

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO – Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE SOBRE A
RUGOSIDADE E A PRODUTIVIDADE NO FRESAMENTO FRONTAL
DO AÇO AISI P20**

Fabricio Antoniazzi Haas
158897@upf.br

Luiz Airton Consalter
lac@upf.br

Comissão Examinadora – Charles Leonardo Israel, William Haupt

RESUMO

Considerando a crescente demanda por produtos inovadores e de geometria complexa, os processos de corte e estampagem feitos a partir de moldes e matrizes tem crescido consideravelmente e, com isso, a necessidade de melhoria nos processos de fabricação para a produtividade e obtenção de peças de melhor qualidade com um custo reduzido. A otimização dos parâmetros de corte visa, entre outras metas, assegurar a produtividade e qualidade superficial. Neste sentido o presente trabalho se propõe a um estudo experimental, com planejamento estatístico, em que serão considerados diferentes valores dos parâmetros de fresamento de acabamento, fazendo uma variação da velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de usinagem, visando a obtenção de uma qualidade superficial condizente para moldes de matrizes de injeção e com foco na máxima produtividade. Com o decorrer do estudo, pode-se notar uma grande correlação entre alguns parâmetros de entrada com os de saída, tendo em vista uma grande variação nos resultados obtidos a partir de uma pequena variação nos parâmetros de entrada, tendo como ponto crucial o avanço por dente, tanto para o acabamento quanto para a produtividade do processo. Com as variações propostas anteriormente, conseguimos obter parâmetros considerados ideais para acabamentos de moldes e matrizes, conseguindo atingir uma faixa inferior a 2 Ra com uma taxa de remoção de material superior a 500 mm³/min, tendo assim uma boa produtividade com um ótimo acabamento superficial.

Palavras-chave: Fresamento, matriz de injeção, otimização de processos, aço ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

As pesquisas na área de fabricação têm crescido consideravelmente no decorrer dos anos, dada a suma importância das mesmas na manufatura do mundo atual. Tendo em vista a economia do mercado vigente, onde a indústria busca constantemente o máximo rendimento com o menor custo para seus investimentos, tem-se um papel cada vez maior nas decisões por pesquisas na área de fabricação.

Os custos de fabricação se resumem basicamente a matéria prima e tempo de fabricação, sendo o segundo item o principal a ser estudado, visto que, a redução do tempo pode ser executada sem afetar a qualidade do produto final. Para a usinagem, tem-se como conceito o tempo principal de usinagem, o qual se conceitua no tempo em que a ferramenta efetivamente remove material da peça, sendo este dividido em três etapas: desbaste, semi-acabamento e acabamento. Dentre estas três etapas o acabamento é responsável por quase metade do tempo total de fabricação, o que torna essa etapa, onerosa, contudo, indispensável na maioria das vezes.

Tais processos buscam um melhoramento e adequação de equipamentos para obtenção de uma melhor qualidade e produtividade. O fresamento é tido como uma das operações mais importantes da usinagem devido ao fato de possibilitar uma grande gama de geometrias.

Dentro da área de moldes e matrizes, as cavidades produzidas por fresamento de alta velocidade (HSM) são normalmente pequenas, as maiores necessitam de um processo de acabamento por eletroerosão, pós tratamento térmico. A utilização de eletroerosão para o acabamento é uma etapa de grande preocupação, pois nesta fase, para se obter uma boa precisão e evitar alterações nas características, são utilizadas faíscas com baixa energia, tendo como consequência uma taxa de remoção de material abaixo de $0,05 \text{ mm}^3/\text{min}$ (LOTTGEN, 2003).

Um fato interessante é que se estima que cerca de 82% dos fabricantes de moldes e matrizes estão localizados na Europa e Asia, sendo os outros 17% localizados na América do Norte e 1% apenas se dá entre a África e Brasil (Sandvik 1999). Esta informação nos sugere o quanto importante é o estudo de melhoramento do processo de moldes e matrizes, visto a alta gama de mercado disponível em nosso país e a grande possibilidade de expansão, fazendo com

que o país pudesse se posicionar em uma balança comercial favorável, evitando a importação e aumentando sua exportação de tais produtos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo consiste na determinação experimental da melhor combinação de parâmetros de fresamento frontal em aços para matrizes de injeção (AISI P20) que possibilite obter qualidade superficial e produtividade compatíveis com as necessidades de produção.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o efeito dos parâmetros sobre a rugosidade e a produtividade;
- Avaliar o comportamento relativo entre rugosidade e produtividade com base na variação dos parâmetros de corte;
- Observar a rugosidade da peça em termos quantitativos e de morfologia;
- Equiparar a integridade superficial da cavidade fresada entre os corpos de prova.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE USINAGEM POR FRESAMENTO

Fresamento se dá como um processo de remoção de material a partir de uma ferramenta giratória, a qual é denominada fresa de múltiplas arestas cortantes. Uma das principais características do processo é que cada gume da fresa remove uma porção de material da peça, na forma de pequenos cavacos individuais (DROZDA,1983). O presente processo é considerado como o processo de fabricação mais versátil e flexível encontrado, pois é capaz de modelar geometrias complexas vista a grande gama de possibilidades de combinações de eixos que podem ser implementadas no equipamento, sendo largamente utilizado na indústria aeronáutica, automobilística e de moldes e matrizes (POLLI, 2005). Caracteriza-se ainda pela alta taxa de remoção com um bom acabamento superficial, o qual vem melhorando cada vez mais com a evolução dos equipamentos.

O processo de fresamento é considerado um processo de corte intermitente, onde, o dente da fresa entra e sai da peça a cada revolução da ferramenta, ou seja, a ferramenta sujeita cada dente a um ciclo de forças de impacto e carga térmica a cada rotação, portanto, trata-se de um corte interrompido, onde cada aresta é responsável pela retirada de uma pequena faixa de material a cada ciclo da ferramenta.

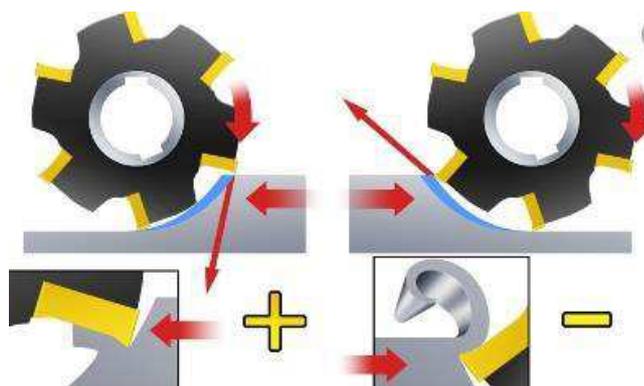


FIGURA 1- Remoção de cavaco (Fresamento).
FONTE: Sandvik, 2010.

A Figura 1 demonstra o corte intermitente anteriormente citado, onde há apenas duas arestas por vez realizando a remoção de material, as demais arestas estão na parte externa da peça, passando por um resfriamento da área cortante para que não ocorra um super aquecimento da aresta de corte e sucessivamente a queima da pastilha, ocasionando na perda da sua capacidade de corte e com isso uma redução da qualidade superficial.

2.1.1 PARÂMETROS X PRODUTIVIDADE X QUALIDADE

A produtividade de um equipamento de usinagem está ligada diretamente a quantidade de material que se remove em uma faixa de tempo, ou seja, para se atingir uma boa produtividade, teoricamente, dever-se-ia utilizar os maiores parâmetros disponibilizados pelo equipamento, contudo, há limitantes no processo de fresamento, como a qualidade superficial, imprecisão dimensional e operacional. Parâmetros dados como fundamentais para a produtividade, como: avanço, largura, penetração de usinagem tendem a ser os primeiros a serem alterados quando o assunto é aumento na taxa de remoção de material, contudo há necessidade de um equilíbrio entre eles, e entre os demais parâmetros, como a quantidade de dentes da ferramenta ou a velocidade de corte, pois estes também aumentam a taxa de remoção gerada por reduzirem os esforços sobre o equipamento e ainda nas arestas de corte (HIOKI, 2006).

Outro ponto de suma importância a ser avaliado quanto aos esforços de corte, é o modo de fresamento, se o mesmo será frontal ou tangencial, ou ainda, concordante ou discordante (caso necessário). Pois o fresamento tangencial por exemplo, o modo de operação, sendo ele, concordante ou discordante, vai influenciar diretamente em como o material será removido e ainda a quantidade de material que poderá ser retirada da peça por cada aresta, as vibrações geradas no equipamento, o desgaste da ferramenta e aquecimento superficial da peça usinada, itens os quais podem acarretar em não conformidades geométricas e dimensionais da peça a ser confeccionada (SILVA, 2018).

