajustado (CHEIN, 2019).

2.10 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

A ANOVA emprega um único teste estatístico para comparar simultaneamente todos os pares de médias possíveis para verificar se há diferenças entre eles (MATHEWS 2004).

Análise de variância (ANOVA) é uma ferramenta que testa a hipótese de que a média de duas ou mais populações são iguais. É avaliado a importância de um ou mais fatores combinando a média da variável resposta em diferentes níveis dos fatores (Minitab, LLC, 2021).

Para Levine (2006) na ANOVA, a variação total das medidas em todas as populações é subdividida em variação que se deve a diferenças entre as populações e variação que se deve à variação dentro das populações

2.11 OTIMIZADOR DE RESPOSTA

O otimizador de respostas disponibilizado pelo Minitab® irá ajudar a identificar combinações de definições de variáveis que otimizam uma respostas simples ou um

conjunto de respostas. Útil quando há a necessidade de analisar o impacto de mais de uma variável em uma resposta (Minitab, LLC, 2021).

Antes, é preciso preparar um modelo para poder usar a otimização. No caso de mais de uma variável resposta Y, é necessário realizar o ajuste de modelo para cada uma separadamente (Minitab, LLC, 2021).

Neste estudo foi utilizado o otimizador com objetivo de procurar por uma resposta ideal para o conjunto de variáveis independentes escolhidas. Considerando os modelos para a variável resposta tempo e para a variável resposta ruído gerado pelo usinagem.

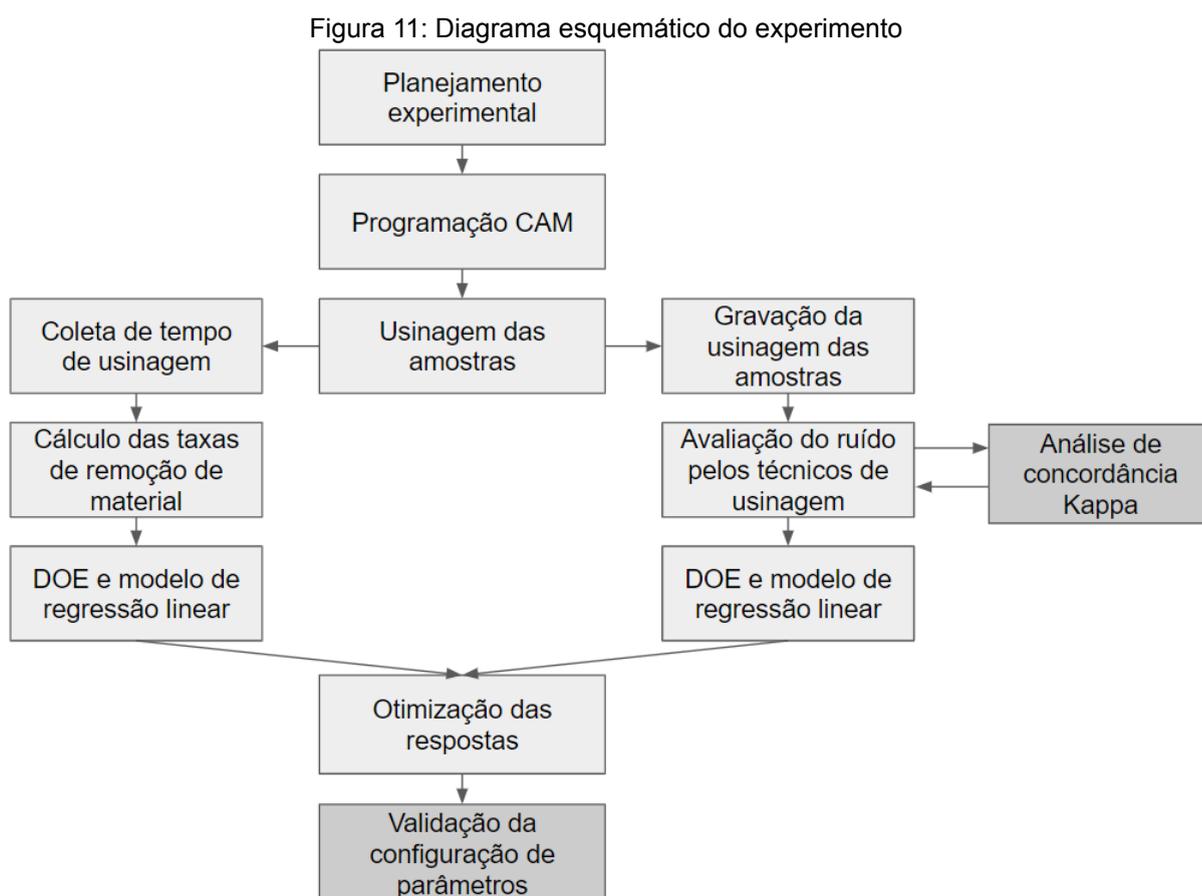
Algumas possíveis otimizações são trazidas pelo Minitab®, tais como:

- Minimizar a resposta; Quanto menor melhor.
- Uma resposta alvo; Determinar um valor a ser atingido
- Maximizar a resposta; Quanto maior melhor.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O capítulo a seguir tem como objetivo apresentar os materiais e equipamentos utilizados durante o estudo, como, bloco de ABS, ferramenta de corte de perfil de topo reto e polida e o centro de usinagem VMC 1270 Hartford. Ainda, detalha as variáveis envolvidas no processo de otimização, tais como, velocidade de corte (V_c), o tipo de corte, avanço por aresta (f_z), profundidade de corte (a_p) e penetração de trabalho (a_e), que são as variáveis independentes. E as variáveis dependentes que são a taxa de remoção de material e o ruído gerado pelo desgaste.

A fim de agregar entendimento, encontra-se na Figura 11 um fluxograma que detalha os procedimentos empregados durante o período experimental.



Fonte: Próprio autor

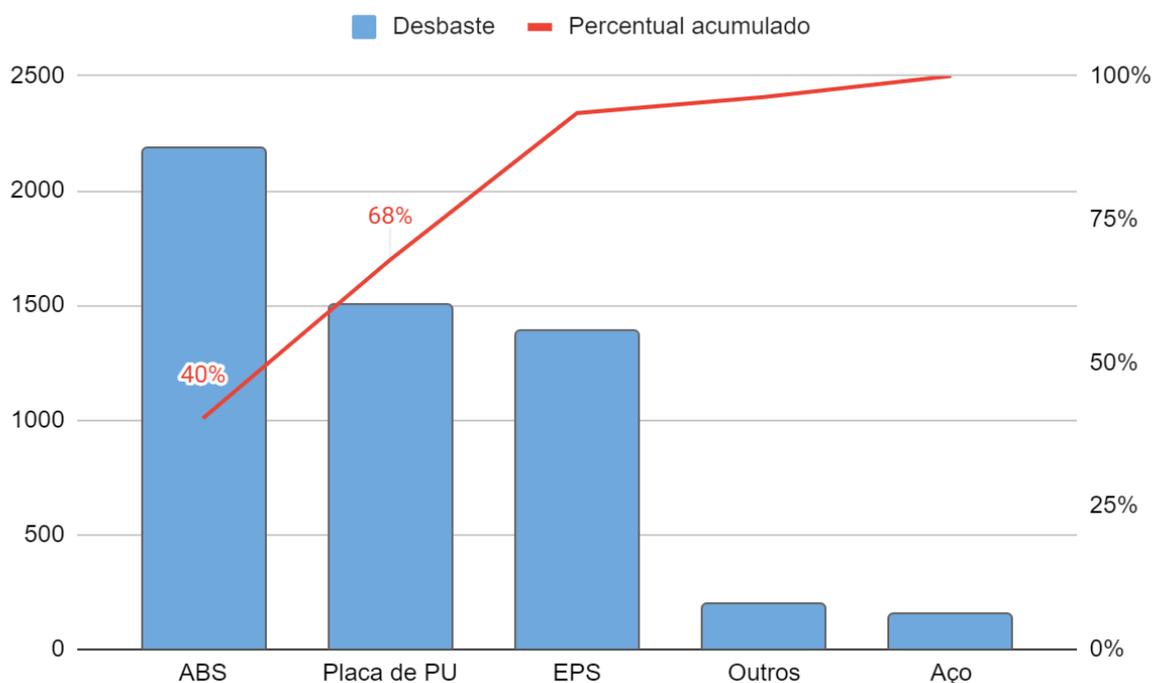
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados durante os ensaios. Ressalta-se que todo o período de experimentação foi realizado no laboratório de prototipagem de uma empresa multinacional da linha branca.

As usinagens foram executadas em um centro de usinagem da marca Hartford, modelo VMC 1270 com área de trabalho de 1270 milímetros na direção X, 630 milímetros na direção Y e 635 milímetros na direção Z, tamanho de mesa de 1370 milímetros em X e 600 milímetros em Y. A máquina dispõe de uma capacidade de potência de 28,5Kw e possui um limite de rotação de 10.000 RPM. Utiliza cone padrão BT40 e é equipada com um comando CNC Mitsubishi HARTROL-M7200.

Para os ensaios propostos foi escolhido o material que mais ocupa horas de desgaste nas máquinas do laboratório, que é o ABS. Conforme mostra o gráfico da figura 12, as horas referentes ao material ABS representam 40% de todo o tempo de desgaste despendido no ano de 2021 no laboratório.

Figura 12 - Pareto dos materiais mais usinados

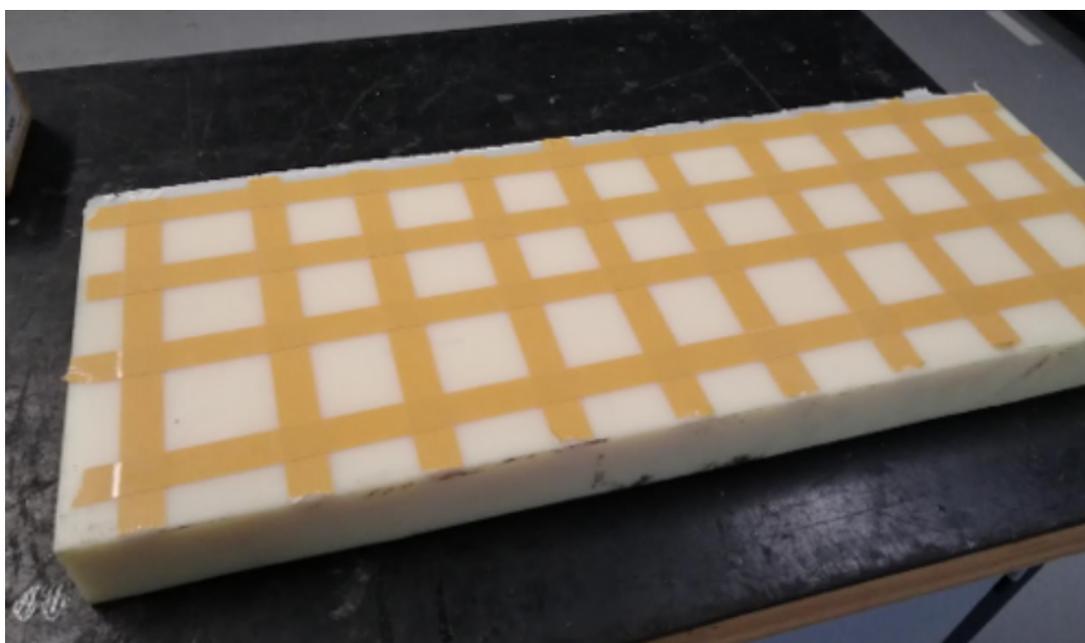


Fonte: Próprio autor

A escolha do ABS como material do estudo, visto este ser o maior ocupante do tempo nas máquinas, acarretará no maior ganho possível dentre os materiais utilizados dentro do laboratório. O ABS é um material polimérico fornecido em forma de blocos com dimensões de 1200 milímetros na longitudinal, 600 milímetros na transversal e 80 milímetros de espessura.

A fixação do material bruto de ABS na mesa do centro de usinagem se dá com a utilização de fita dupla face. A figura 13 ilustra o posicionamento das fitas no material.

Figura 13 - Método de fixação da matéria prima



Fonte: Próprio Autor

A colocação da fita deve ser realizada nas direções longitudinais e transversais, mantendo uma faixa de espaçamento de 30 a 50 milímetros entre uma fita e outra.

