

DARWIN RAFAEL GONÇALVES VALENTE

**Análise do processo de fresamento de MDF e MDP com
ferramentas de metal duro recobertas com TiAlN**

Guaratinguetá - SP
2017

Darwin Rafael Gonçalves Valente

**Análise do processo de fresamento de MDF e MDP com
ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá - SP
2017

V154a	Valente, Darwin Rafael Gonçalves Análise do processo de fresamento de MDF e MDP com ferramentas de metal duro recobertas com TiAIN / Darwin Rafael Gonçalves Valente – Guaratinguetá, 2017. 65 f : il. Bibliografia: f. 64-65 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber Sampaio Alves 1. Processamento de madeira. 2. Fresagem (trabalhos em metal). 3. Painéis de madeira. 4. Testes de vibração. I. Título CDU 621.914
-------	---


Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

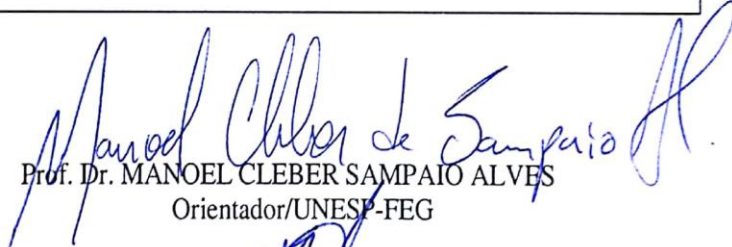
DARWIN RAFAEL GONÇALVES VALENTE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLEBER SAMPAIO ALVES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
UNESP-FEG


Prof. Msc. SARAH DAVID MÜZEL
Membro Externo

Dezembro 2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me concedido força, coragem e iluminado meu caminho durante toda a minha trajetória.

ao meu orientador, Prof. Dr. Manoel Cleber Sampaio Alves pela oportunidade, paciência e motivação durante a realização dos estudos deste trabalho.

ao meu pai Darwin Antonio Godoy Valente e a minha mãe Nicéia Gonçalves Valente, pelo amor concedido e por serem minha inspiração para tudo nesta vida. Sem eles é certo que nada faria sentido e tudo seria impossível para mim.

às minhas irmãs Adriana Gonçalves Valente, Luciana Gonçalves Valente Ferreira e Tatiana Gonçalves Valente Duarte por todo o carinho e atenção concedidos. Todas sempre vibraram com cada conquista minha e serei eternamente grato pelo afeto.

aos meus sobrinhos Davi Gonçalves Valente Ferreira, Rodrigo Gabriel Valente Duarte e Luís Antônio Valente Ferreira pelo carinho e os momentos engraçados. Três garotos que concedem alegria à família e a todos que os conhecem.

ao Prof. Msc. Marcel Yuzo Kenzo por toda atenção e ajuda durante a produção deste trabalho.

aos amigos André Luiz Martins Marinho, Samuel Cerruti Guarnieri, Fábio Hasegawa Yoiti d Silva, Caio Batista dos Santos, Leonardo Canola Stepanczuk e Matheus Albernaz, pelo companheirismo e por terem proporcionado os momentos mais hilários nestes cinco anos de faculdade.

à Dona Cássia por ter sido uma segunda mãe para nós do apartamento.

aos colegas da faculdade e ao grupo “Os Mitos” de Guaratinguetá por terem trilhado comigo nesta jornada, compartilhando as alegrias e agruras do ambiente acadêmico com bom humor e perseverança sempre.

aos meus parentes e familiares pelo apoio e incentivo.

“Eu não sei o que fui para o mundo, mas tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continuava misterioso diante dos meus olhos”

Sir Isaac Newton

RESUMO

Devido aos avanços tecnológicos e da constante busca por materiais com viés sustentáveis, a pesquisa e otimização dos processos relacionados à madeira se tornaram obrigatório para a indústria. Os painéis de MDP e MDF são amplamente utilizados em móveis e artesanato, surgindo como uma tecnologia alternativa à madeira *in natura*. Entretanto estes materiais necessitam passar por processos de usinagem, como o fresamento, até atingir o produto final. O objetivo deste trabalho é a análise comparativa entre as respostas destes dois tipos de painéis com relação ao processo de fresamento frontal, utilizando-se de uma ferramenta de metal duro revestida com TiAlN. Foram utilizadas duas velocidades de corte (50 m/min e 100 m/min) e três velocidades de avanço por dente (0,0416 mm/dente; 0,0333 mm/dente e 0,0250 mm/dente). Mediram-se os valores de potência consumida, vibração, emissão sonora, temperatura, rugosidade e desgaste da ferramenta para cada painel. A análise foi realizada com base em gráficos de efeitos principais, gráficos de interação e de colunas. O painel de MDF apresentou menores valores de rugosidade, emissão sonora, temperatura de corte, potência consumida e desgaste da ferramenta que o MDP. Com relação à vibração, o comportamento de ambos os materiais foi semelhante. Conclui-se deste estudo que o painel de MDF apresenta melhor usinabilidade que o painel de MDP para os parâmetros de velocidades utilizados.