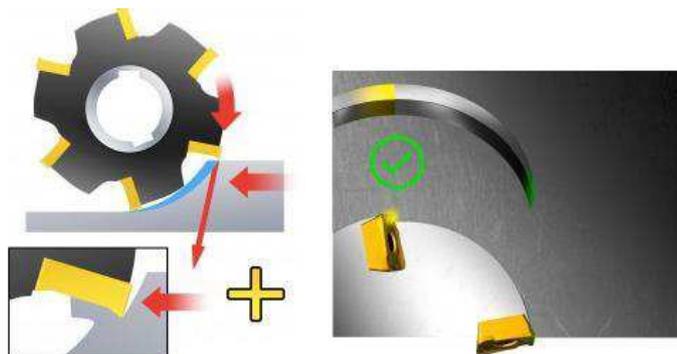


FIGURA 2- Arestas em trabalho (Fresamento concordante).
FONTE: Sandvik, 2010.



FIGURA 3– Arestas em trabalho (Fresamento discordante).
FONTE: Sandvik, 2010.

Nas Figuras 2 e 3, pode-se notar a diferença entre utilizar um fresamento concordante ou discordante. A entrada da ferramenta no fresamento concordante é brusca, o que faz com que se necessite de uma excelente fixação, além do equipamento não poder possuir folgas, ou então, ocasionará na imperfeição dimensional e rugosidade alta superficial, já no fresamento discordante, nota-se que há uma entrada suave, o que acaba ocasionando em um “esfregamento” da aresta com a superfície usinada, gerando assim um maior aquecimento superficial, podendo acarretar novamente em imperfeições dimensionais e de acabamento (SILVA, 2018).

2.1.2 ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE

A taxa de remoção de material (Q), também conhecida como taxa de usinagem, trata-se da produtividade em termos da quantidade de material removido em um determinado período de tempo, ou também, pode ser avaliada conforme o volume de material removido no tempo de corte. (KOLLING,1986)

Para aumentar a produtividade, a taxa de usinagem (Q) do processo deve aumentar, isso pode ser alcançado por meio do aumento da profundidade de corte e da velocidade de avanço, contudo esta variável é dependente de outras, como avanço por dente, velocidade de corte. Deve-se tomar um extremo cuidado na busca de um aumento da taxa de usinagem, pois os limites de máquina e tipos de aplicação são fatores de restrição para este aumento (KOLLING,1986) tendo em vista que se mal dimensionado o equipamento/ ferramenta/ processo pode acarretar em um acabamento superficial que não atenda ao desejado, visto que vibrações de usinagem podem vir a aumentar dados os esforços gerados pelo aumento da profundidade de corte, assim como para o aumento da velocidade de avanço.

2.1.3 CONTROLE DO PROCESSO

O fresamento de alto desempenho pode ser obtido através de um ótimo nivelamento dos parâmetros de processo, e com uma iteração otimizada entre máquina-ferramenta, ferramenta de corte, geometria e material da peça (SCHULZ,1996).

O fim de vida das ferramentas, é marcado principalmente pelo desgaste, tendo em vista que o corte intermitente exige muito da ferramenta, e ainda pelo surgimento de vibrações durante o processo.

O controle das vibrações é um fator importante não só para o aumento da vida útil da ferramenta, mas sim, principalmente, para o acabamento superficial e para o bom desempenho do processo em usinagem de matrizes e moldes em alta velocidade. A usinagem de moldes e matrizes geralmente necessita de ferramentas alongadas, as quais ficam com grande parte de seu corpo em balanço, para que se gere uma cavidade usinada mais profunda, além da necessidade de pequenos diâmetros e raios, necessitando ferramentas de pequenos diâmetros. (DAVIM, 2009)

2.1.4 VIBRAÇÕES

Na usinagem, são diversos os fatores geradores de vibrações, vão desde a variação de espessura do cavaco até as imperfeições do material usinado, contudo, para o fresamento, o principal ponto de excitação é a frequência de entrada dos dentes, visto que trata-se de um processo com corte interrompido. A frequência de entrada de dentes é o número de dentes da fresa multiplicado pela rotação do eixo árvore (DINIZ et al. 2010). Caso a frequência natural do sistema seja um múltiplo inteiro da frequência de entrada de dentes, o *chatter* ocorre. Nas operações de fresamento, as vibrações podem ter diversas origens (POLLI, 2005), sendo:

- **Vibrações externas a máquina-ferramenta**

Se trata de vibrações que contém um espectro de frequência muito amplo, de forma que algum componente da máquina pode atingir sua frequência natural e assim este componente pode gerar vibrações muito altas e influenciar negativamente nos resultados do processo.

- **Vibrações causadas pelo material**

A presença de regiões diferentes no material usinado, ou seja, diferentes durezas, os quais causam variados tipos de choques, e sucessivamente em vibrações. Se estes impactos não forem amortecidos rapidamente pela ferramenta podem ocasionar em vibrações de grande amplitude, as quais são prejudiciais ao processo.

- **Vibrações geradas pela própria usinagem**

Neste caso, as vibrações podem se apresentar de duas maneiras: forçadas ou livres. Vibrações forçadas são causadas por rotações desbalanceadas, ocasionadas por defeitos no equipamento, ou seja, rolamentos, engrenagens, correias com irregularidades. Esses defeitos ocorrem no equipamento por esforços excessivos na máquina-ferramenta, a exemplo dos desbalanceamentos residuais das ferramentas geram cargas dinâmicas sobre os mancais dos eixos arvores, ocasionando uma rotação decentralizada e sucessivamente a vibração.

Na usinagem por corte interrompido, a ferramenta sofre impactos consideráveis, o que pode ocasionar níveis indesejados na vibração. No desgaste, normalmente ocorre uma retirada considerável de material, o que resulta em um excesso de vibrações, sendo assim, necessária uma operação posterior para realização de um acabamento superficial.

2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL E CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE USINADA

A superfície de uma peça possui aspectos importantes, os quais necessitam ser definidos e controlados. O primeiro se diz respeito as irregularidades geométricas da superfície e o segundo as alterações do material e de sua camada sub-superficial, denominado como “integridade superficial”. (OLINIKI, 2009)

2.2.1 ACABAMENTO SUPERFICIAL OU TEXTURA DA SUPERFÍCIE USINADA

A textura da superfície é definida pelos parâmetros de rugosidade, ondulação, posicionamento e falhas. Alguns efeitos são listados como “efeitos de natureza geométrica” para a caracterização de uma superfície usinada, sendo eles:

- Defeito superficial;
- Posicionamento;

- Espaçamento na ondulação;
- Profundidade de ondulação;
- Espaçamento da rugosidade;
- Comprimento de corte frequente da rugosidade;
- Vales e picos.

As ondulações são os componentes mais espaçosos da textura superficial e podem ser oriundos de deflexões (tanto da peça como da ferramenta) ou ainda de vibrações do conjunto máquina, peça e ferramenta. Existem ainda marcas provenientes da usinagem da superfície, que são deixadas pela ferramenta ou ainda falhas provenientes de interrupções da superfície, inesperadas e indesejáveis, bem como trinca, poros, riscos e a própria rugosidade da peça bruta.

Whitehouse (1994), relata que o fresamento discordante necessita de uma boa fixação da peça, pois como citado anteriormente, nele ocorre uma facilitação da geração de vibrações (chatter) sobre a superfície, com isso, tende-se a utilizar o fresamento concordante quando o assunto é acabamento, pois os esforços de corte, bem como as vibrações são menores, fazendo assim com que haja um melhor acabamento superficial.

Os fatores que afetam a rugosidade no fresamento são (FERREIRA,2019):

- A Geometria de corte;
- Qualidade de afiação e o ângulo de inclinação das arestas;
- Valor da espessura de penetração (a_e);
- Valor do avanço por dente.

O avanço por dente (f_z) se tem como um dos principais pontos de causas de marcas da superfície usinada, isso ocorre devido a um erro de posicionamento das arestas de corte em relação a superfície, ou seja, uma diferença na altura de batimento, que pode ser gerado por defeitos de afiação e de montagem das ferramentas. Um aumento considerado do avanço por dente (f_z) tende a aumentar a rugosidade superficial, portanto, do ponto de vista de acabamento, quanto menor for o avanço, melhor tende a ser o acabamento.

2.2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O processo de usinagem, normalmente produz alteração nas características da superfície usinada. Estas podem ser profundas, contudo, é mais comum que sejam apenas superficiais. A estrutura cristalina do material, o tamanho de grão, a composição química e as impurezas do material, tendem a ser os principais parâmetros de influência na resposta da deformação.

Uma superfície usinada pode conter muitas alterações superficiais, sendo estas (MARTINS, 2019)

- Alterações Mecânicas:
 - Deformação plástica resultante de trabalhos a quente e a frio;
 - Trincas macro e microscópicas, provenientes ao engrossamento da aresta de corte durante a usinagem;
 - Alteração de dureza do material;
 - Tensão residual, distribuídas na camada superficial;
 - Vazios, rebarbas, ou materiais datados como estranhos na superfície usinada.
- Alterações Metalúrgicas
 - Tamanho e distribuição da granulação, bem como da precipitação;
 - Geminação (agrupamento de dois ou mais materiais);
 - Recristalização;
 - Alteração da martensita (não temperada ou supertemperada).
- Alterações Térmicas
 - Zona afetada pelo calor;
 - Material refundido ou depositado;
 - Material resolidificado.