De acordo com Fernandes et al. (2007) existem muito poucos estudos desenvolvidos de usinagem com materiais poliméricos e com o advento dos plásticos de engenharia, as empresas passaram a adaptar-se a estes materiais de forma empírica. Neste contexto, foi evidenciado que os operadores do laboratório utilizavam para a usinagem do ABS, velocidade de corte de 150m/min, avanço por aresta de 1 mm/aresta, profundidade de corte de 2 milímetros e penetração de trabalho de 8 milímetros. A ferramenta utilizada é uma fresa de perfil reto, com diâmetro de 16 milímetros e duas arestas cortantes. Este histórico de informações

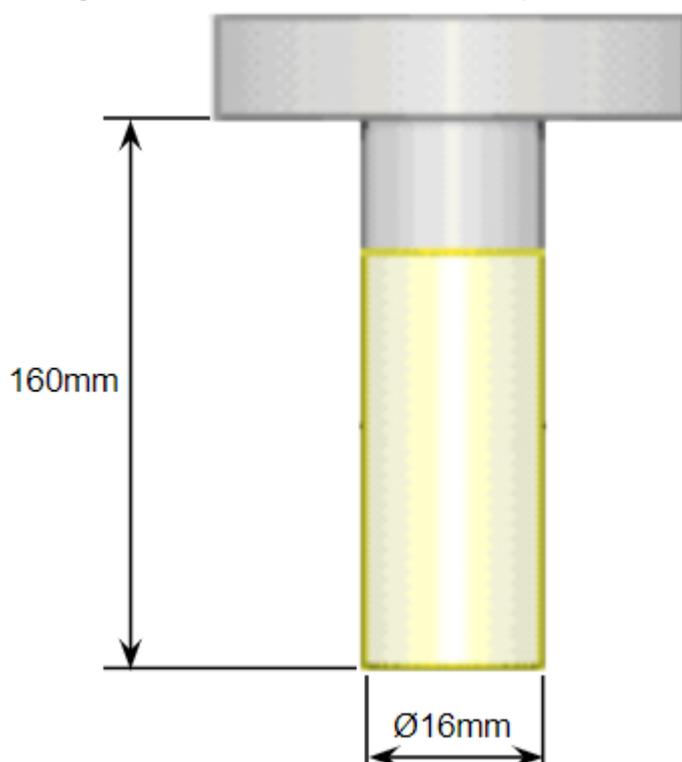
se faz importante, a fim de entender de que maneira as variáveis do processo podem ser manipuladas, compreendendo assim, os efeitos de cada uma.

Visto que a experimentação se dá sobre a operação de desbaste e considerando o tipo de ferramenta que empiricamente já é utilizada para realização de desbaste no laboratório, escolheu-se uma ferramenta de metal duro com perfil de topo reto. Segundo Toh (2004) para processo de usinagem de desbaste, geralmente é empregada ferramenta de corte de perfil reto devido a uma maior eficiência de remoção de material. Entretanto, Rodrigues (2005) alerta que perfis de ferramenta de corte com a aresta arredondada ou com emprego de chanfro aumentam a resistência mecânica da ferramenta de corte, preservando a integridade da aresta cortante. Todavia, Lokensgard (2013) afirma que os materiais termoplásticos, que é o caso do ABS, tem influência muito pequena no desgaste da ferramenta. Desta forma, a escolha pelo perfil de ferramenta com maior eficiência de remoção de material se faz mais plausível.

Lokensgard (2013) reitera que parâmetros de corte e características de ferramentas utilizadas para usinagem de materiais leves como latão e alumínio, podem ser utilizados na usinagem de polímeros. Neste contexto, Gomes e Vallejos (2003) evidenciam que para a usinagem de alumínio, intercorrências indesejadas como o empastamento do material ocorrem durante o desbaste devido a alta deformabilidade do material, destacando-se a necessidade de melhorar a evacuação do cavaco através de saídas de escoamento mais profundas. Como já experienciados tais fenômenos de empastamento utilizando o ABS, foi escolhido o emprego de uma ferramenta de corte polida com apenas uma aresta cortante, a fim de diminuir o coeficiente de atrito e aumentar a saída de cavaco.

Fixou-se uma altura de 165 milímetros para fora do cone, uma vez que muitas peças usinadas no laboratório demandam esta altura de trabalho, por este motivo, fixou-se ao extremo com relação a altura. Na Figura 14 apresenta-se a ferramenta utilizada nos experimentos.

Figura 14 - Ferramenta utilizada nos experimentos



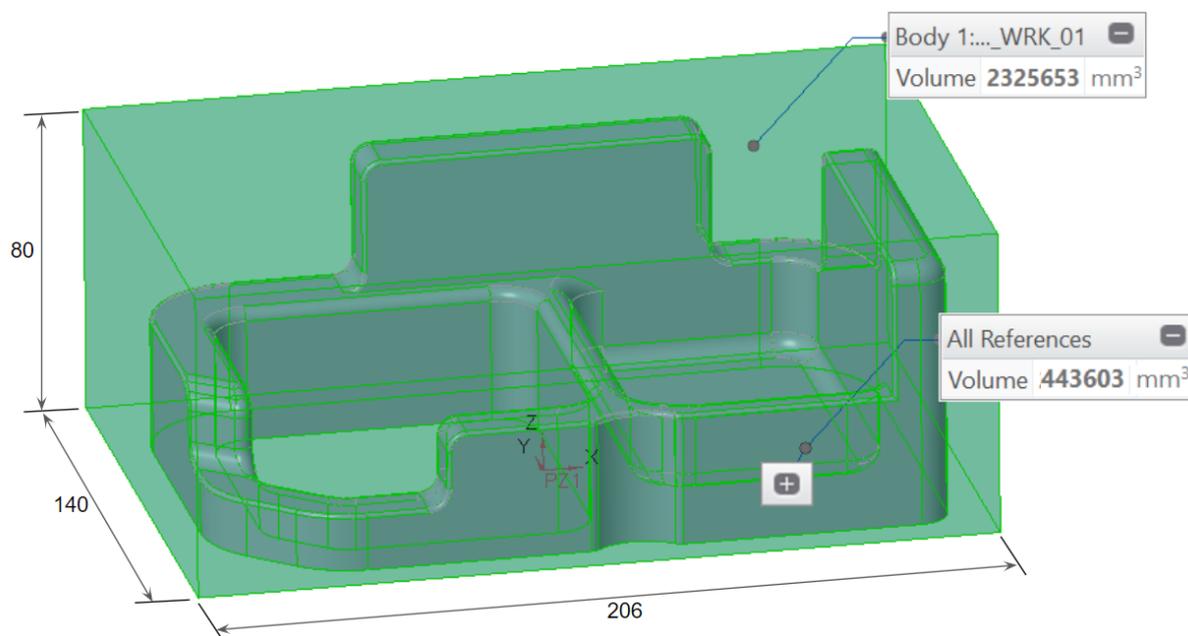
Fonte: Próprio autor

Dentro de uma população de peças que passam pelo processo de desbaste todos os anos no laboratório onde o estudo de caso transcorreu, em alguns aspectos, várias se repetem, por ostentar características semelhantes como ressaltos, rebaixos, superfícies arredondadas, etc. Neste contexto, uma delas, a qual em conjunto com os programadores entendeu-se ser a que melhor representa a população de peças, leva em torno de 66 minutos para ser desbastada.

A criação e transcrição dos códigos NC onde encontram-se as trajetórias percorridas pela ferramenta e os códigos de funcionamento da máquina, realizou-se com auxílio da plataforma de manufatura auxiliada por computador (CAM) do *software* de engenharia *Creo parametric 7.0* e foram pós-processadas para posterior leitura no comando CNC Mitsubishi.

Na Figura 15, nota-se o formato da geometria da peça, contendo os detalhes de ressaltos, rebaixos e regiões arredondadas. Verifica-se ainda o volume de 2325653mm^3 referente ao bloco bruto, o volume de 443603mm^3 referente a peça final e as dimensões máximas do bloco.

Figura 15 - Geometria da peça escolhida



Fonte: Próprio autor

As dimensões máximas da peça são 206 milímetros no sentido de X, 140 milímetros no sentido de Y e 80 milímetros no sentido de Z. Na qual há a necessidade, baseado no desenho matemático da peça, da retirada volumétrica de material de 1882050mm³ no processo de desbaste. Este valor é obtido através da subtração do volume referente ao bloco bruto pelo volume referente a peça final.

3.2 VARIÁVEIS DE PROCESSO

A fim de garantir maior estabilidade no processo alguns parâmetros foram mantidos constantes durante a experimentação, um deles foi a velocidade de corte (V_c). Para determinar o V_c , precisa-se levar em consideração o valor já utilizado para ABS, que conforme explanado no tópico anterior é de 150m/min.

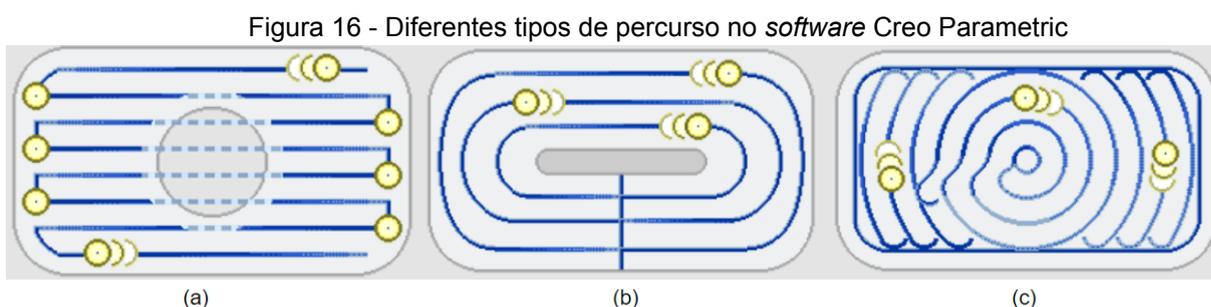
Santos (2017), através de uma análise qualitativa com sinais de vibrações, evidenciou a influência da velocidade de corte na diminuição das forças de usinagem, o que beneficia o emprego de maiores taxas de velocidade. Entretanto, segundo Hioki (2006) o aumento das taxas de velocidade, contribuem para o aumento da temperatura do processo, o que para materiais como ABS, ajuda a promover o empastamento. Oliveira (2003) explica que o trabalho exercido pela ferramenta ao cortar o material, é em grande parte transformado em calor, e 80%

deste calor tende a ser removido pelos cavacos gerados. Os outros 20% vão para a ferramenta e ou para a peça. Sendo o ABS um material polimérico, possui uma condutividade térmica menor do que em materiais metálicos, o que dificulta a dissipação deste calor.

Para Heisel e Gringel (1996) para obter usinagem HSM multiplica-se numa escala de 5 a 8 vezes a velocidade de corte convencional. Em vista disto, e das observações levantadas no parágrafo anterior, foi escolhido fazer um incremento modesto de 2 vezes o valor atual de velocidade de corte. Mantendo o V_c constante em 300 m/min.

O sentido de corte também foi mantido na opção “zig zag” dentro do software Creo parametric, o que significa que o *software* utilizará tanto sentido concordante como o sentido discordante, ficando a cargo do *software* calcular a trajetória que a ferramenta tomará.

O tipo de percurso é outra variável que foi mantida constante durante os experimentos. A Figura 16 abaixo ilustra as três opções de percurso disponíveis no *software* Creo Parametric, sendo o da figura (a) o percurso intitulado pelo *software* como “Type_1” onde os movimentos são unidirecionais, o da figura (b) o percurso intitulado “Type_spiral” onde o percurso toma forma de espiral de acordo com que a ferramenta vai andando e o percurso (c) intitulado “constant_load” o qual determina que o contato entre ferramenta e matéria prima se manterá constante.



Fonte: Próprio autor

Eversheim et al. (1989) apud Toh (2004) sugerem que velocidades de corte e espessura de corte constante dentro de um intervalo específico, reduzem significativamente o tempo de usinagem e tendem a aumentar a vida útil da ferramenta. Em vista disto, o percurso “constant_load” foi escolhido para manter-se constante durante os experimentos.

Baseado na definição da taxa de remoção de material (Q), que está diretamente relacionada ao tempo de duração da usinagem (MACHADO et al., 2015), e com o auxílio dos profissionais de usinagem do laboratório, foram escolhidas as variáveis independentes as quais busca-se entender os seus impactos nas variáveis resposta Q e ruído gerado pelo desbaste. A primeira variável independente é o avanço por aresta (f_z), a segunda variável é a profundidade de corte (a_p), e a última é a penetração de trabalho (a_e).

Como resultado das variáveis independentes envolvidas no processo, foram detalhadas as saídas do processo. Machado et al. (2015) destaca que como parâmetros de saída e métodos de avaliação de desempenho, é possível listar alguns indicadores, sendo eles tempo de vida da aresta de corte, o tipo de cavaco gerado, o acabamento superficial, a taxa de remoção de material, a força ou a potência de usinagem, e a formação da aresta postiça de corte. Entretanto, conforme mencionado nos tópicos acima, para materiais termoplásticos, quase não há desgaste de ferramenta (LOKENS GARD, 2013). Ainda, segundo Toh (2004) para processo de desbaste não existe, ou é muito pequeno, o interesse no dimensional e acabamento superficial da peça. Logo, como variáveis resposta deste estudo de caso, foram utilizadas a taxa de remoção de material, através da medição do tempo de usinagem a avaliação do ruído gerado pela usinagem como uma alternativa qualitativa de mensurar a potência de corte, sendo este o método prático utilizado.