PALAVRAS-CHAVE: Painéis de madeira. Vibração mecânica. Consumo de potência. Rugosidade. Desgaste da ferramenta.

ABSTRACT

Due to the technological advances and the constant search for materials with sustainable bias, the research and optimization of the processes related to the wood have become obligatory for the industry. MDP and MDF panels are widely used in furniture and handicrafts, appearing as an alternative technology to in natura wood. However, these materials need to go through machining processes, such as milling, until the final product is reached. The objective of this work is the comparative analysis between the answers of these two types of panels with respect to the process of frontal milling, using a carbide tool coated with TiAlN. Two cutting speeds (50 m / min and 100 m / min) and three feed rates per tooth (0.0416 mm / tooth, 0.0333 mm / tooth and 0.0250 mm / tooth) were used. The values of power consumed, vibration, sound emission, temperature, roughness and tool wear for each panel were measured. The analysis was performed based on graphs of main effects, interaction graphs and columns. The MDF panel presented lower values of roughness, noise emission, shear temperature, power consumed and tool wear than the MDP. Regarding vibration, the behavior of both materials was similar. It is concluded from this study that the MDF panel presents better machinability than the MDP panel for the speed parameters used.

KEYWORDS: Wood panels. Mechanical vibration. Power consumption. Roughness. Tool wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pannel de MDF em corte	15
Figura 2 - Pannel de MDP em corte.	16
Figura 3 - Fresamento Tangencial Discordante.....	17
Figura 4 - Fresamento Tangencial Concordante.....	18
Figura 5 - Exemplos de Fresamento Frontal	19
Figura 6 - Fresamento Frontal com profundidade de corte e penetração de trabalho	20
Figura 7 – Linha média do perfil de rugosidade.....	23
Figura 8 - Comprimentos do perfil de rugosidade.....	23
Figura 9 - Perfil de rugosidade evidenciando a rugosidade parcial.....	25
Figura 10 - Modelo de Vibração Forçada.....	26
Figura 11 - Modelo de Vibração Auto Excitada.....	27
Figura 12 - Exemplos de revestimentos para ferramentas de metal duro.....	31
Figura 13 - Influência da temperatura na condutividade térmica dos principais revestimentos utilizados nas ferramentas de corte.....	32
Figura 14 – Desgastes da Ferramenta (a) Desgaste Frontal (ou de flanco); (b) Desgaste de entalhe	33
Figura 15 - Desgaste de Cratera.	34
Figura 16 - Avaria do tipo lascamento.	34
Figura 17 - Avaria do tipo trinca - (a) Variação térmica; (b) Esforços mecânicos	35
Figura 18: Modelo Esquemático do Corpo de Prova em mm.	36
Figura 19 - Fresadora EMCO com códigoCNC	38
Figura 20 - Dados sobre a ferramenta de corte.....	39
Figura 21 - Equipamentos para aquisição de dados de Potência e Vibração – (a) Módulo de Canais; (b) Sensor Vibro Control; (c) Computador utilizado para armazenamento; (d) Interface do software LabView	40
Figura 22 - Instrumentos de aquisição de temperatura e ruído - (a) Termovisor Flir Modelo i5; (b) Decibelímetro.....	41
Figura 23 - Microscópio MarVision MM20 acoplado ao laptop.....	42
Figura 24 - Efeitos Principais - Potência MDF	43
Figura 25 - Interação - Potência MDF	44
Figura 26 - Resultados de Potência - MDF	44
Figura 27 - Efeitos Principais - Potência MDP	45