Na usinagem materiais de ferramentas para conformação, os principais métodos de remoção de cavaco incluem as operações de fresamento, furação e mandrilhamento, havendo ainda os métodos abrasivos, que envolvem a retificação, lixamento e polimento. Estas operações podem produzir alterações na camada superficial, se forem executadas de maneira incorreta, usando condições severas, comuns de operações de desbastes, visto a busca por aumento de produtividade, o que acabam gerando altas temperaturas e deformações plásticas. Em condições mais suaves, típicas das operações de acabamento, com ferramentas adequadas são obtidas baixas deformações da superfície (MARTINS, 2019).

2.3 AÇOS PARA MOLDES DE INJEÇÃO

Para fabricação de moldes de injeção os aços utilizados necessitam ter uma boa resistência as tensões devidas as altas pressões exigidas para a moldagem do material, bem como ter de suportar as tensões de flexão e cargas de compressão. Necessita-se ainda ser de fácil usinabilidade visto que a exigência por qualidade tem se tornado um diferencial em todos os setores produtivos, portanto as tolerâncias exigidas são cada vez menores, e os materiais com melhor usinabilidade vem ganhando destaque por possibilitarem atingir tais parâmetros.

Os aços destinados a fabricação de moldes de injeção, são materiais com médio teor de carbono e com boas características de polimento, além de apresentarem uniformidade de dureza, baixa distorção, baixa resistência ao amolecimento em elevadas temperaturas, e boa soldabilidade. São estes aços com cromo e níquel em sua composição, tendo como principal aplicação moldes para injeção ou compressão de plástico, classificados como grupo “P”, a exemplo do aço AISI P20 o qual é amplamente empregado devido ao baixo custo, fácil disponibilidade no mercado e boa usinabilidade. O P20 é pré-beneficiado na dureza de 20 a 32 HRC e aplicado universalmente onde não há requisição de resistência a corrosão (VILLARES METALS, 2019)

Como frisado anteriormente, os aços para moldes e matrizes possuem em sua composição itens específicos como: carbono, manganês, níquel, cromo, vanádio, molibdênio e tungstênio, o P20 por sua vez não é diferente, tendo sua composição baseada em na norma DIN 1.2311, conforme Tabela 1.

TABELA 1 - Composição química P20 (DIN 1.2311)

C	Mn	Ni	Cr	Mo	V
0,36	1,60	-	1,80	0,20	-

FONTE: Mitalli Aços especiais, 2020

Podem ainda ser acrescentados aditivos para alterar o P20 conforme sua necessidade de aplicação, a exemplo do P20 (DIN 1.2738) no qual há uma adição de cerca de 1% de Níquel em sua composição o que acaba melhorando características como temperabilidade, polibilidade e texturização, garantindo assim que o molde e suas cavidades possuam uma polibilidade mais homogênea, além de um aumento da vida útil da ferramenta. Pode-se elevar ainda mais os teores de níquel e de carbono trazendo à tona aços como o P20 (DIN 1.2711) o qual possui uma dureza mais elevada (próxima a 40HRC) o que gera uma excelente polibilidade, contudo uma usinabilidade complexa, exigindo-se assim de ferramentas com pastilhas e brocas especiais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e equipamentos utilizados, além dos procedimentos realizados durante a preparação dos corpos de prova, medição de rugosidade e os tempos de usinagem. Na figura 4 está apresentado um fluxograma da metodologia que será descrita nos itens a seguir.

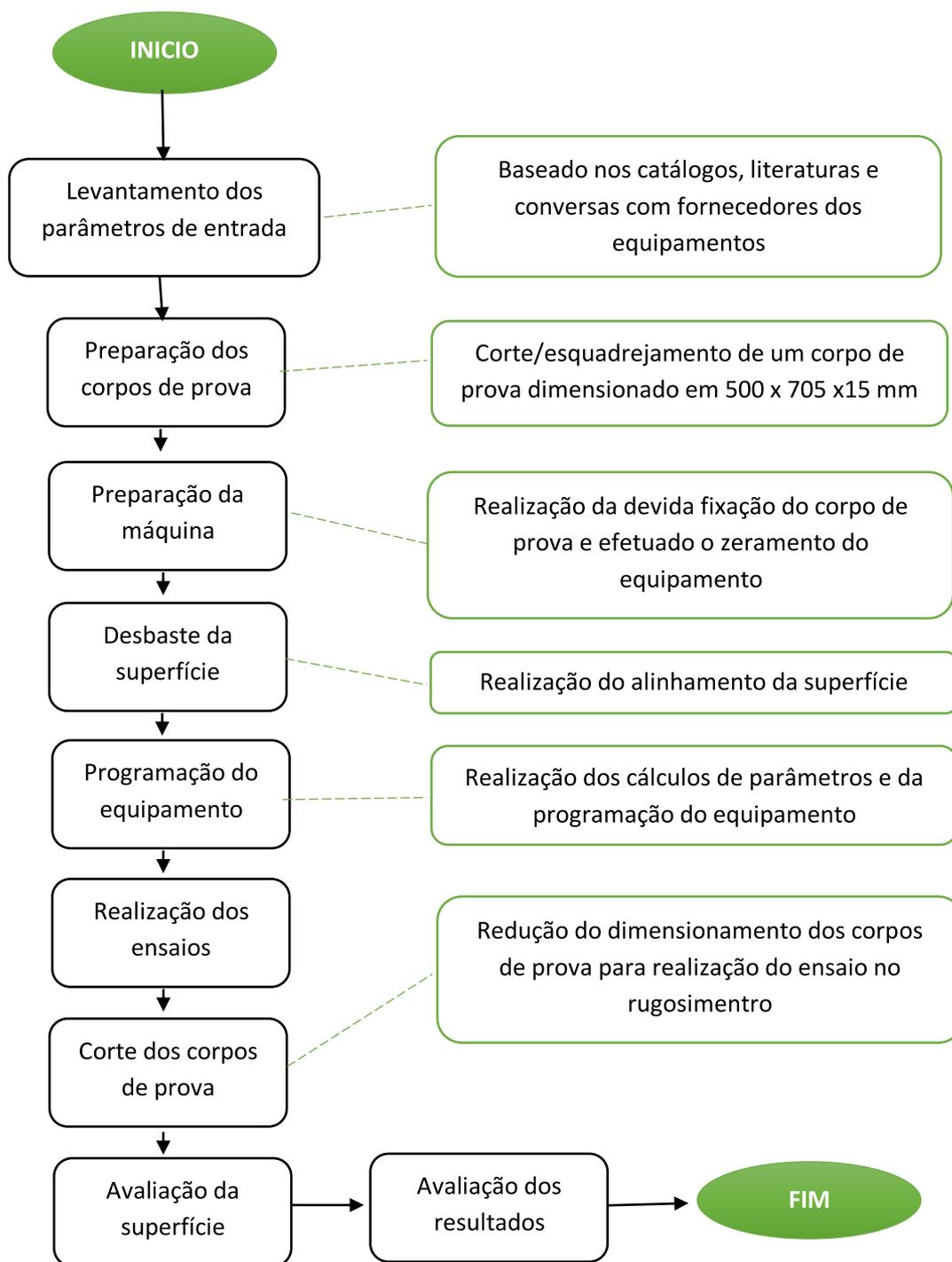


FIGURA 4- Fluxograma com as etapas do ensaio.
FONTE: O autor.

3.1 MATERIAIS

O material estudado foi o aço AISI P20, cuja composição nominal é apresentada na Tabela 2, sendo está avaliada com o auxílio de um espectrômetro Foundry-Master Xline model (energy dispersive) spectrometer (OXFORD Instruments, Abingdon, UK).

. O material foi adquirido em formato de uma chapa com dimensões de 1000 x 705 x 15 mm. Para realização do ensaio foi necessária a redução das dimensões da chapa, visto a área de trabalho do equipamento, se fazendo necessária a confecção de um corpo de prova de 500 x 705 x 15 mm.

TABELA 2 – Composição química dos corpos de prova.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu	% Cr	% Ni	% Mo	% V
0,390	1,550	0,260	0,008	0,001	0,020	1,930	0,30	0,210	0,014

FONTE: Diferro aços especiais (DIN 1.2311).

O corpo de prova passou pelos tratamentos térmicos de tempera e revenimento para que se atingisse uma dureza de 32 ± 1 HRC.

Para o fresamento foi utilizada uma fresa de topo de incertos, com diâmetro de 50 mm e 4 arestas cortantes, as quais possuíam uma angulação de 45° (Figura 5). Para as arestas de corte, foram utilizados incertos da SANDVIK com classificação 345R-1305M-PM-4230 os quais possuem raio de ponta com diâmetro de 8mm (Figura 6). Os corpos de prova foram submetidos a um fresamento frontal a seco, o qual foi realizado por uma fresadora Romi, modelo Polaris V400.



FIGURA 5 -Modelo de fresa.
FONTE: O autor.