Como primeira opção para a segunda variável resposta, optou-se pela utilização de um equipamento que mede a potência consumida pela máquina, com o intuito de através da diferença de potência entre a máquina estacionada e a máquina solicitada, obter a potência de corte gerada pela usinagem. No entanto, quando avaliada a efetividade da medição, a mesma se mostrou ineficiente no quesito repetibilidade, uma vez que diferentes tomadas de medições com o mesmo set de parâmetros apontavam medidas muito discrepantes, invalidando o método.

3.2.1 Método de medição da variável taxa de remoção de material (Q)

Para obtenção dos valores de tempo de desbaste que cada amostra atingiu, utilizou-se do cronômetro do painel do centro de usinagem conforme Figura 17. O

cronômetro da máquina é iniciado assim que o botão de *Cycle Start* é pressionado e termina assim que a máquina lê o comando (M30) dentro do programa NC.

Figura 17 - Cronômetro da máquina

4	Oper auto	32536:49:47
5	Part auto	26533:12:47
6	Temp1 ext	25546:06:22
7	Temp2 ext	0:52:25
8	Tempo cicl	0:52:25

Fonte: Próprio autor

Com o valor do tempo de duração da usinagem em mãos, foi possível calcular os valores de Q através da discretização da equação 4 apresentada no capítulo um. A equação tem uma resposta em mm^3/min , interpretando esta saída como sendo a quantidade de volume removida por minuto, adapta-se a equação 4 para a equação 10 abaixo:

$$Q = \frac{V_b}{t_u} \quad (10)$$

Onde:

V_b = *Volume total do bloco a ser removido*

t_u = *Tempo de duração da usinagem [min]*

3.2.2 Método de medição da variável ruído gerado pelo desbaste

Após a invalidação do método de medição da potência de corte, discutiu-se com os operadores e programadores da área, qual seria o fator que determina, na

visão fabril, se uma usinagem de desbaste era satisfatória ou se precisava ser revisada. E a resposta unânime foi que a tomada de decisão no chão de fábrica se dá a partir do ruído gerado através da interação entre ferramenta de corte e bloco (substrato), ruído este descrito como sendo uma característica sonora desagradável.

Os avaliadores escolhidos são os profissionais de usinagem que atuam no laboratório onde realizou-se os experimentos. O processo de medição se dará com a classificação da percepção sonora da usinagem, realizada através de vídeo, nos atributos descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Atributos de classificação de ruído

Classificação de ruído	
OK	Usinagem de desbaste emitindo ruídos considerados normais inerentes ao processo.
NOK	Usinagem de desbaste emitindo ruídos desagradáveis anormais ao processo e indicam emprego de parâmetros equivocados.

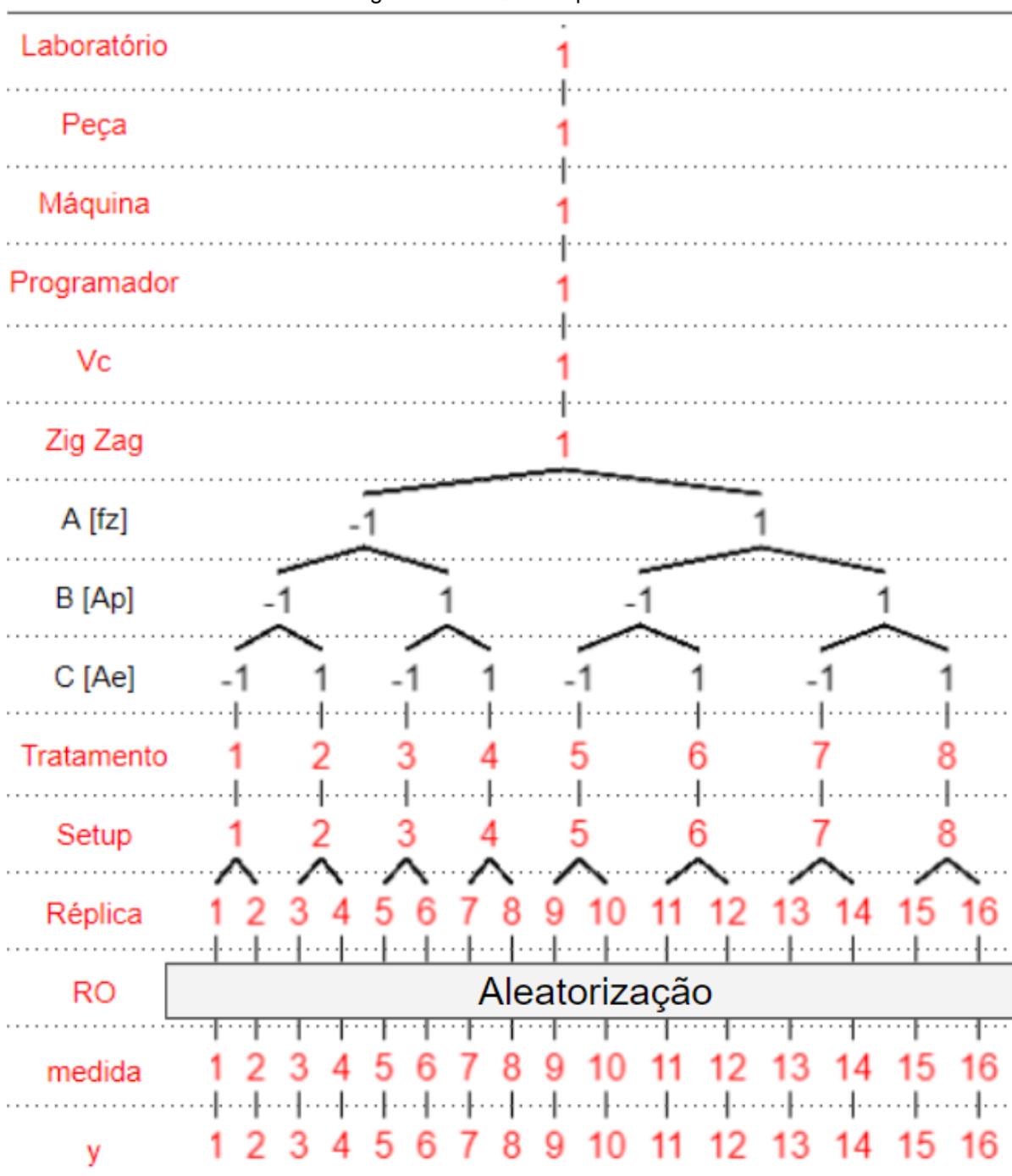
Fonte: Próprio Autor

No total foram 5 avaliadores que classificaram todas as amostras entre (OK) e (NOK). A fim de transformar os atributos em dados discretos, foi considerado avaliação (OK) com valor de 1 (um) e avaliação (NOK) com valor 0 (zero). Para cada amostra foi tirada uma média das cinco avaliações e este valor de média será considerado como dados discretos para avaliação estatística com o DOE.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Após a seleção de três variáveis independentes, avanço por aresta f_z , profundidade de corte a_p e penetração de trabalho a_e , os quais foram manipulados em dois níveis, classifica-se o experimento como fatorial completo. Com a utilização do diagrama de relação de fatores apresentado na Figura 18, é possível observar a relação entre os fatores manipulados e as variáveis fixas. Ainda, observa-se também o tratamento de cada amostra com uma réplica para cada, a fim de quantificar o erro experimental.

Figura 18 - FRD do experimento



Fonte: Próprio autor

Os fatores em vermelho, são os componentes não manipuláveis e os componentes em preto, são as variáveis independentes escolhidas como fatores as quais foram manipuladas em dois níveis. Os níveis estão representados como -1, sendo o nível com o valor mais baixo, e 1 representado o nível com valor mais alto. A linha de aleatorização vem logo na sequência da linha réplica, visando garantir

que as réplicas sejam executadas em momentos aleatórios e não de forma sequencial.

Com a estrutura da FRD montada, definiu-se todas as rodadas possíveis que foram realizadas, e as respectivas configurações dos níveis a serem estudados. A matriz do planejamento de execução apresenta-se na Tabela 3, considerando a ordem de execução e ainda, a forma como foi randomizado.

Tabela 3 - Matriz de planejamento

StdOrder	RunOrder	A(f_z)	B(a_p)	C(a_e)
7	1	-1	1	1
12	2	1	1	-1
4	3	1	1	-1
16	4	1	1	1
2	5	1	-1	-1
14	6	1	-1	1
1	7	-1	-1	-1
15	8	-1	1	1
11	9	-1	1	-1
10	10	1	-1	-1
9	11	-1	-1	-1
13	12	-1	-1	1
3	13	-1	1	-1
6	14	1	-1	1
8	15	1	1	1
5	16	-1	-1	1

Fonte: Próprio autor

Com a descrição da configuração de todas as rodadas possíveis do experimento, definiu-se então os valores dos níveis para cada um dos fatores. Conforme mostra a Tabela 4, o fator A avanço por aresta, foi estabelecido um valor de 0,5 para o nível -1 e 0,8 para o nível +1. Já os fatores B e C, correspondentes a profundidade de corte e penetração de trabalho, foram estabelecidos valores de 10 milímetros e 4 milímetros para o nível -1 e valores de 15 milímetros e 6 milímetros para o nível +1, respectivamente.

Tabela 4 - Valores dos níveis dos fatores

Fatores	Níveis	
	-1	+1
fz [mm/tooth]	0,5	0,8
Ap Profundidade de corte [mm]	10	15
Ae Penetração de trabalho [mm]	4	6

Fonte: Próprio autor

Embora Bauco (2003) alerte para consideração da deflexão da ferramenta no emprego de incrementos a_p e a_e elevados e o conseqüente comprometimento da tolerância dimensional da peça usinada, acredita-se que, pelo fato do substrato se tratar de um polímero, as chances destas intercorrências acontecerem são bastante pequenas, favorecendo o emprego de valores exploratórios mais altos. Fernandes et al. (2007) lembram que existem muito poucos estudos desenvolvidos de usinagem com materiais poliméricos e a abordagem empírica vem sendo a tratativa mais comum nestes casos.

Uma vez descrito os níveis para cada fator, tem-se a matriz de experimentos, na Tabela 5, com os devidos valores de cada nível, e assim, obtendo a configuração de parâmetro que cada rodada terá. Juntamente com os valores dos níveis, é possível calcular o valor teórico da taxa de remoção de material (Q) através da equação 7.

Por meio dos valores de taxa de remoção de material teóricos é possível realizar uma pré análise, com intuito de tentar predizer os fatores que mais influenciam no Q. Antes, é necessário esclarecer que como o Q é um valor dependente da multiplicação de três outros fatores, é evidente que aquele fator com maior magnitude de intervalo entre os níveis, terá maior influência na variação. Entretanto, essa predição pode ser interessante quando comparada com os valores de Q obtidos com os experimentos.

Tabela 5 - Matriz de planejamento com os níveis

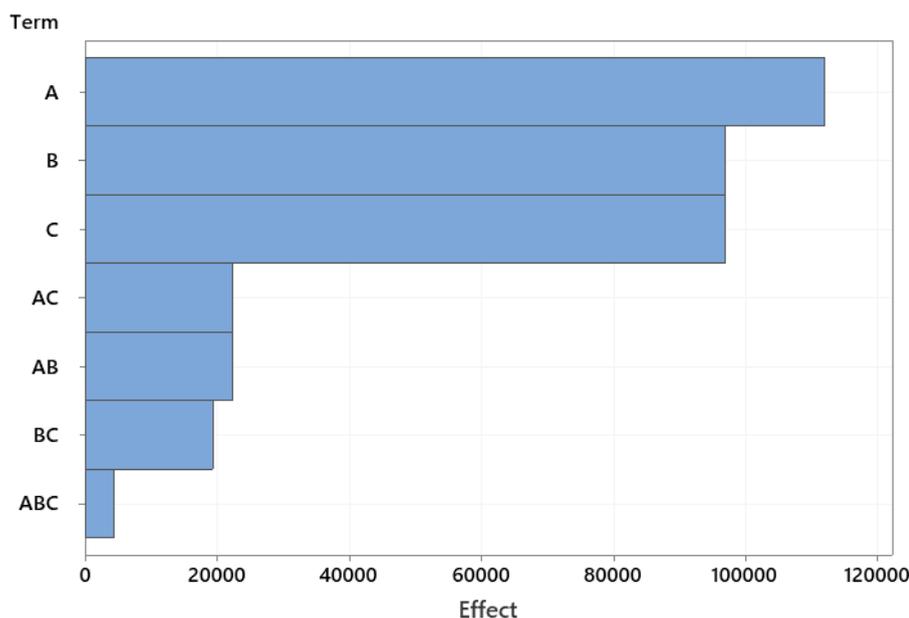
StdOrder	RunOrder	A(f_z)	B(a_p)	C(a_e)	Q teórico
7	1	0,5	15	6	268574,0
12	2	0,8	15	4	286478,9
4	3	0,8	15	4	286478,9
16	4	0,8	15	6	429718,3
2	5	0,8	10	4	190985,9
14	6	0,8	10	6	286478,9
1	7	0,5	10	4	119366,2
15	8	0,5	15	6	268574,0
11	9	0,5	15	4	179049,3
10	10	0,8	10	4	190985,9
9	11	0,5	10	4	119366,2
13	12	0,5	10	6	179049,3
3	13	0,5	15	4	179049,3
6	14	0,8	10	6	286478,9
8	15	0,8	15	6	429718,3
5	16	0,5	10	6	179049,3

Fonte: Próprio autor

Na Figura 19 são mostrados os gráficos de pareto dos efeitos padronizados para os valores de Q teóricos. O gráfico apontou todos os efeitos, inclusive os efeitos das interações de segunda e de terceira ordem. Os valores de contribuição de variância dos efeitos dos três fatores são de 38,26%, 28,74% e 28,74% para os fatores de avanço por aresta, profundidade de corte e penetração de trabalho, respectivamente. Visto que o valor teórico despreza os ruídos de processo, o valor da contribuição do erro é de 0%, este valor contribui para o aumento da significância dos efeitos de interação.