Figura 28 - Interação - Potência MDP	46
Figura 29 - Resultados Potência - MDP	46
Figura 30 - Efeitos Principais - Vibração MDF	47
Figura 31 - Interação - Vibração MDF	48
Figura 32 - Resultados Vibração - MDF	48
Figura 33 - Efeitos Principais - Vibração MDP	49
Figura 34 - Interação - Vibração MDP	49
Figura 35 - Resultados Vibração - MDP	50
Figura 36 - Efeitos Principais - Ruído MDF	51
Figura 37 - Interação - Ruído MDF	51
Figura 38 - Resultados Ruído - MDF	52
Figura 39 - Efeitos Principais - Ruído MDP	52
Figura 40 - Interação - Ruído MDP	53
Figura 41 - Resultados Ruído - MDP	53
Figura 42 - Efeitos Principais - Temperatura MDF	54
Figura 43 - Interação - Temperatura MDF	55
Figura 44 - Resultados Temperatura - MDF	55
Figura 45 - Efeitos Principais - Temperatura MDP	56
Figura 46 - Interação - Temperatura MDP	57
Figura 47 - Resultados Temperatura - MDP	57
Figura 48 - Efeitos Principais - Rugosidade Ra MDF	58
Figura 49 - Interação - Rugosidade Ra MDF	59
Figura 50 - Resultados Rugosidade Ra - MDF	59
Figura 51 - Efeitos Principais - Rugosidade Rz MDF	60
Figura 52 - Interação - Rugosidade Rz MDF	60
Figura 53 - Resultados Rugosidade Rz - MDF	61
Figura 54 - Efeitos Principais - Rugosidade Rt	61
Figura 55 - Interação - Rugosidade Rt MDF	62
Figura 56 - Resultados Rugosidade Rt - MDF	62
Figura 57 - Imagens de desgaste da ferramenta utilizada para o painel de MDP.	63
Figura 58 - Comparação do acabamento superficial a) MDF; b) MDP	63
Figura 59 - Detalhe com arranque de material na lateral do painel de MDP	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	PAINÉIS DE MADEIRA	14
3.1.1	Painel de MDF	14
3.1.2	Painel de MDP	15
3.2	USINAGEM	16
3.3	FRESAMENTO E PARÂMETROS DE CORTE.....	17
3.3.1	Fresamento Tangencial	17
3.3.2	Fresamento Frontal	18
3.3.3	Velocidade de Corte, Avanço e Profundidade de Corte	19
3.3.4	Potência de Corte.....	20
3.3.5	Rugosidade	22
3.3.6	Vibração	25
3.3.6.1	Vibração Forçada.....	25
3.3.6.2	Vibração Auto Excitada.....	26
3.3.7	Ruído.....	27
3.4	FERRAMENTA DE CORTE.....	28
3.4.1	Ferramenta de Metal Duro	28
3.4.2	Revestimento do Metal Duro	30
3.4.3	Desgastes e Avarias das Ferramentas.....	33
4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	MATERIAL	36
4.2	OBTENÇÃO DA DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE.....	36
4.2.1	Densidade	37
4.2.2	Teor de Umidade	37
4.3	METODOLOGIA NOS ENSAIOS DE FRESAMENTO.....	37
4.3.1	Fresamento	38
4.4	MEDIÇÕES DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL	39
4.5	MEDIÇÕES DE POTÊNCIA CONSUMIDA E VIBRAÇÃO	39
4.6	MEDIÇÕES DE TEMPERATURA E EMISSÃO SONORA	40
4.7	DETERMINAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA.....	41

4.8	TRATAMENTO DOS RESULTADOS.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	TEOR DE UMIDADE E DENSIDADE	42
5.2	ANÁLISES DA POTENCIA CONSUMIDA	43
5.2.1	Potência Consumida – MDF	43
5.2.2	Potência Consumida – MDP	45
5.3	ANÁLISES DE VIBRAÇÃO.....	46
5.3.1	Vibração - MDF	47
5.3.2	Vibração - MDP	48
5.4	ANÁLISES DE RUÍDO	48
5.4.1	Emissão Sonora – MDF	50
5.4.2	Emissão Sonora – MDP	52
5.5	ANÁLISES DE TEMPERATURA	54
5.5.1	Temperatura - MDF	54
5.5.2	Temperatura – MDP	55
5.6	ANÁLISES DE RUGOSIDADE	57
5.6.1	Rugosidade Ra – MDF	58
5.6.2	Rugosidade Rz - MDF	59
5.6.3	Rugosidade Rt – MDF	61
5.7	ANÁLISE DE DESGASTE DA FERRAMENTA	62
5.8	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS ENTRE MDF E MDP	63
6	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1. INTRODUÇÃO

Sustentabilidade sempre foi um grande desafio para a indústria e à ciência que está associada neste tema. Com as previsões da iminente escassez de recursos naturais não renováveis, a sociedade e a engenharia buscam, num esforço conjunto, métodos inteligentes para a substituição destes recursos de forma mais otimizada possível. Afinal, quanto mais aperfeiçoado é o processo, menores são os custos associados, os impactos no meio ambiente e melhores serão os resultados a serem obtidos. A madeira surge neste cenário como um material renovável com variadas aplicações.