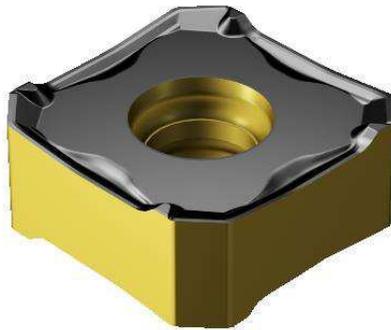


FIGURA 6 – Modelo de incerto.
FONTE: Sandvik.

Os parâmetros de usinagem foram estipulados partindo da faixa indicada pelo fornecedor da ferramenta (Catalogo Sandvik) e a análise de superfície/rugosidade foi efetuada a partir de um rugosímetro portátil modelo SJ 410 da marca Mitutoyo. Todo o processo de usinagem e de avaliação foi realizado no núcleo de mecânica da Universidade de Passo Fundo – UPF.

3.2 MÉTODOS

O estudo foi realizado através da avaliação da variação de três parâmetros específicos – velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por dente – tendo em vista que estas três variáveis são as de principal influência na eficiência do processo (considerando a utilização de uma única máquina-ferramenta para avaliação). Os demais parâmetros de usinagem foram mantidos constantes como demonstrados na tabela 3.

TABELA 3 – Parâmetros de entrada.

Parâmetros de corte	
Constantes	
Diâmetro da ferramenta	50 mm
Número de dentes	4
Penetração de trabalho	50mm
Tipo de Fresamento	Topo Frontal
Tipo de lubrificação	Seco
Variáveis	
Profundidade de usinagem	0,2 – 0,5 mm
Avanço por dente	0,12 – 0,4 mm/z
Velocidade de corte	220 – 275 mm/rot

FONTE: O autor.

Buscou-se em um primeiro momento realizar um levantamento dos valores parâmetros de entrada (velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por dente) em relação aos parâmetros de saída (Taxa de remoção de material e rugosidade superficial), os quais serão organizados/avaliados a partir do modelamento de uma ANOVA.

A partir da definição das faixas de parâmetro, conforme as especificações do fornecedor, gerou-se os parâmetros a serem ensaiados para cada corpo de prova, seguindo um padrão único para cada corpo, e efetuando todas as possíveis combinações, sendo estas, expressas na tabela 4.

TABELA 4 – Parâmetros de avaliação

Ensaio	Vc (mm/s)	Fz (mm/rot)	Ap (mm)
1	275	0,12	0,5
2	250	0,3	0,5
3	220	0,4	0,5
4	250	0,12	0,5
5	250	0,4	0,2
6	220	0,12	0,5
7	275	0,12	0,2
8	250	0,3	0,2
9	275	0,4	0,2
10	250	0,4	0,5
11	275	0,3	0,2
12	250	0,12	0,2
13	220	0,3	0,2
14	220	0,4	0,2
15	220	0,3	0,5
16	275	0,3	0,5
17	275	0,4	0,5
18	220	0,12	0,2

FONTE: O autor.

Posterior a definição dos parâmetros foram confeccionados os corpos de prova, sendo necessária a realização da redução das dimensões da chapa de ensaio, passando de 1000 para 500 mm, as demais dimensões se mantiveram iguais. Posterior ao corte, foi efetuada a devida fixação na mesa de usinagem, para que se obtivesse a menor vibração, visto a alta dureza do material. Antes da iniciação dos ensaios, foi feito um desbaste da chapa, visando uma uniformidade da superfície, sendo ainda realizado um canal central, no sentido perpendicular ao do ensaio, para que a ferramenta entrasse pela parte central da peça, visto que trata-se de um material de alta dureza, e o corte da chapa acabou gerando temperaturas elevadas, podendo endurecer o material, então, visando que não houvesse interferência do processo anterior, optou-se por partir do centro da peça avaliada.



FIGURA 7 – Peça com o canal usinado.

FONTE: O autor.

Com o corpo de prova preparado e com o equipamento devidamente regulado, foram realizadas as avaliações de usinagem, sendo realizada uma crono análise do tempo de entrada da ferramenta até o momento em que a mesma chegasse ao fim do percurso, gerando assim o tempo de usinagem.



FIGURA 8- Corpo ensaiado.
FONTE: O autor.

Com o valor obtido do tempo de usinagem, o diâmetro da ferramenta, a profundidade de usinagem, e o percurso decorrido, gerou-se a taxa de remoção de material, sendo equacionada por:

$$Q = \frac{Ap * \varnothing * S}{T} \left(\frac{mm^3}{min} \right) \quad (1)$$

Em seguida foram realizadas as avaliações de rugosidade superficial gerada para cada corpo de prova, com o intuito de avaliar o acabamento gerado para cada padrão de usinagem utilizado. Para a presente avaliação utilizou-se de um rugosímetro portátil modelo SJ 410 da marca Mitutoyo. Com a presente avaliação buscou-se um nivelamento dos benefícios (tempo de usinagem e acabamento superficial) visto que, o intuito principal do presente estudo se dá na avaliação da redução de tempo para a confecção de moldes e matrizes, produtos os quais necessitam de um ótimo acabamento superficial, sendo considerado para o presente estudo, uma altura máxima de crista de 0,0025 mm, sendo este um acabamento superficial adequado para moldes e matrizes (DEONISIO, 2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Rugosidade possui influencia tanto na precisão dimensional quanto nas propriedades do material, sendo um parâmetro importante para avaliar o desempenho do processo e da ferramenta de corte. As irregularidades de uma superfície, são os resultados do processo, que incluem, portanto, a escolha dos parâmetros de usinagem.

No processo de fresamento de acabamento para aços de elevada dureza a rugosidade é um ponto crítico, visto o grande contingente de variáveis influentes no processo de remoção de material, dentre eles estão o avanço, o raio de ponta da ferramenta, o ângulo de corte, e até a própria homogeneidade da dureza do material são parâmetros que acabam influenciando na rugosidade superficial.

De acordo com W. Bouzid Saï, N. Ben Salah, J.L. Lebrun, (2001) apesar da grande gama de parâmetros que possuem interferência na rugosidade superficial os que possuem principal influência estatística são a Velocidade de corte e o avanço.

Ao analisarmos cada um dos parâmetros verifica-se que o avanço é o parâmetro de maior influência no momento foram avaliadas as resultantes dos parâmetros de corte sobre a rugosidade e sobre a taxa de remoção de material, sendo gerados os resultados apresentados na Tabela X.

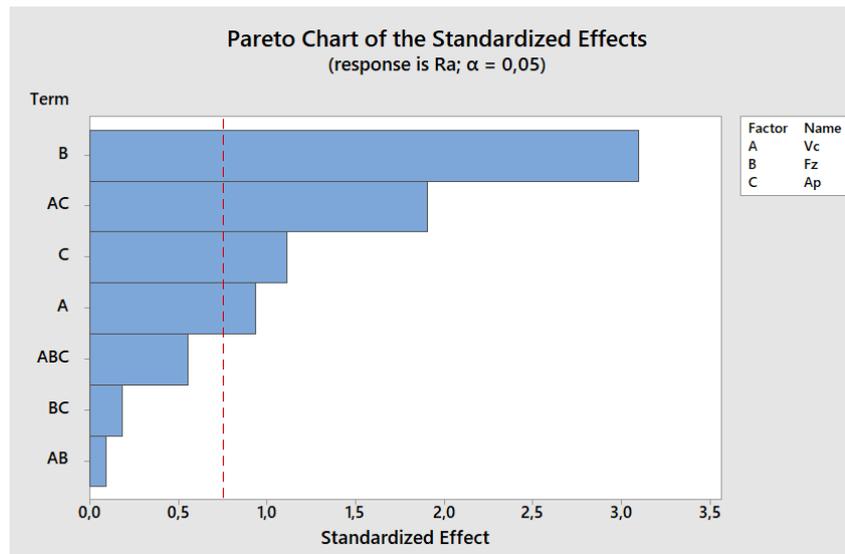
TABELA 5 – Resultados de rugosidade superficial.

Ensaio	Vc mm/s	Fz mm/rot	Ap mm	\overline{Ra}	\overline{Q} mm ³ /min	Ensaio	Vc mm/s	Fz mm/rot	Ap mm	\overline{Ra}	\overline{Q} mm ³ /min
1	275	0,12	0,5	1,958	280,899	10	250	0,4	0,5	3,065	581,395
2	250	0,3	0,5	2,828	487,013	11	275	0,3	0,2	2,444	197,368
3	220	0,4	0,5	3,291	555,556	12	250	0,12	0,2	2,714	113,208
4	250	0,12	0,5	2,245	245,902	13	220	0,3	0,2	2,845	182,927
5	250	0,4	0,2	2,618	204,082	14	220	0,4	0,2	3,165	247,934
6	220	0,12	0,5	2,531	248,344	15	220	0,3	0,5	2,796	531,915
7	275	0,12	0,2	2,167	110,294	16	275	0,3	0,5	1,961	595,238
8	250	0,3	0,2	3,224	201,342	17	275	0,4	0,5	2,259	652,174
9	275	0,4	0,2	3,321	236,22	18	220	0,12	0,2	2,214	95,541

FONTE: O autor.