Observa-se que os valores dos efeitos de a_p e a_e foram iguais, isto devido a proporcionalidade do aumento dos níveis de 10 para 15 para o fator de profundidade de corte e de 4 para 6 para o fator de penetração de trabalho, que são exatamente 50%.

Figura 19 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para Q teórico



Fonte: Próprio autor

É esperado que o fator A avanço por aresta f_z seja o responsável pela maior fração dos efeitos na variável resposta taxa de remoção de material (Q).

3.4 ANÁLISE DE CONCORDÂNCIA DE ATRIBUTOS

Para alguns casos, a avaliação de atributos é muito interpretativa e a qualidade da avaliação fica a cargo da experiência e habilidades do avaliador. A fim de analisar a confiabilidade das medidas obtidas, foi realizada uma análise de concordância de atributos.

O Minitab® possui uma ferramenta de análise de concordância, o qual visa avaliar o quanto os avaliadores concordam consigo mesmo, o quanto eles concordam entre si e com padrões estabelecidos (Minitab, LLC, 2021).

Uma das ferramentas utilizadas para fazer a análise de concordância é o Kappa Cohen. Segundo Sim e Wright (2005) o kappa é uma medida de acordo verdadeiro, onde além de considerar a porcentagem de vezes em que dois ou mais avaliadores concordaram entre eles, ainda, desconta a probabilidade desta concordância ter acontecido ao acaso. Esta consideração é demonstrada na equação 11.

$$K = \frac{\text{Concordância observada} - \text{concordância ao acaso}}{1 - \text{concordância ao acaso}} \quad (11)$$

Os valores do coeficiente de concordância Kappa varia entre -1 a +1. Quanto mais próximo de +1, melhor é a concordância avaliada (Minitab, LLC, 2021).

- Quando $K = 1$; Concordância perfeita
- Quando $K = 0$; A concordância é a mesma que seria esperado ao acaso.
- Quando $K < 0$; A concordância é mais fraca do que o esperado ao acaso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados da taxa de remoção de material e discutida a comparação entre a taxa de remoção de material teórica estimada. Na sequência são analisados os dados coletados e a linearidade dos dados contínuos de Q. Após tratamento dos dados, são avaliados os resultados da análise de delineamento de experimentos para as variáveis resposta taxa de remoção de material e ruído gerado pelo desbaste. Ainda, é discutida uma discussão sobre a influência dos fatores de profundidade de corte a_p e a diferença da influência do fator avanço de corte f_z quando comparado com os valores estimados de contribuição de variância. Uma análise da concordância dos dados obtidos de ruído é complementarmente adicionado à discussão. Por fim, completando este capítulo, são apresentados resultados e discussões sobre os valores dos fatores obtidos após otimização de respostas executado pelo *Software Minitab*[®].

4.1 COLETA DE DADOS NA EXPERIMENTAÇÃO

Após execução das 16 rodadas do experimento, obteve-se o tempo de duração do desbaste, e com este valor, foi calculado o valor da taxa de remoção de material. Este valor é obtido através da razão entre o valor fixo de volume a ser removido e o tempo medido pelo cronômetro do comando da máquina. A contagem do tempo de desbaste é iniciado no momento em que é dado início ao programa NC e finalizado quando é lido o comando de finalização do programa.

Ressalta-se que, com o intuito de manter maior estabilidade do processo, os valores dos potenciômetros de avanço em mm/min e de rotação do eixo árvore em rpm, durante todo o período experimental permaneceram em 100%. A taxa de remoção de material obtida pelo experimento foi chamada de Q experimental e é apresentada na Tabela 6. Observa-se que foi possível obter uma variação de Q experimental de 75230,8mm³/min até 186341,4mm³/min.

Quando comparados os valores da taxa de remoção de material experimental com os valores teóricos, nota-se uma diferença entre os dois números. Para a predição de Q teórico era esperado uma variação de 119366,2mm³/min até

429718,3mm³/min, o que aponta um intervalo de medidas menores do que o esperado.

Tabela 6 - Dados do experimento para Q

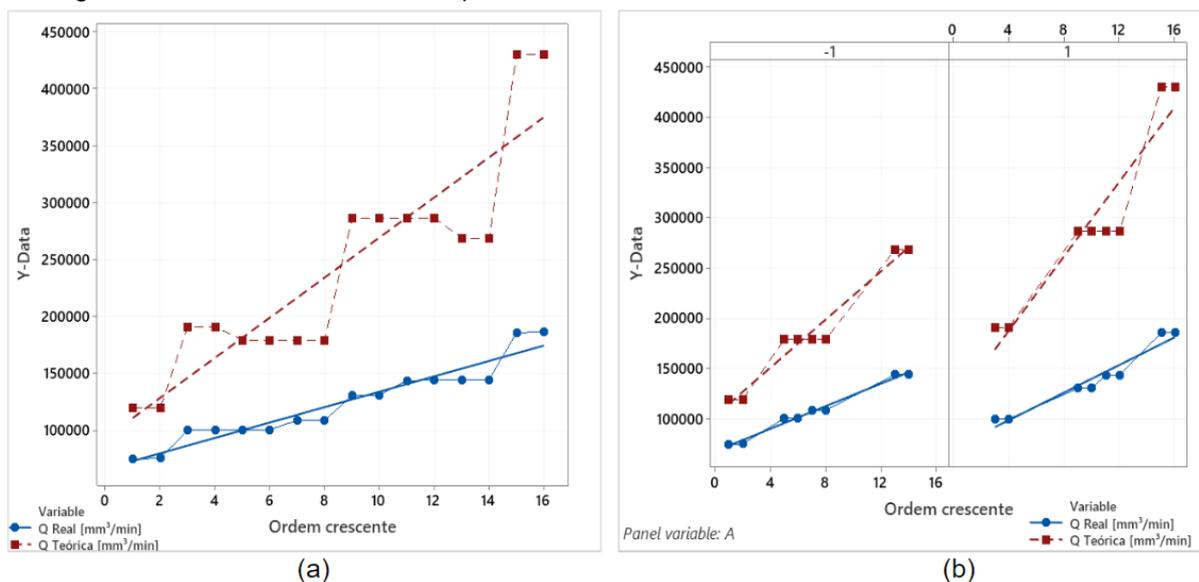
Std Order	Run Order	A (f_z)	B (a_p)	C (a_e)	Tempo [min]	Q Exp. [mm ³ /min]	Q Teórico [mm ³ /min]	Erro %
7	1	0,5	15	6	13,033	144406,4	268574,0	53,77%
12	2	0,8	15	4	13,083	143854,5	286478,9	50,21%
4	3	0,8	15	4	13,1	143667,8	286478,9	50,15%
16	4	0,8	15	6	10,133	185734,6	429718,3	43,22%
2	5	0,8	10	4	18,783	100199,5	190985,9	52,46%
14	6	0,8	10	6	14,417	130543,7	286478,9	45,57%
1	7	0,5	10	4	25,017	75230,8	119366,2	63,03%
15	8	0,5	15	6	13,05	144218,3	268574,0	53,70%
11	9	0,5	15	4	17,333	108581,8	179049,3	60,64%
10	10	0,8	10	4	18,8	100108,9	190985,9	52,42%
9	11	0,5	10	4	24,967	75381,4	119366,2	63,15%
13	12	0,5	10	6	18,7	100644,3	179049,3	56,21%
3	13	0,5	15	4	17,3	108788,9	179049,3	60,76%
6	14	0,8	10	6	14,367	130998,0	286478,9	45,73%
8	15	0,8	15	6	10,1	186341,4	429718,3	43,36%
5	16	0,5	10	6	18,7	100644,3	179049,3	56,21%

Fonte: Próprio autor

As discrepâncias entre os valores teóricos e práticos ficam ainda mais evidentes quando plotados no gráfico da Figura 20 com os dados de Q experimental ordenados de forma crescente. No item a da figura 20 estão plotados os dados das 16 rodadas, ficando nítido que nenhum dos resultados ficou próximo do resultado teórico. Ainda, nota-se que conforme as medidas vão crescendo, as diferenças entre o Q experimental e o Q teórico vão aumentando. A linha tracejada vermelha e a linha azul são linhas de tendência, e facilitam a visualização deste aumento significativo das diferenças. No item b da Figura 20 são os dados referentes ao fator A avanço de corte f_z , no primeiro quadro são as taxas relacionadas ao nível -1 do f_z que é 0,5mm/aresta, e o segundo quadro mostra as medidas tomadas quando o

nível do fator f_z é +1 referente ao valor de 0,8mm/aresta. Através das linhas de tendência, observa-se que quando o f_z é aumentado, as taxas de remoção de material não são tão maiores quanto teoricamente deveriam ser.

Figura 20: Gráfico dos dados Q experimental versus Q teórico ordenados de forma crescente



Fonte: Próprio autor

Para Pyzdek e Keller (2010) algumas variáveis inerentes ao processo podem implicitamente manifestar-se e influenciar os resultados de resposta. Helleno e Schutzer (2003) através de estudos práticos, evidenciaram o comportamento da velocidade de avanço real em função do aumento da velocidade de avanço programada, para o avanço programado de 1000mm/min, a velocidade de avanço real se mantinha constante ao longo do modelo matemático. Entretanto, à medida que o avanço programado era aumentado, as variações de avanço programado se acentuavam. Monaro (2011) conclui que o comportamento dinâmico da máquina ferramenta tem influência direta no tempo de execução da usinagem, sendo aceleração, desaceleração, inclinação no segmento da trajetória, fatores que afetam diretamente a eficiência da predição teórica dos tempos de usinagem. Logo, entende-se que pela geometria matemática da peça proposta para o estudo, e pelos limitantes dinâmicos da máquina ferramenta, a medida que aumenta-se o fator avanço de corte, e conseqüentemente, a velocidade de avanço programado a eficiência da remoção de material diminui.

O procedimento de transformação dos atributos, OK e NOK, classificados para a variável resposta ruído, conforme mencionado no capítulo 3, foram através da conversão de classificações OK para o valor 1 e NOK para o valor 0 (zero). Na sequência, calculou-se a média das cinco avaliações a fim de transformar em dados discretos, para por fim, tornar possível a análise do DOE.

Na Tabela 7 são apresentados as classificações feitas por cada avaliador para o Y usinabilidade de cada uma das amostras rodadas.

Tabela 7 - Dados do experimento para ruído

Std Order	Run Order	Fatores			Avaliadores					Média
		A (f_z)	B (a_p)	C (a_e)	A	B	C	D	E	
7	1	0,5	15	6	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	0
12	2	0,8	15	4	OK	NOK	OK	OK	NOK	0,6
4	3	0,8	15	4	OK	NOK	OK	OK	NOK	0,6
16	4	0,8	15	6	NOK	OK	NOK	OK	NOK	0,4
2	5	0,8	10	4	OK	OK	OK	OK	OK	1
14	6	0,8	10	6	OK	OK	OK	OK	NOK	0,8
1	7	0,5	10	4	OK	OK	OK	OK	OK	1
15	8	0,5	15	6	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	0
11	9	0,5	15	4	NOK	NOK	OK	OK	NOK	0,4
10	10	0,8	10	4	OK	OK	OK	OK	OK	1
9	11	0,5	10	4	OK	OK	OK	OK	OK	1
13	12	0,5	10	6	NOK	NOK	OK	NOK	OK	0,4
3	13	0,5	15	4	NOK	NOK	OK	OK	NOK	0,4
6	14	0,8	10	6	OK	OK	OK	OK	OK	1
8	15	0,8	15	6	NOK	NOK	OK	OK	NOK	0,4
5	16	0,5	10	6	OK	NOK	NOK	OK	OK	0,6

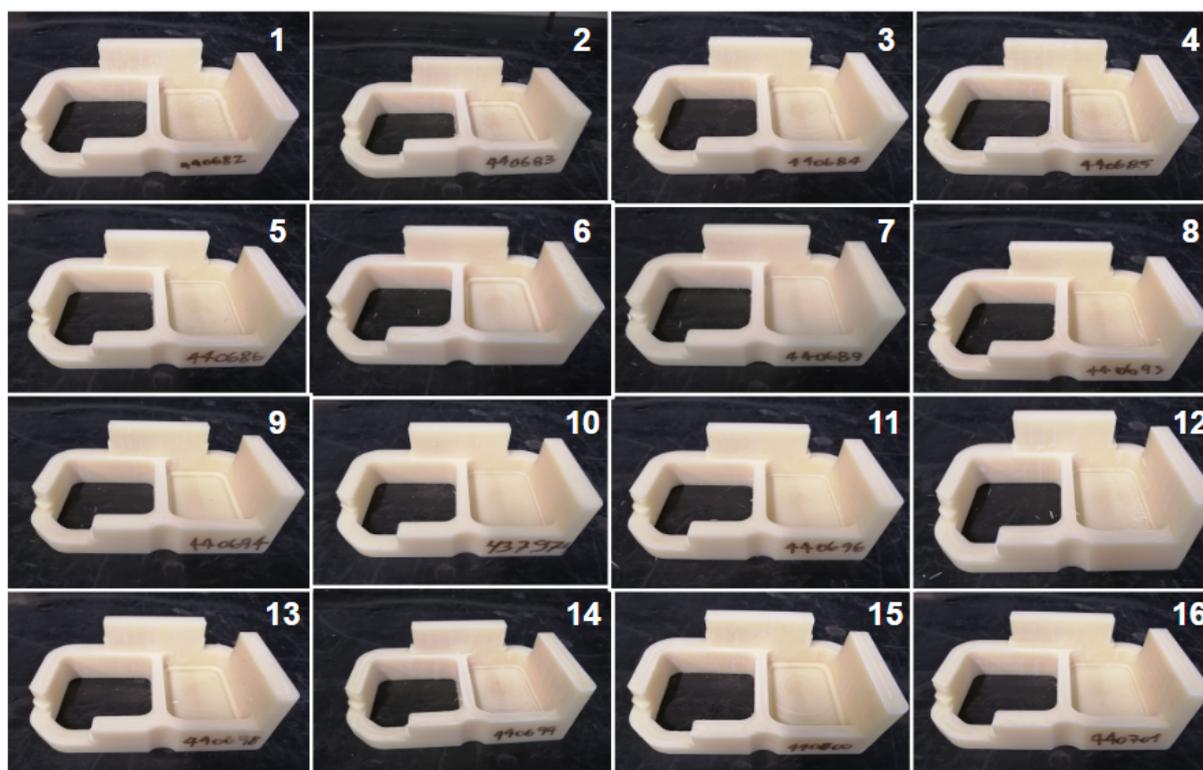
Fonte: Próprio autor

Conforme esperado, atingiu-se valores entre 1 e 0, sendo que valores mais próximos de 1 são valores considerados com pouco ruído indesejado na usinagem de desbaste, e valores próximos de 0 entende-se como sendo usinagens com ruídos desagradáveis, anormais ao processo e que indicam o emprego de condições de parâmetros equivocados. Ressalta-se ainda, que cinco avaliadores realizaram a

classificação das amostras através de mídia de áudio e vídeo, o volume empregado e o posicionamento dos avaliadores frente ao televisor manteve-se constante.

Na Figura 21 estão as fotos das amostras executadas durante o período experimental. As amostras estão ordenadas conforme coluna *Run Order* da Tabela 7.

Figura 21 - Fotos das amostras



Fonte: Próprio autor

Durante a usinagem das amostras, nenhuma eventual intercorrência sucedeu-se, sendo possível obter todas as respostas desejadas sem a necessidade de repetir nenhuma rodada. Este fato também favorece o emprego dos parâmetros escolhidos, diminuindo a chance de algum evento não desejado acontecer depois da otimização dos fatores.

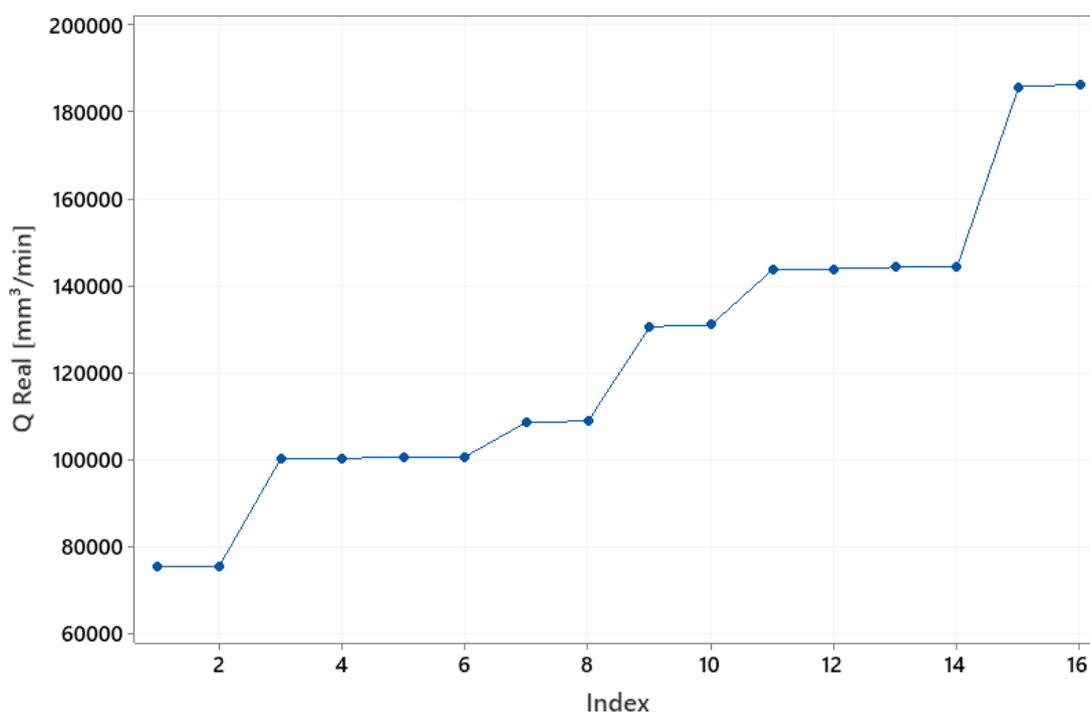
4.2 ANÁLISE DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Neste tópico serão analisados os resultados gerados pelo *software* Minitab®, através dos valores das variáveis respostas obtidas no experimento planejado.

4.2.1 Avaliação dos resultados para taxa de remoção de material

Quando os dados do Y tempo são ordenados do menor para o maior, conforme Figura 22, é possível observar, nos dados plotados, se há alguma discrepância muito grande entre uma medida e outra. Este processo se faz importante para que, se necessário, aplicar um tratamento de transformação nos dados, a fim de melhorar a qualidade da análise.

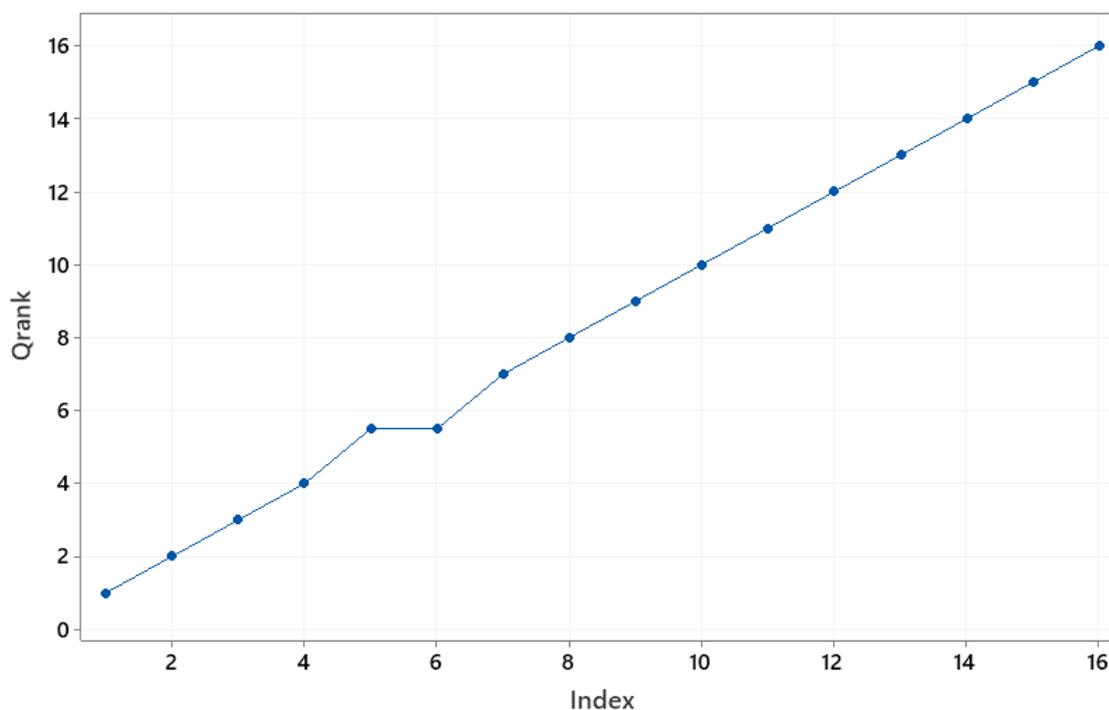
Figura 22 - Plotagem dos dados puros do tempo



Fonte: Próprio autor

Em alguns pontos do gráfico, nota-se as aparentes discrepâncias entre medidas, principalmente nos últimos dois pontos. Portanto, foi aplicado um tratamento de ranqueamento nos dados, através da ferramenta de *rank order* do Minitab®. O resultado ranqueado é apresentado na Figura 23 onde pode ser observada uma melhora significativa na linearidade dos dados..

Figura 23 - Plotagem dos dados ranqueados do tempo



Fonte: Próprio autor

Com a linearidade dos dados verificada, foi possível realizar a análise do DOE pelo Minitab®. Ainda, foi considerado um intervalo de confiabilidade de 95%, e com isso, obteve-se os valores de contribuição da variância para cada componente, de acordo com a Tabela 8 adaptada do Minitab®.

Observa-se, com os resultados do ANOVA, que mais da metade da variação advém dos efeitos produzidos pelo fator B, profundidade de corte (a_p), que possui o nível -1 um valor de 10 milímetros e no nível +1 um valor de 15 milímetros. Na sequência, nota-se que o fator C, penetração de trabalho (a_e), vem logo atrás com quase 30% de contribuição nos resultados da variável resposta. E por fim, o fator A, avanço por aresta (f_z), mostrou-se ser o fator que menos impacta a variável taxa de remoção de material, porém, ainda assim tendo 10% de contribuição nos resultados gerados.

Além da contribuição dos fatores, foram apresentados os efeitos das interações de segunda ordem e de terceira ordem. Entretanto, as interações de segunda ordem se mostraram nulas, e o de terceira ordem teve uma contribuição bastante baixa, de pouco mais de 1%. A baixa contribuição das interações é benéfica, uma vez que,

quando um dos fatores é alterado, os outros fatores não serão fortemente impactados por esta mudança.