A partir dos resultados do experimento planejado foram obtidos os modelos de regressão, relacionando as variáveis respostas com os parâmetros do processo, com isso pode-se gerar um gráfico de influências/gráfico de Pareto, no qual pode-se observar os níveis de influência de cada parâmetro sobre a variável de resposta.

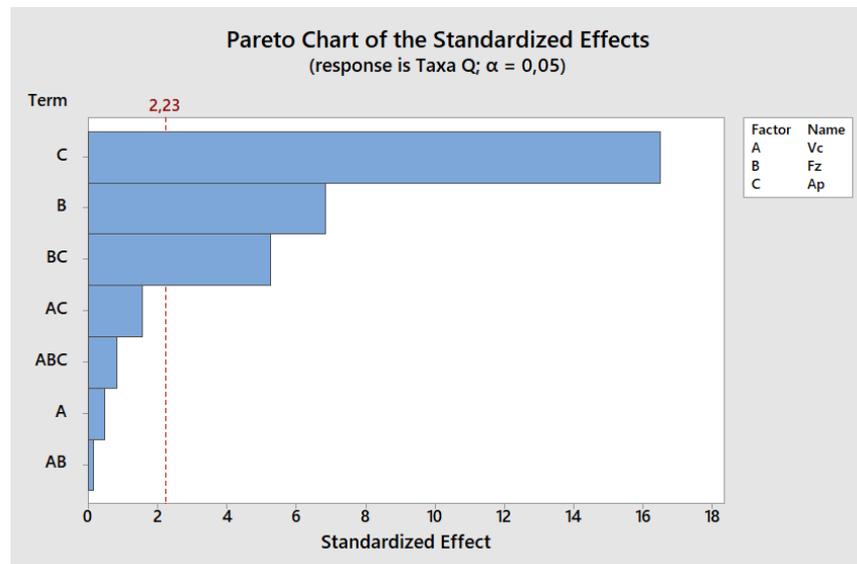
GRÁFICO 1 – Gráfico de Pareto (Rugosidade superficial).



FONTE: O autor.

Levando-se em consideração os valores obtidos no gráfico 1, nota-se uma alta influência do avanço por dente sobre a rugosidade superficial, sendo esta resposta semelhante as obtidas na avaliação de parâmetros de resposta para ferros fundidos apresentados por Anderson Mello et al. (2013).

GRÁFICO 2 – Gráfico de Pareto (Taxa de remoção)



FONTE: O autor.

Para a taxa de remoção de material, bem como apresentado para a rugosidade, o avanço por dente ainda possui uma representatividade significativa, contudo, a profundidade de usinagem, apresentou uma maior influência no presente quesito, visto que, apesar do tempo de usinagem a cada passe se influir principalmente pelo avanço e pela velocidade, a quantidade de material removido é ligada diretamente a profundidade de usinagem, contudo, tratando-se do passe final/ passe de acabamento, a profundidade de usinagem pode ser desprezada, visto que, o principal conceito de produtividade neste momento se dá no tempo de usinagem/tempo de atravessamento da ferramenta, e não na quantidade de material removido, sendo esta portanto, um parâmetro mais influente e necessário no desbaste e não no acabamento.

4.1 ENSAIO

Afim de avaliar e classificar os resultados obtidos, foi gerado um gráfico de dispersão dos corpos de prova para cada parâmetro avaliado, os quais podem ser observados na figura 9.

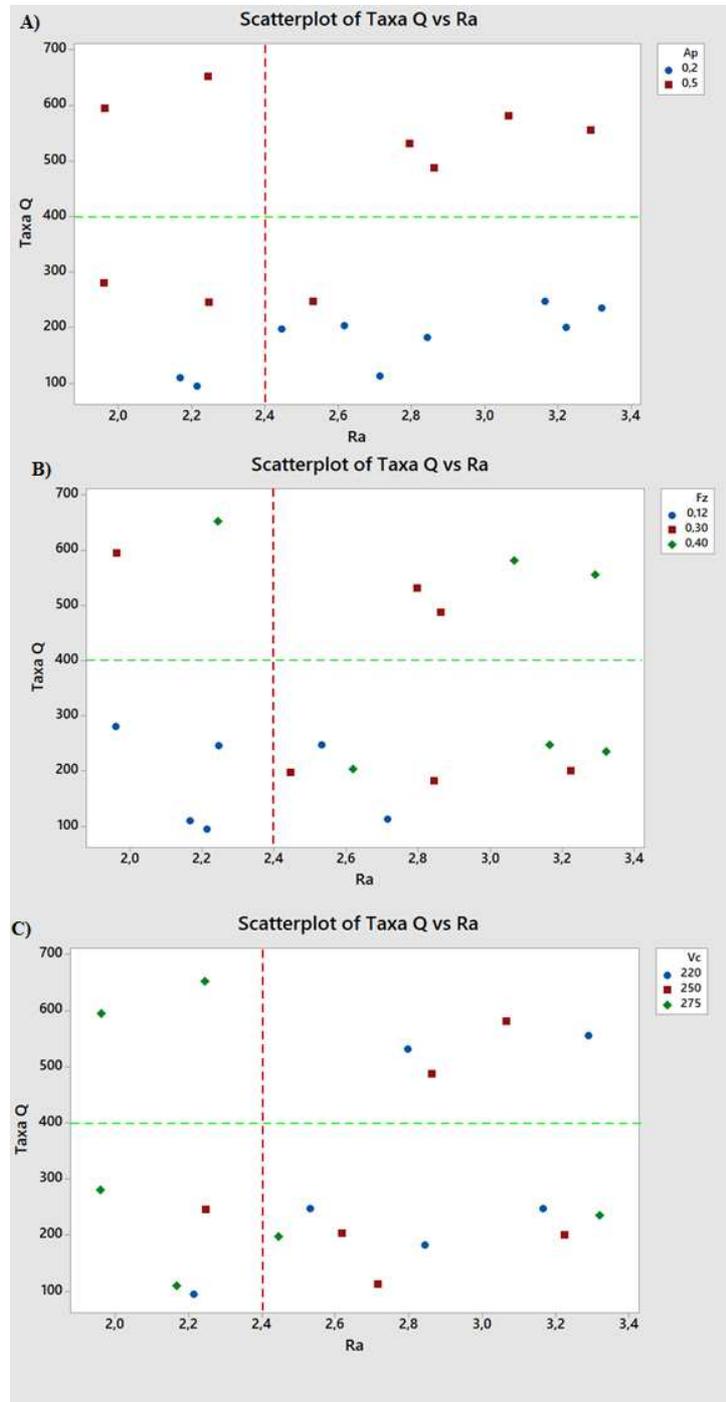


FIGURA 9 – Gráficos de dispersão.
FONTE: O autor.

Tendo em vista a resultante de Ra buscada (0,025mm de crista), apenas os parâmetros dispersos abaixo da linha de 2,4mm podem ser classificados dentro do ideal, com isso, apenas 6 dos 18 corpos de provas se mantiveram dentro do padrão desejado, tendo como destaque dois corpos com Q superior a 500 mm/min (CP 16 e CP 17), sendo está uma boa taxa de remoção de material.

TABELA 6 – Índice de sucesso para cada parâmetro

Rugosidade		
Parâmetro	Quantidade de pontos presente na faixa ideal	Índice de sucesso
Ap (mm)	0,5	67%
	0,2	33%
Fz (mm/rot)	0,12	67%
	0,3	17%
	0,4	17%
Vc (mm/s)	220	17%
	250	17%
	275	67%

FONTE: O autor.

A partir da visualização da tabela 6 pode-se notar a quantidade de vezes que cada parâmetro aparece dentro do cenário ideal, tendo assim os maiores índices de sucesso, o Ap de 0,5mm, Fz de 0,12 e Vc de 275, resultados condizentes com os anteriormente apresentados.

4.2 INFLUENCIA DO AVANÇO PRO DENTE (Fz)

Assim como apresentado por Anderson Mello et. al (2013) o avanço por dente possui uma grande influência no processo tanto no acabamento superficial, quanto na taxa de remoção de material, visto que, é trata-se do avanço da ferramenta a cada ciclo de remoção de cavaco.

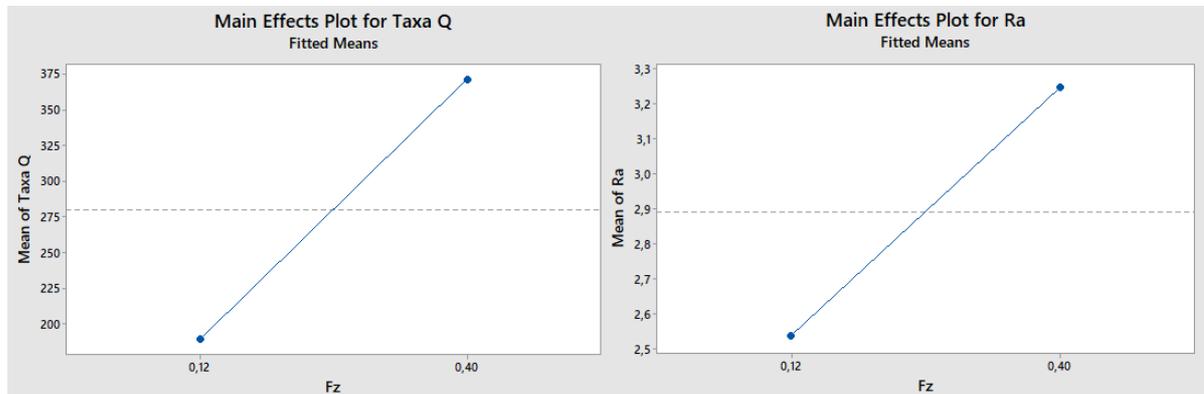


FIGURA 10 – Resposta da variação do avanço por dente.
FONTE: O autor.