Tabela 8 - ANOVA da variável resposta Q

Fonte	Grau de liberdade	Contribuição
Modelo	7	98,97%
Linear	3	97,79%
A	1	10,60%
B	1	57,73%
C	1	29,46%
Interações de 2 saídas	3	0,00%
A*B	1	0,00%
A*C	1	0,00%
B*C	1	0,00%
Interações de 3 saídas	1	1,18%
A*B*C	1	1,18%
Erro	8	1,03%
Total	15	100,00%

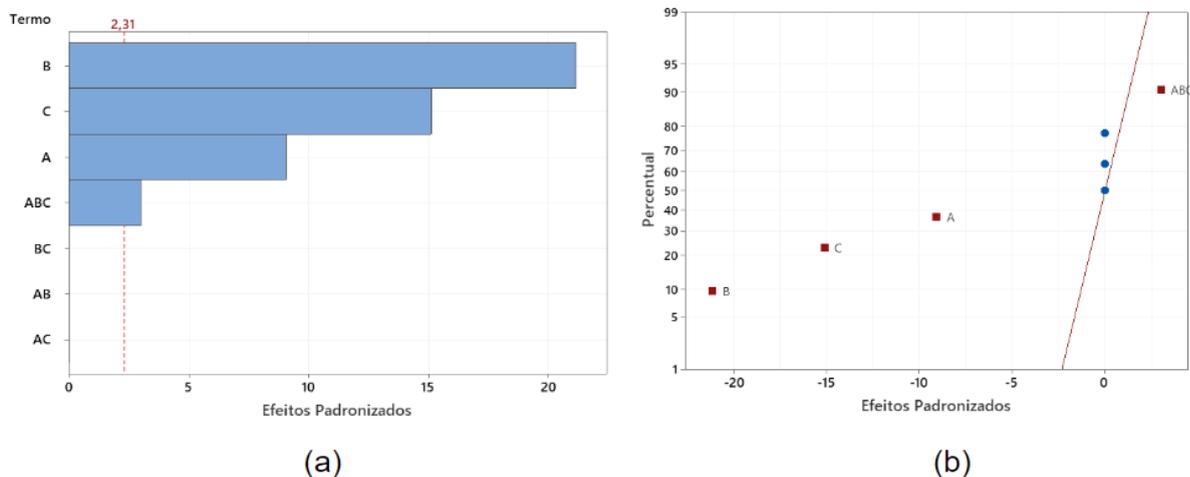
Fonte: Próprio autor

Se tratando de um experimento com réplica, agrega-se graus de liberdade ao erro, e para este modelo, a contribuição do erro foi de quase 1%, o que significa que muito pouca variação não é explicada com o modelo acima experimentado.

Os resultados obtidos com o ANOVA são confirmados quando observado o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados e o gráfico de probabilidade normal na Figura 24. A ultrapassagem das barras que representam os efeitos dos fatores B, C e A, profundidade de corte, penetração de trabalho e avanço de corte, respectivamente, da linha tracejada, representa a magnitude da significância de cada um dos efeitos, sendo o α_p o mais significativo, conforme observado no item a da Figura 24. No item b, os efeitos próximos a linha não são significantes, uma vez

que estão dentro de uma distribuição normal, porém os demais que destoam desta linha mostram sua significância.

Figura 24 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados e de probabilidade normal para rank do Q



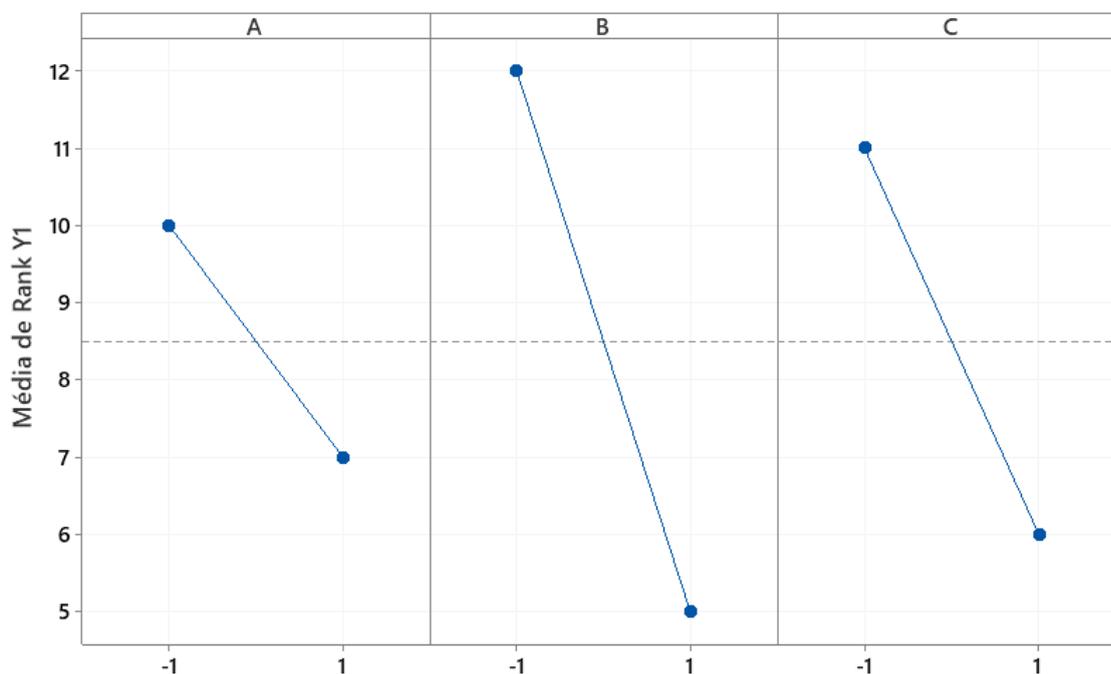
Fonte: Próprio autor

O fator A, de acordo com a previsão teórica mencionada no capítulo 3 deveria representar a maior fração de influência. Entretanto, conforme discutido no tópico anterior, devido a limitações dinâmicas da máquina ferramenta, apresentou uma influência inferior aos outros dois fatores estudados.

Ainda, como recurso de avaliação gráfica, é possível avaliar o impacto dos efeitos de cada fator através do gráfico dos efeitos principais, o qual, por meio da inclinação da reta, é revelado a magnitude de cada efeito. Este gráfico pode ser observado na Figura 25, onde traz o fator a_p predominantemente maior do que os outros dois fatores.

Assim como o fator A avanço por aresta, os fatores B e C também têm relação direta com a taxa de remoção de material, logo, quanto maior for o valor destes, maior será a variável resposta Q. No entanto, ao contrário do fator A, aparentemente estes fatores não possuem grande influência pelos limitantes dinâmicos da máquina ferramenta. Shinge e Dabade (2018) encontraram resultado congruente com o obtido neste estudo, evidenciando a influência dos parâmetros de processo, sendo a profundidade de corte com maior contribuição na medição da taxa de remoção de material para usinagem de canais de alumínio 6360 T6.

Figura 25 - Gráfico dos efeitos principais para o Q
Médias Ajustadas



Fonte: Próprio autor

Silva et al. (2011) discutem sobre a quantidade de linhas geradas na programação NC pelo *software* de manufatura auxiliada por computador (CAM), em função da escolha de profundidade de corte, penetração de trabalho e o tipo de percurso. Logo, associa-se a influência dos dois incrementos com a relação da geometria da peça estudada.

Os cálculos gerados pelo Minitab® ainda trazem um resumo sobre o modelo gerado. O que evidencia a qualidade do modelo, esta análise de qualidade é possível através dos valores de r^2 e $r^2_{ajustado}$, explicitados na tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Valores de r^2 e $r^2_{ajustado}$ para o modelo do Q

r^2	$r^2_{ajustado}$
98,97%	98,07%

Fonte: Próprio autor

O valor r^2 significa que 98,97% de toda a variação do modelo pode ser explicada pelos fatores do modelo, as variáveis independentes. E o fato do valor de $r^2_{ajustado}$

ser muito próximo de r^2 indica que, mesmo contendo todos os componentes que há dentro do modelo, a qualidade do modelo permanece muito alta.

Finalmente, o Minitab® apresenta o modelo de regressão, amparado pelos efeitos dos fatores escolhidos. Para calcular a equação de regressão, é necessário utilizar os dados puros do experimento. Este modelo de regressão é apresentado na equação 8 a seguir.

$$\begin{aligned} \text{tempo} = & 16,3052 - 2,20731 A - 2,91369 B - 2,24269 C + \\ & 0,41981 A * B + 0,39906 A * C + 0,43019 B * C - 0,07406 A * B * C \quad (12) \end{aligned}$$

A equação de regressão é comumente utilizada para prever a variável resposta, uma vez que se tem os valores das variáveis independente. Entretanto, neste trabalho, o intuito é descobrir a melhor combinação das variáveis independentes, a fim de obter o menor tempo possível, mantendo a qualidade da usinagem. Portanto, a equação de regressão se faz necessária, uma vez que a ferramenta de otimização de respostas demanda modelos de regressões previamente analisados.

4.2.1 Avaliação dos resultados para o ruído gerado pela usinagem

Os dados da variável resposta de ruído são dados discretos e não contínuos, isso quer dizer que possuem um intervalo finito de valores. Logo, a análise do delineamento do experimento foi feita com as médias integrais, sem nenhum tipo de tratamento.

Da mesma forma que a taxa de remoção de material, foi utilizado um intervalo de confiabilidade de 95%, assim, é apresentado a seguir na tabela 10, o cálculo da contribuição de variância de cada componente, através da ferramenta ANOVA.

De forma semelhante ao ANOVA para o Q, obteve-se a mesma sequência de grandeza de contribuição para cada fator. Mais da metade da variação advém dos efeitos produzidos pelo fator B, profundidade de corte (a_p), na sequência, o fator C, penetração de trabalho (a_e), e por último o fator A, avanço por aresta (f_z).

Tabela 10 - ANOVA da variável resposta ruído

Fonte	Grau de liberdade	Contribuição
Modelo	7	97,73%
Linear	3	91,48%
A	1	14,20%
B	1	56,82%
C	1	20,45%
Interações de 2 saídas	3	5,68%
A*B	1	0,57%
A*C	1	5,11%
B*C	1	0,00%
Interações de 3 saídas	1	0,57%
A*B*C	1	0,57%
Erro	8	2,27%
Total	15	100,00%

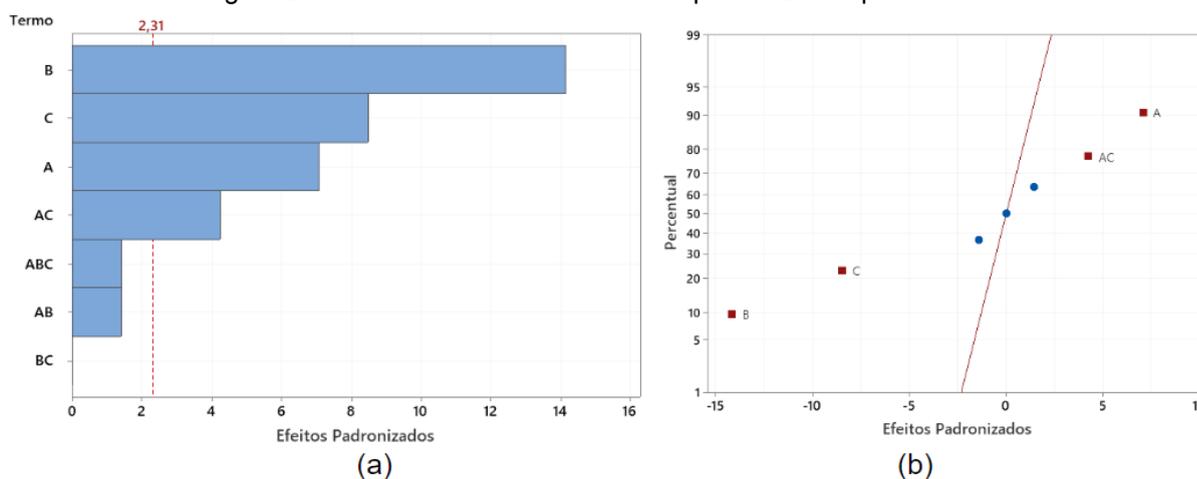
Fonte: Próprio autor

A interação entre os fatores A (f_z) e C (a_e) revelou-se ser a interação com maior contribuição. Apenas com este resultado de contribuição do ANOVA não se pode concluir que esta contribuição é significativa ou não. Para isso é necessário analisar o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados e verificar se o fator ultrapassou a linha de significância.

Conforme explanado anteriormente, foi executado um experimento com réplica, e por conta disso, é agregado graus de liberdade ao erro. Para a análise do modelo do ruído, a contribuição do erro foi de 2,27%, o que significa que muito pouca variação não é explicada com o modelo acima experimentado.

Se faz necessário a análise gráfica, a fim de verificar a significância, tanto prática quanto estatística, das variâncias obtidas pelo método ANOVA. A seguir é apresentado gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na Figura 26 onde é avaliado a ultrapassagem das barras dos efeitos sobre a linha tracejada, indicando significância, sendo os efeitos dos fatores B, C e A com maior magnitude.

Figura 26 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o ruído

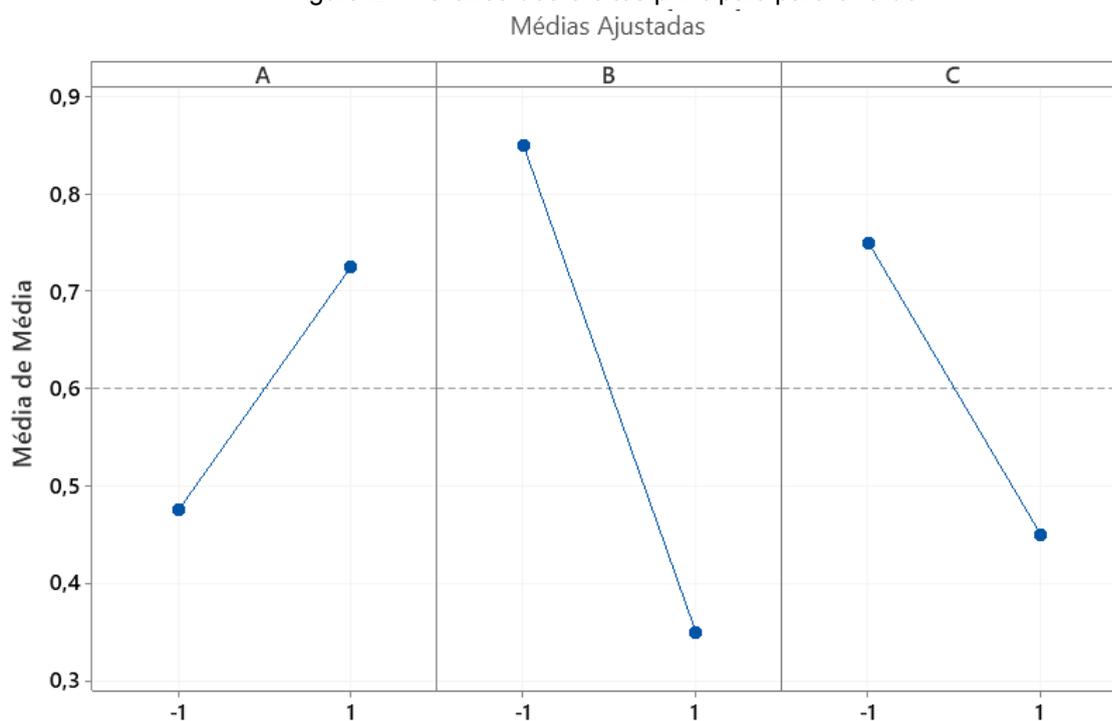


Fonte: Próprio autor

O gráfico de probabilidade normal apresentado no item b da Figura 26 confirma que os efeitos dos fatores mencionados destoam bastante do que seria considerado uma distribuição normal, o que confirma a significância estatística atrelada aos fatores em relação à avaliação do ruído emitido pela usinagem.

A Figura 27, apresenta o gráfico dos efeitos principais onde novamente, assim como para a taxa de remoção de material, o fator a_p é predominantemente mais influente.

Figura 27 - Gráfico dos efeitos principais para o ruído



Fonte: Próprio autor

Por meio da inclinação da reta, é revelado a magnitude de cada efeito. Sendo que a inclinação da reta do fator A indica que o ruído gerado pela usinagem melhora à medida que muda-se do nível -1 para o +1. Todavia, o efeito se mostra inverso, quando observado os outros dois fatores que diminuem à medida que o nível aumenta.

Santos (2017), em um estudo qualitativo de vibrações, constatou a influência que o impacto do avanço de corte (f_z) nas forças de usinagem é indiferente. Reforçando o resultado constatado do efeito ser positivo quanto ao ruído emitido de acordo com a mudança de nível de f_z .

Segundo Lima et al. (2012) a profundidade de corte tem relação direta com a pressão específica e conseqüentemente com as forças de corte envolvidas com a usinagem. Apesar de tratar-se de um material polimérico, em função da altura elevada de 160 milímetros para fora do cone, os ruídos experienciados indicam ter relação com a deflexão excessiva da ferramenta, de acordo com Bauco (2003) as deflexões comprometem a tolerância dimensional e podem gerar vibrações elevadas.

O resumo sobre o modelo gerado, o qual é avaliado a qualidade do modelo, é explicitado a seguir na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de r^2 e $r^2_{ajustado}$ para o modelo do ruído

r^2	$r^2_{ajustado}$
97,73%	95,74%

Fonte: Próprio autor

O valor r^2 significa que 97,73% de toda a variação do modelo pode ser explicada pelos fatores do modelo, as variáveis independentes. E da mesma maneira que ocorreu com a análise da taxa de remoção, o valor de $r^2_{ajustado}$ foi muito próximo de r^2 o que sugere que, mesmo com muitos componentes integrando o modelo, a qualidade do modelo permanece muito alta.

Em fim, apresenta-se o modelo de regressão na equação 13 a seguir.

$$Média = 0,6000 + 0,1250 A - 0,2500 B - 0,1500 C + 0,0250 A * B + 0,0750 A * C - 0,0000 B * C - 0,0250 A * B * C \quad (13)$$

Reitera-se, que o armazenamento da equação de regressão é necessária para alcançar o objetivo proposto, através da utilização da ferramenta de otimização de resposta, recurso oferecido pelo *software* Minitab®.

4.3 Análise de concordância dos avaliadores

O tópico a seguir discorre da avaliação de concordância dos avaliadores que avaliaram o ruído gerado pela usinagem das amostras do experimento. A avaliação foi realizada com base na percepção sonora e os cinco avaliadores classificaram as o ruído das amostras entre “OK” e “NOK”, de acordo com padrão explicitado no capítulo 3.

Primeiramente, foi avaliado a concordância dos avaliadores com eles mesmos, ou seja, deseja-se saber se, quando avaliado duas ou mais vezes, o avaliador avalia a mesma amostra da mesma forma.

A Tabela 12 aponta que de oito oportunidades, quatro avaliadores concordaram consigo mesmo sete vezes e um avaliador concordou consigo mesmo seis vezes, assim se deu às porcentagens de concordância.

Tabela 12 - Avaliação de concordância dentro de avaliador

Avaliador	Inspecionado	Correspondido	Porcentagem
Avaliador A	8	7	87,50%
Avaliador B	8	7	87,50%
Avaliador C	8	6	75,00%
Avaliador D	8	7	87,50%
Avaliador E	8	7	87,50%

Fonte: Próprio autor

Contudo, a porcentagem sozinha ignora a chance das correspondências terem acontecido ao acaso, por isso se faz necessário descontar a probabilidade de chance através do cálculo do coeficiente de concordância Kappa.

Conforme observado na Tabela 13, três avaliadores alcançaram um Kappa de 0,75 e dois dos avaliadores obtiveram Kappa de 0,33 e 0,58. Atingiu-se, portanto, um Kappa global de 0,63 nesta primeira avaliação.

Tabela 13 - Kappa dentro de cada avaliador

Avaliador	Resposta	Kappa
Avaliador A	OK	0,746032
	NOK	0,746032
Avaliador B	OK	0,746032
	NOK	0,746032
Avaliador C	OK	0,333333
	NOK	0,333333
Avaliador D	OK	0,589744
	NOK	0,589744
Avaliador E	OK	0,746032
	NOK	0,746032

Fonte: Próprio Autor

Na sequência, foi avaliada a concordância entre os avaliadores. Nesta avaliação é desejado saber a quantidade de vezes que os avaliadores concordam uns com os outros quando avaliada a mesma amostra.

No experimento realizado, em oito oportunidades de todos os avaliadores classificarem a mesma amostra da mesma forma, três vezes a fizeram. O que resulta em uma porcentagem de 37,5% de concordância.

O Kappa então foi calculado e os valores atingidos são demonstrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Kappa entre avaliadores

Resposta	Kappa
OK	0,386574
NOK	0,386574

Fonte: Próprio Autor

Este valor do Kappa sugere que a concordância entre os avaliadores foi acima da concordância ao acaso. Visto que, de acordo com Minitab, LLC (2021), Kappa com valores de -1 indica que não houve concordância, Kappa com valores de 0 indicam concordância ao acaso.

4.4 OTIMIZAÇÃO DAS RESPOSTAS OBTIDAS

Com as análises para as duas variáveis resposta, taxa de remoção de material e ruído gerado pela usinagem, analisadas no Minitab®, o *software* armazena os modelos previamente estudados e disponibiliza para utilização dos mesmos para realizar a otimização das respostas.

É exibido pelo *software* as opções de otimização para cada modelo arquivado, são elas: Valor alvo, maximizar, minimizar e não otimizar.

Para a variável resposta à taxa de remoção de material, é desejado obter a maior taxa Q de desgaste possível, portanto, foi escolhido maximizar a resposta. Para a variável resposta ruído, é desejado manter o ruído emitido pela usinagem em um nível agradável de acordo com a classificação apresentada. Em vista disto, foi estabelecido como objetivo maximizar o valor de ruído, lembrando que o valor 1 significa ruídos classificados como OK e 0 (zero) como ruídos não desejados, anormais no processo (NOK).

Uma vez estabelecidos os objetivos de otimização, o *software* Minitab® retorna os valores dos fatores para obtenção dos objetivos requeridos e a consequente predição de resultado para cada um dos modelos adicionados a otimização. A Tabela 15 mostra os valores retornados.

Tabela 15 - Configuração de parâmetros depois de otimizado

Variáveis	Configuração	Parâmetros corrigidos
A	1	0,8
B	-0,616162	10,95
C	1	6

Fonte: Próprio autor

De acordo com os objetivos selecionados para a otimização, foi obtida uma configuração de parâmetros que resultam em 10,65 (posição no *rank*). Esta solução não é o Q, é a colocação de ranqueamento estudado no modelo, o que pode ser estimado através do *rank* dez da tabela 16.

Tabela 16 - Ranqueamento dos Q real

StdOrder	RunOrder	A	B	C	Q Exp. [mm ³ /min]	Rank
7	1	0,5	15	6	144406,4	14
12	2	0,8	15	4	143854,5	12
4	3	0,8	15	4	143667,8	11
16	4	0,8	15	6	185734,6	15
2	5	0,8	10	4	100199,5	4
14	6	0,8	10	6	130543,7	9
1	7	0,5	10	4	75230,8	1
15	8	0,5	15	6	144218,3	13
11	9	0,5	15	4	108581,8	7
10	10	0,8	10	4	100108,9	3
9	11	0,5	10	4	75381,4	2
13	12	0,5	10	6	100644,3	5,5
3	13	0,5	15	4	108788,9	8
6	14	0,8	10	6	130998,0	10
8	15	0,8	15	6	186341,4	16
5	16	0,5	10	6	100644,3	5,5

Fonte: Próprio autor

Por comparação, é esperado um resultado entre $130998\text{mm}^3/\text{min}$, referente ao *rank* dez, e $143667,8\text{mm}^3/\text{min}$, referente ao *rank* onze. Para a variável resposta ruído, foi obtido uma solução de 0,804. Estes valores são referentes a configuração de parâmetro sugerida pelo otimizador de respostas que são, 0,8 milímetros para avanço por aresta (f_z), 10,95 milímetros para a profundidade de corte (a_p) e 6 milímetros para a penetração de trabalho (a_e).

A fim de validar a qualidade da otimização e a precisão da predição realizada pelo Minitab®, foi rodada a mesma peça com a configuração de parâmetros sugeridos pela otimização. E o tempo final de desbaste foi de 13,62 minutos, o que representa um valor de $138182,8\text{mm}^3/\text{min}$ de taxa de remoção de material.

Considerando que a mesma peça com os parâmetros convencionais demorava cerca de 66 minutos para ser finalizada, resultando em uma taxa Q de $28515,9\text{mm}^3/\text{min}$. A otimização multi-resposta de parâmetros executada através das análise de delineamento de experimentos, oportunizou um aumento de 384,6% na taxa de remoção de material.

5 CONCLUSÕES

Através da experimentação realizada e a utilização das ferramentas de seis sigma, delineamento de experimentos, diagrama de relação de fatores, análise concordância de atributos e coeficiente de determinação, foi possível atestar a obtenção de resultados sólidos o bastante para afirmar que os conceitos de corte de alta performance foram aplicados quando realizado usinagem de desbaste em peças de ABS.

Tanto para a análise da variável resposta Q quanto para o ruído, a ordem de magnitude dos efeitos significantes foram do fator B profundidade de corte (a_p), fator C penetração de trabalho (a_e) e fator A avanço por aresta (f_z). Sendo que o fator B foi predominantemente mais significativo do que os efeitos dos outros fatores devido estar diretamente relacionado à equação da taxa de remoção de material, este é responsável pela maior fração de aumento da taxa Q. Entretanto, sugere-se que a deflexão gerada pelo alto aporte de profundidade de corte e demasiada altura da ferramenta, indica impacto na vibração e nas forças de corte, consequentemente impactando no ruído anormal do processo de usinagem.