A partir da figura 10, pode-se notar uma inversão de resultados, visto que a menor/melhor rugosidade se dá pelo menor valor de avanço de usinagem e a maior taxa de remoção de material, se apresenta no maior índice de Fz. Hioki (2006) comenta que a influência de Fz sobre a rugosidade se dá pelo fato de que, com o aumento do parâmetro, geram-se maiores índices de vibrações os quais acabam produzindo um acabamento superficial escamado, o qual pode ser observado no item “A)” da figura 11.

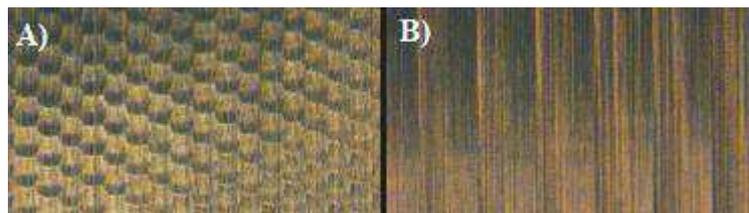


FIGURA 11 – A) Acabamento com alto índice de Fz, B) Acabamento superficial com baixo Fz.
FONTE: DANIEL HOKI, 2006.

4.3 INFLUENCIA DA VELOCIDADE DE CORTE (V_c)

Bem como o avanço por dente a velocidade de usinagem também possui influência sobre os parâmetros de saída (apesar de menor), pode-se notar, uma convergência em ambos parâmetros de saída, tanto para a rugosidade quanto para a taxa de remoção de material, a maior velocidade mostrou respostas melhores, o que pode ser visualizado pelos gráficos da figura 12.

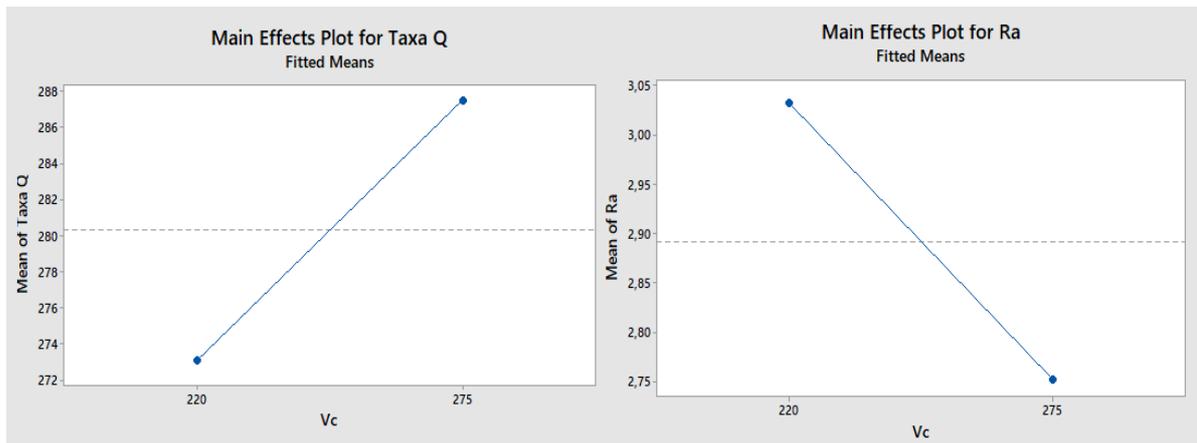


FIGURA 12 – Influência da velocidade de corte sobre as variáveis de saída.
FONTE: O autor.

SILVA (2018), comenta que juntamente com o avanço, a velocidade de corte possui alta influência na geração de cavacos contínuos, ou seja, uma maior velocidade de usinagem ocasiona em uma remoção de material com menor quantidade de discontinuidades o que resulta em um menor aparecimento de sulcos superficiais, fazendo com que se obtenha uma menor rugosidade e um melhor desempenho do processo.

4.4 INFLUENCIA DA PROFUNDIDADE DE USINAGEM (A_p)

A profundidade de usinagem necessita ser avaliada apenas sobre a rugosidade superficial, visto que a quantidade de material removido no processo de acabamento pode ser desprezada.

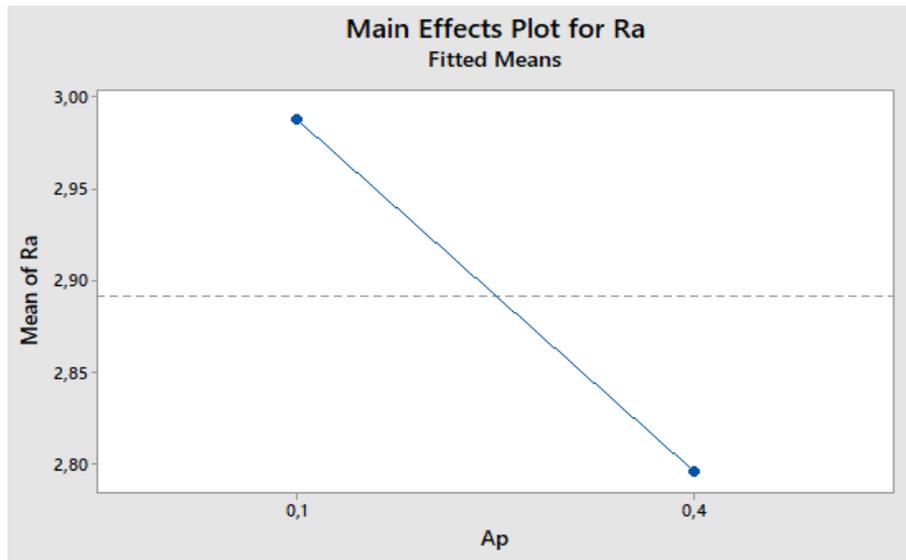


FIGURA 13 – Influencia de A_p sobre Ra.
FONTE: O autor.

Nota-se a partir da visualização da figura 13 que, obteve-se uma menor rugosidade superficial para uma maior profundidade de usinagem o que se assemelha com os resultados obtidos por Anderson Mello et. al (2013). Hübner e Souza (2013), cita que, a redução da rugosidade superficial com o aumento da profundidade de usinagem se dá pelo fato de que, parte do corte é feito pela região de curvatura da aresta, e isto faz com que o material seja deformado e esmagado contra a superfície e a rugosidade seja prejudicada.

4.5 ANÁLISE COMBINADA

Apesar de possuírem influencias individuais as combinações dos parâmetros acabam gerando taxas de resposta ainda melhores