Quando observado o gráfico dos efeitos principais, o fator A (f_z), para variável Q, diminuiu o valor da variável resposta à medida que o nível mudava do -1 para o +1, porém, foi bem menos significativo do que o esperado, apresentando incompatibilidade com os valores teóricos previstos, isto devido às limitações dinâmicas da máquina ferramenta, como aceleração e desaceleração. E para variável ruído, o fator A (f_z) aumentava a variável resposta à medida que o nível mudava do -1 para o +1, indicando que o avanço por aresta não tem influência negativa no ruído, pelo contrário, ajuda a minimizá-lo.

Utilizando o otimizador de resposta, para os modelos estudados, a configuração de parâmetros mais adequada, quando o objetivo foi maximizar a resposta de taxa de remoção de material e maximizar a variável resposta ruído, foi obtida quando o avanço de corte f_z é 0,8 milímetros, o incremento de profundidade a_p é 10,95 milímetros e o incremento lateral a_e é 6 milímetros. Desta forma, quando estes valores são alinhados com uma velocidade de corte de 300m/min, sentido de corte *zigzag* e tipo de corte em *constant load* pode ser padronizado uma

configuração de parâmetros que garantirá, dentro dos níveis estudados para cada fator, a maior taxa de remoção de cavaco possível. A peça teve 13,62 minutos de duração de desbaste após utilização dos parâmetros otimizados, e obteve uma taxa de remoção de material de $138182,8\text{mm}^3/\text{min}$, evidenciando um aumento de 384,6% devido à otimização de multi-respostas.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Transladar para mais o intervalo estudado nos níveis do fator A (avanço por aresta), uma vez que seu valor em +1 se mostrou favorável para ambas variáveis resposta. E ainda, diminuir o valor do nível +1 do fator B (incremento de profundidade).

- Metodologia de avaliação de avaliadores utilizando ICC (Coeficiente de correlação intraclasse) e ainda melhorar a definição da escala de pontuação, visando melhorar a concordância dos avaliadores.

- Replicar o estudo alterando o material da peça estudada.

- Utilização de uma metodologia de medição de força de corte gerada pela usinagem como variável resposta.

- Otimização de parâmetros para uma melhor qualidade superficial no processo de acabamento de peças metálicas.

REFERÊNCIAS

ALBIERO, Daniel et al. **Gráficos de probabilidade normal para avaliação de mecanismos de distribuição de sementes em semeadoras**. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 2012, n. 332, p. 507-518, abr. 2012. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744112008>. Acesso em: 21 jun. 2022.

ALLEN, Theodore T. **Introduction to Engineering Statistics and Lean Six Sigma: statistical quality control and design of experiments and systems**. 3. ed. Ohio: Springer, 2019.

BAUCO, Silvio Antonio. High Speed machining na Indústria de Moldes e Matrizes. In: ÉRICA, Editora *et al* (ed.). **Usinagem em Altíssimas Velocidades: Parâmetros que influenciam no processo de Usinagem HSM**. São Paulo: Editora Érica, 2003. Cap. 8. p. 115-117.

BOX, George; FUNG, Conrad A.. **Quality quandaries: the importance of data transformation in designed experiments for life testing**. Quality Engineering. London, p. 625-638. mar. 2007.

BUREK, Jan et al. **The influence of the cutting edge shape on high performance cutting**. Aircraft Engineering And Aerospace Technology. Rzeszow, p. 134-145. out. 2018.

CIRP, 2014, Paris. **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. Paris, Fr: Springer, 2014.

CHEIN, Flávia. **Introdução aos modelos de regressão linear**. Brasília: Enap, 2019.

CZITROM, Veronica. **One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments**. The American Statistician. Riverside, p. 126-131. maio 1999.

DENKANA, B. et al. **Hybrid spindle - An approach for a milling machine tool spindle with extended working range for HSC and HPC.** In: 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM-INTEGRATED INTELLIGENCE, 4., 2018, Hannover. Procedia Manufacturing. Hannover: Elsevier, 2018. p. 159-165.

DING, Feng et al. **High Performance Cutting of Zr based bulk metallic glass: a review of chip formation.** In: 8TH CIRP CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE CUTTING (HPC 2018), 8., 2018, Guangzhou. Annals of CIRP. Guangzhou: Elsevier, 2018. p. 421-424.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** São Paulo, Artliber, 2000.

FERNANDES, Marcello Oliver et al. **Usinagem de plásticos de engenharia. Uma opção de processamento.** 2007, Anais.. São Carlos: ABpol, 2007. . Acesso em: 27 jun. 2022.

FINK, Johannes Karl. **Handbook of Engineering and Speciality Thermoplastics: volume 2 water soluble polymers.** Salem: Scrivener Publishing Llc, 2011.

FLOM, D. G.; KOMANDURI, R. High Speed machining. In: DAVIS, J.R. (Ed.). **Metals handbook: machining.** 9. ed. Ohio, USA: ASM, 1989. v. 16. p. 597-606.

GEORGE, Michael L; ROWLANDS, David; PRICE, Mark; MAXEY, John. **The Lean Six Sigma Pocket Toolbook: a quick reference guide to nearly 100 tools for improving process quality, speed, and complexity.** San Francisco: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005.

GOMES, Jefferson de Oliveira; VALLEJOS, Rolando Vargas. Fresamento HSC de ligas de alumínio. In: ÉRICA, Editora et al (ed.). **Usinagem em Altíssimas Velocidades: Geometria da ferramenta de corte para alumínio de alta resistência.** São Paulo: Editora Érica, 2003. Cap. 4. p. 42-48.

HEIJ, Christiaan et al. **Econometric Methods with Applications in Business and Economics**. New York: Oxford University Press Inc, 2004.

HEISEL, U.; GRINGEL, M.. **Machine tool design requirements for high speed machining**. Annals Of Cirp. New York, p. 389-392. jan. 1996.

HELLENO, André Luis; SCHUTZER, Klaus. Programação e Transmissão de dados na tecnologia HSC. In: ÉRICA, Editora et al (ed.). **Usinagem em Altíssimas Velocidades: Métodos de interpolação da trajetória da ferramenta no programa NC**. São Paulo: Editora Érica, 2003. Cap. 11. p. 157-159.

HEUMANN, Christian; SHALABH, Michael Schomaker. **Introduction to Statistics and Data Analysis: with exercises, solutions and applications in r**. München: Springer, 2016.

HIOKI, Daniel. **Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido**. 2006. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen**. Aachen, Alemanha: Springer Verlag, 1997.

LEVINE, David M. **Statistics for Six Sigma Green Belts: with minitab® and jmp**. Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2006.

LIMA, Daniel Oliveira de et al. **Influência da profundidade de corte e do avanço na força de corte no fresamento de faceamento**. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Maranhão, p. 54-64. jul. 2012.

LOKENS GARD, Erik. **Plásticos Industriais: Teoria e aplicações**. 5ª edição. São Paulo – SP: Cengage Learning, 2013. 616p. Traduzido por: vários tradutores.

MACHADO, Álisson R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2015.

MARCONDES, Francisco Carlos; SANTOS, Aldeci Vieira dos. Influência da Tecnologia HSM/HSC no Marketing Industrial. In: ÉRICA, Editora *et al* (ed.). **Usinagem em Altíssimas Velocidades**: Como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. São Paulo: Editora Érica, 2003. Cap. 3. p. 36-38.

MATHEWS, Paul G.. **Design of Experiments with MINITAB**. Milwaukee: Asq Quality Press,, 2004.

MATSUNAGA, Tânia. **Um estudo comparativo entre os critérios e requisitos exigidos pelo prêmio deming do japão, o prêmio malcolm baldrige dos estados unidos e o atual utilizado no brasil o prêmio nacional de qualidade**. 2016. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso Superior de Tecnologia em Gestão Empresarial, Faculdade de Tecnologia de Americana, Americana, 2016.

Minitab, LLC (2021). "Otimizador de resposta," **Visão geral de Otimizador de resposta**, p. 1

Minitab, LLC (2021). "Quality and Process," **Overview for attribute Agreement Analysis**, p. 1

Minitab, LLC (2021). "Statistical modeling," **What is ANOVA**, p. 1

MOEN, R.D.; NOLAN, T.W.; PROVOST, L.P. **Quality improvement through planned experimentation**. McGraw-Hill, 1999

MONARO, Renato Luis Garrido. **Avaliação de estratégias de usinagem na manufatura de superfícies complexas considerando as características dinâmicas da máquina-ferramenta.** Mostra Acadêmica Unimep. Piracicaba, p. 10-16. nov. 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

NEUGEBAUER R, Drossel W-G, Pagel K, Bucht A, Anders N (2011) **Design of a controllable shapememory- actuator with mechanical lock function.** In: Ghasemi-Nejhad MN (ed); Active and passive smart structures and integrated systems V : 6–10. März 2011. – San Diego Bellingham, WA : SPIE, 2011 (Proceedings of SPIE 7977, 797719).

NEVES, Helaine P. **Influência da variação dos parâmetros do processo de eletroerosão por penetração no desgaste do eletrodo e na produtividade no desbaste do aço inoxidável 304 e do inconel 718.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Itatiaia. (Anais) Itatiaia: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2013.

OLIVEIRA, Fernando Garcia de. HSM - Conceito e aplicações. In: ÉRICA, Editora et al (ed.). **Usinagem em Altíssimas Velocidades:** O que torna a HSM capaz de realizar tal feito?. São Paulo: Editora Érica, 2003. Cap. 2. p. 30-32.

PYZDEK, Thomas; KELLER, Paul. **The Six Sigma Handbook: a complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels.** 3. ed. San Francisco: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010.

RAMM, Axel Júlio. **Procedimento de Calibração e Otimização Estrutural para um Gabinete de Refrigerador.** 2007. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ufsc, Florianópolis, 2007.

RODRIGUES, Alessandro Roger. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagens com altas velocidades de corte**. 2005. 249 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2005.

SANDERS, D.; ROSS, W.; COLEMAN, J. **The process map. Quality engineering**, v. 11, n. 4, 2006.

SANTOS, Diego Ursulino dos. **Desenvolvimento de sistema para medição de forças em operações de microfresamento**. 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão e Tecnologia Industrial, Centro Universitário Senai Cimatec, Salvador, 2017.

SHINGE, A. R.; DABADE, U. A.. **The effect of process parameters on material removal rate and dimensional variation of channel width in micro-milling of aluminum alloy 6063 T6**. Procedia Manufacturing. Walchand, p. 168-173. maio 2018.

SILVA, Rosemar Batista da et al. **Influência das condições de corte no acabamento e tempo de usinagem durante o fresamento em aço endurecido com fresa ball nose**. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Caxias do Sul, p. 76-84. abr. 2011.

SIM, Julius; Wright, Chris C. (2005). **"The Kappa Statistic in Reliability Studies: Use, Interpretation, and Sample Size Requirements"**. Physical Therapy. 85 (3): 257–268. doi:10.1093/ptj/85.3.257. ISSN 1538-6724. PMID 15733050.

SCHUTZER, K. **Tecnologia HSC está completando 70 anos**. Disponível em: <<https://www.usinagem-brasil.com.br/>>. Acesso em: 9 Jun. 2001.

TONSHOFF, H. K. et al. **High-speed or high performance cutting - a comparison of new machining technologies**. Production Engineering, V. 8,n. 1, p. 5-8, 2001.

TOH, C.K.. **Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials.** Materials And Design. Birmingham, p. 517-533. jul. 2004.

TONSHOFF, H. K. **Cutting, fundamentals. Encyclopedia of production engineering.** Springer, Heidelberg, 2011.

UHLMANN E, Wacinski M (2010) **Development and test of monolithic ceramic end milling cutters for high speed machining of nickel-based alloys.** In: Aoyama T, Takeuchi Y (eds) Proceedings of the HPC2010, 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Gifu, Japan.

UYSAL, Alper et al. **The influence of milling parameters on cutting forces in high-speed milling of polymer materials.** In: IVANOV, Vitalii et al. Advances in Design, Simulation and Manufacturing III: Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The innovation exchange, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv, Ukraine - Volume 1: Manufacturing and materials engineering. Kharkiv: Springer, 2020. p. 462-470.

VALIM, D. B. . **Usinagem.** 01. ed. Porto Alegre: Sagah, 2018.

VOEHL, Frank et al. **The lean six sigma black belt handbook: tools and methods for process acceleration.** Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014.

WERKEMA, Cristina. DFLSS - **Design for Lean Six Sigma: ferramentas básicas usadas nas etapas D e M do DMADV.** 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Atlas Ltda, 2012.

WERKEMA, Cristina. **Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas.** Rio de Janeiro, Rj: Atlas Ltda, 2014.

WERKEMA, Cristina. **Lean Seis Sigma: Introdução às ferramentas do lean manufacturing.** 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Atlas Ltda, 2012.

WERNKE, P.A. **Melhoria da qualidade de um componente através da aplicação de ferramentas da metodologia seis sigma.** Trabalho de graduação apresentado à Universidade do Estado de Santa Catarina. Santa Catarina, 2011.