4.5.1. FZ X VC

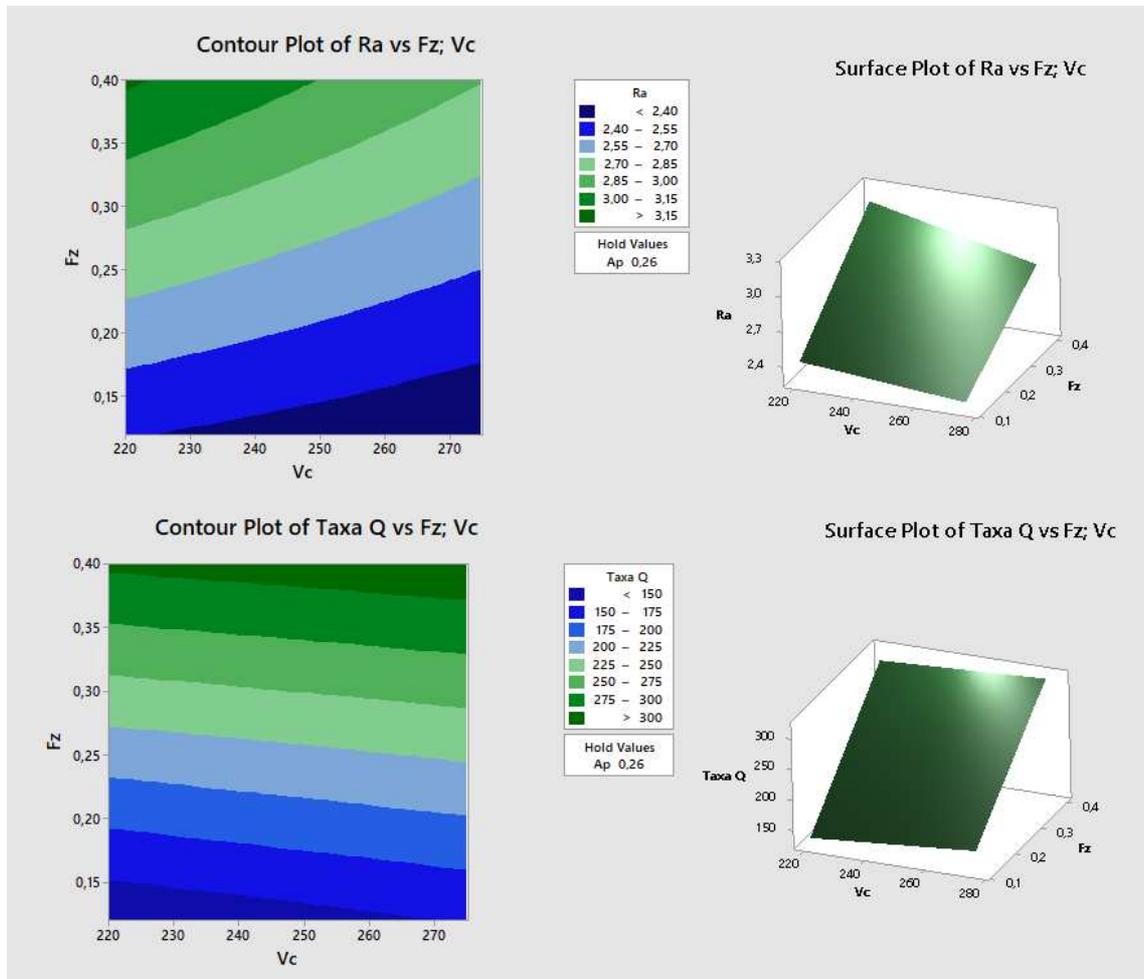


FIGURA 14 – Análise da combinação de parâmetros Fz e Vc a partir dos gráficos de superfície de resposta e de contorno.

FONTE: O autor.

A Figura 14 nos apresenta um melhoramento considerável dos parâmetros individuais quando combinados. Para a velocidade de corte de 220 mm/s há um aumento de cerca de 100% na taxa de remoção de material quando utilizado um avanço maior e uma redução de rugosidade de aproximadamente 40% quando alterado o avanço de 0,4 para 0,12 mm, já o oposto não ocorre com tamanha significância, fazendo com que haja uma predominância do avanço sobre a velocidade de corte na influência do processo.

4.5.1 VC X AP

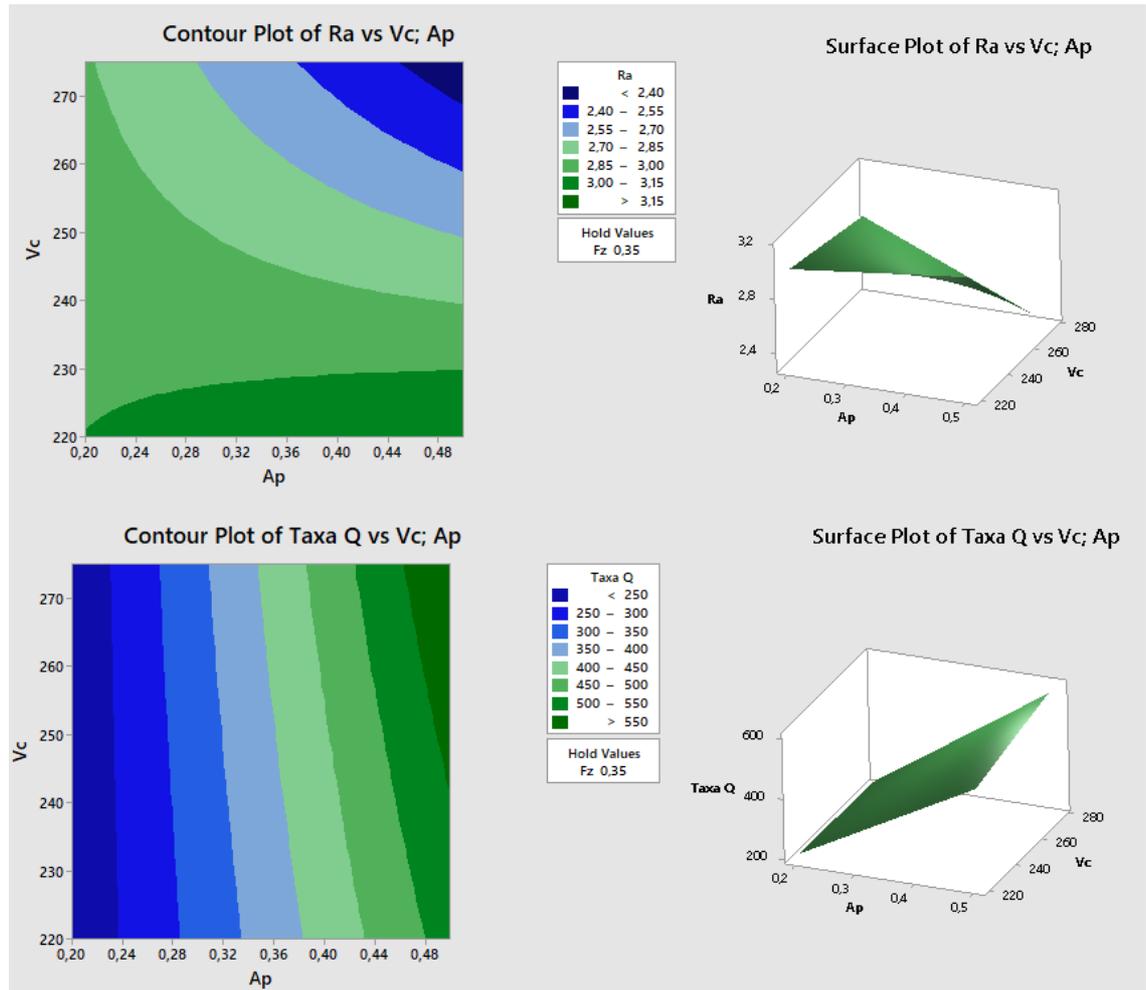


FIGURA 15 – Análise da combinação de parâmetros Ap e Vc a partir dos gráficos de superfície de resposta e de contorno.

FONTE: O autor.

Assim como o avanço por dente, a profundidade de usinagem possui alta influência sobre a velocidade de corte, tendo como ponto principal a taxa de remoção de material, onde há um aumento gradativo da taxa com o aumento da profundidade de usinagem o que se mantém constante com o aumento da velocidade de corte. Já quando analisada a rugosidade superficial a velocidade de corte possui maior influência sobre a profundidade de usinagem, contudo não é algo absoluto, para velocidades menores a profundidade de usinagem não influi sobre o acabamento, visto que o mesmo se mantém sempre próximo a mesma faixa de valores, contudo, com o aumento da velocidade esta a profundidade de usinagem acaba influenciando na variável de resposta, ocasionado uma redução de Ra, com o aumento gradativo de ambos os parâmetros.

4.5.2 FZ X AP

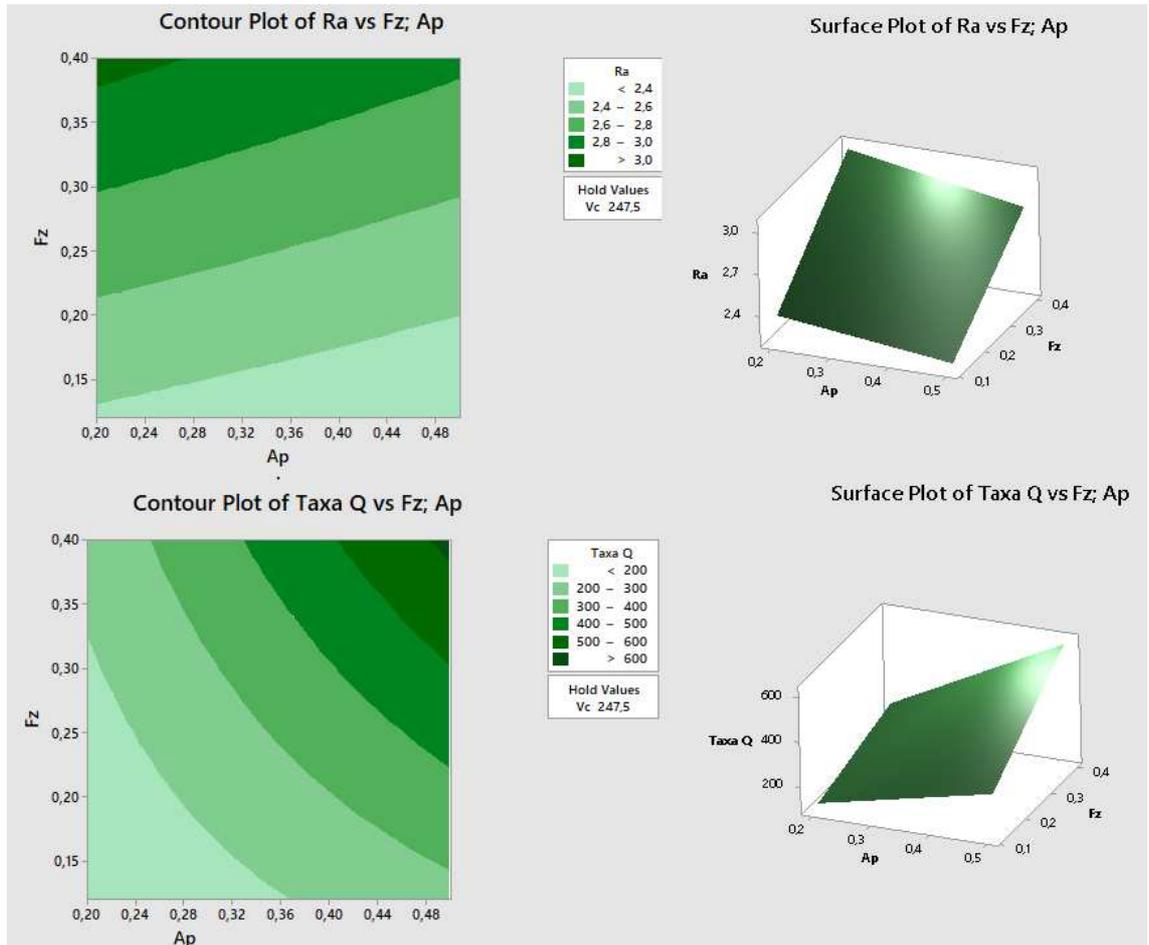


FIGURA 16 – Análise da combinação de parâmetros Ap e Fz a partir dos gráficos de superfície de resposta e de contorno.

FONTE: O autor.

Diferente das demais combinações, a presente se completa, ou seja, há uma dependência mútua dos parâmetros, onde, para se obter uma alta taxa de remoção de material, necessita-se de altos índices de profundidade de usinagem atrelados a altos avanços. Já para a rugosidade superficial, necessita-se de altos índices de profundidade de usinagem, combinados com baixos valores de avanço por dente.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se portanto que os parâmetros de maior influência sobre a produtividade x rugosidade se dão pela profundidade de usinagem (Produtividade) e avanço por dente (Rugosidade), contudo, visto que, trata-se da usinagem de acabamento para matrizes e moldes de injeção, a profundidade de usinagem pode ser desconsiderada, visto que, trata-se da última camada de material a ser removido, onde, pode ser removida qualquer quantidade de material, claro, sendo sempre levada em consideração as forças de usinagem e a fixação da mesa. Ao contrário do que se pensa a menor profundidade de usinagem não gera a melhor qualidade superficial (para este material em específico), visto que, quanto maior a profundidade, maior o esforço da ferramenta sobre a peça e sucessivamente sobre a fixação da mesa, portanto gera uma maior exigência da fixação da mesa, fazendo com que se “empurre” a peça contra a fixação e a mantendo mais “firme”, claro, dentro de seus limites.

O avanço por dente por sua vez mostrou-se um parâmetro muito significativo para usinagem, pois o alto avanço traz uma ótima taxa de remoção de material, contudo um péssimo acabamento superficial, com isso, quando se trata de matrizes e moldes de injeção, é um parâmetro que deve se ter extremo cuidado para não se obter resultados indesejados com os excessos.

A velocidade de corte não trouxe benefícios quando utilizada em baixos valores, tanto que, as usinagens de altas velocidades (HSM) vem cada vez ganhando mais espaço quando se trata de acabamento com boa produtividade, visto que auxiliam o avanço do equipamento, conseguindo remover mais material a cada “passe” da ferramenta.

Pode-se portanto concluir que um bom parâmetro de usinagem se dá por uma profundidade de usinagem controlada, a qual não extrapole os limites do equipamento e das forças de usinagem, o avanço de corte deve ser utilizado um avanço baixo, principalmente tendo em vista a dureza do presente material, pois, irá fazer com que a ferramenta consiga remover o material sem que se tenha grandes “impactos” com a peça, pois um material com alta dureza, acaba gerando vibrações indesejadas a cada impacto, se executadas altas remoções a cada giro da ferramenta. A velocidade de corte pode-se considerar o parâmetro mais simples, pois os benefícios se trazem nas altas velocidades de usinagem, portanto, quanto maior a rotação de usinagem melhor tende-se a ser o acabamento e maior a taxa de remoção de material, pois faz com que possa se utilizar um maior avanço, visto que, como comentado anteriormente, tende a

fazer com que se tenha mais passes das arestas a cada passo da ferramenta sobre o material, evitando assim maiores impactos e sucessivamente vibrações.

Conclui-se ainda, quanto a experimentação prática, que, o corpo de prova que apresentou os melhores resultados, foi o corpo de prova 16, o qual, possuía uma velocidade de corte de 275 mm/s, avanço por dente de 0,3mm/rot , profundidade de usinagem de 0,5 mm, conseguindo com isso obter uma rugosidade inferior a desejada ($R_a = 1,9$) e uma boa taxa de remoção de material, obtendo valores de 595,2 mm/min.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LOTTGEN, R. EDM or HSM? Witch technology wins concerning die and mold making. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA – **UNIMEP**. p. 227-254, 8., 2003, São Paulo.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C. e COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. ed 8. São Paulo: Artliber, 2013, 1-270p.

STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte I*. ed 4. p. 59-94. UFSC. Florianópolis. 1995.

SANDVIK – COROMANT – Fabricação de moldes e matrizes. Sandviken, 1999.

POLLI, M. L. – Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte. 214 f. 2005.. UFSC, Florianópolis.

KONIG, W. e KLOCKE, F. *Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Frasen, Bohren*. ed. 6 Auflage. Berlin: Springer – Verlag, 471 p. 1999.

<http://docplayer.org/21134299-Wilfried-koenig-fritz-klocke-fertigungsverfahren-1.html>

SCHULTZ, H. High Speed Machining. In: SEMINÁRIO DE USINAGEM COM ALTISSIMA VELOCIDADE DE CORTE, FRESAMENTO, TORNEAMENTO, FURAÇÃO, Piracicaba, 1996.

KOLLING, D. *Prozessoptimierung und Leistungssteigerung Beim Schaftfrasen*. **RWTH-Aachen**, 1986.

DROZDA, T.J.; WINCK, C. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining*. ed. 4 Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, v. 1, p. 1.1-1.66; 10.1-10.76, 1983.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C. e COPPINI, N. L. *“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”*. ed. 7. p. 262. Artiber, São Paulo, 2010.

HIOKI, D.; Influência dos Parâmetros de Corte do Fresamento HSM sobre o Desempenho Tribológico do Aço AISI H13 Endurecido. 233p. **USP**, São Paulo. 2006.

MELO, *et al.* OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA MANUFATURA DO FERRO FUNDIDO. 2013. 13 f. **UFRGS**, Porto Alegre, 2013.

SILVA, F. F. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DINÂMICA DO PROCESSO DE FRESAMENTO COM FERRAMENTA DE TOPO ESFÉRICO DO AÇO AISI D6 ENDURECIDO. 2018. 166 f. **UFPA**, Curitiba, 2018.

OLINIKI, R. INFLUÊNCIA DA COMBINAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO NA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO AISI H13 TEMPERADO E REVENIDO. 2009. 127 f. **UFPA**, Curitiba, 2009.

MARTINS, A. M.. EFEITO DOS PARÂMETROS DE TORNEAMENTO E DO ROLETEAMENTO SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO ABNT 4140. 2019. 113 f. **UFMG**, Belo Horizonte, 2019.

DEONISIO, C. C. C. Estudo do fresamento do aço D2 endurecido em altas velocidades de corte. 2004. 248p. **UNICAMP**, SP.

HÜBNER, H. B. e SOUZA, A. J. AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE GERADA NO FRESAMENTO FRONTAL ASSIMÉTRICO DO FERRO FUNDIDO NODULAR DIN GGG50. 2013. 10 f. **UFRGS**, Porto Alegre, 2013.

FERREIRA, *et al.* OTIMIZAÇÃO DA RUGOSIDADE NO FRESAMENTO DO AÇO AISI P20 APLICANDO A RAZÃO SINAL-RUÍDO DE TAGUCHI. 2019. 5 f. **UNIFEI**, Itajubá, 2019.

Gaitonde V.N, Karnik S. R, Figueira L, Davim P. *Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts.* **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**; ed. 27. p.754-763. 2009

SANDVIK CORMANT. Manual técnico. Web site: <http://www.coromant.sandvik.com.br/> acesso em 05/08/2020

SAđ, W.Bouزيد; SALAH, N.Ben; J.L.LEBRUNB. **Influence of machining by finishing milling on surface characteristics.** 2001. 41 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, Nova York, 2001.

WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of Surface Metrology.* **WARW**, UK, 1994.

Mitalli aços especiais. Web site: <https://www.metalliacos.com.br/p20-mod> acesso em 10/04/2021

Villares Mettals. Web site: <https://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Moldes-Plasticos/VP20ISO> , Acesso em 04/03/2021