Utilizada amplamente na indústria moveleira, na construção civil e na produção de papel e celulose, a demanda pela madeira é muito grande. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2015) o Brasil apresentou cerca de 7,8 milhões de hectares plantados de árvores de diversas espécies como pinus, eucalipto, araucária e acácia. Desta área florestal, 34% foi destinada ao segmento de Papel e Celulose, 14% para Siderurgia e Carvão, 10% para Investidores e 6% para Painéis de Madeira e Pisos Laminados, dentre outras aplicações. Segundo IBÁ (2015), 6% do Produto Interno Bruto (PIB) industrial brasileiro foi responsabilidade destes segmentos manufatureiros de utilização da madeira. É nítido o quão importante este material é para o cenário econômico do Brasil. Como qualquer outro recurso, existe sempre um custo associado para o processamento deste material.

Uma das aplicações de maior importância para a indústria moveleira são os painéis de madeira reconstituída de MDF e MDP. O MDF (Medium Density Fiberboard) é constituído de fibras, enquanto o MDP (Medium Density Particleboard) é constituído de partículas, ambos sob grande pressão, alta temperatura e aglutinados por uma resina sintética. Os painéis de fibras podem ser destinados a uma ampla gama de aplicações, tais como painéis de isolamento térmico e acústico, portas, molduras, revestimentos em geral, entre outras, em função da densidade dos mesmos (IWAKIRI, 2005). Já os painéis de particulado apresentam boa resistência a esforços axiais, sendo utilizados em móveis que exigem maiores esforços, como estantes e guarda-roupas (IBÁ, 2015). Ambos os painéis estão estritamente ligados aos processos de fabricação e necessitam passar por processos de usinagem como o fresamento para dar forma e refinamento ao produto final.

O fresamento é uma operação de usinagem que apresenta uma grande importância para a indústria. Devido ao fato de a fresa poder se apresentar sob as mais

variadas formas, o número de geometrias possíveis de serem obtidas são maiores que outros processos, como o torneamento e a furação. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), boa parte das superfícies que não planas e não de revolução de peças mecânicas somente podem ser geradas por fresamento. Entretanto, devido à grande variedade de fresas e à versatilidade de operações, deve-se atentar ao tipo de material, à geometria da peça que se deseja fresar e ao modo como será realizado o processo (se utilizará fresamento frontal, tangencial, concordante, discordante). A ferramenta ser utilizada é um fator crucial para o resultado esperado.

Com o intuito de aumentar a vida útil da ferramenta, aplicam-se revestimentos com materiais mais resistentes ao desgaste que o material do cerne. O revestimento mais comum ao metal duro é o Nitreto de Titânio (TiN), que apresenta como característica sua elevada ductilidade, alta dureza (ordem de 2300 HV) e inerte quimicamente (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001). Pode ser adicionado alumínio, formando-se assim o TiAlN, que permite a formação de óxido de alumínio na superfície durante a usinagem, aumentando a proteção contra a oxidação do metal duro (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2013). Cada modo de operação irá apresentar uma superfície diferente, diversos tipos de cavaco e determinado tipo de acabamento – por isso deve-se conhecer muito bem a tecnologia do fresamento para conter custos, evitar erros e melhorar a eficiência do processo. A indústria madeireira também utiliza este processo na fabricação de móveis, artesanato e na construção civil.

Todos os parâmetros inseridos no fresamento, como o tipo de material a ser usinado, ferramenta, velocidade de corte, avanço geram diferentes resultados de vibração, temperatura, ruído, rugosidade superficial do produto. Para uma maior otimização deste processo, deve-se conhecer como e quanto estes parâmetros influenciam os resultados. Consequentemente, eliminam-se os riscos, ocorre diminuição de despesas, defeitos imprevistos, custos e uma maior eficiência do processo como um todo.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a comparação do fresamento de painéis de MDF e MDP utilizando ferramenta de metal duro revestido com TiAlN através da análise da influência dos parâmetros de velocidades de corte e avanço nos valores de potência, vibração, temperatura, emissão sonora, rugosidade superficial e desgaste da ferramenta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PAINÉIS DE MADEIRA

Segundo Iwakiri (2005) a definição de painel é um produto constituído por elementos da madeira como partículas, fibras ou lâminas obtidas através da madeira sólida. A aglutinação destas partes é realizada a partir de resinas e através de ligações mecânicas.

O Brasil é destaque mundial na fabricação de painéis de madeira a partir de árvores plantadas segundo IBÁ (2015), fato que se deve aos investimentos contínuos em tecnologia e automação das empresas em seus processos produtivos. Existem diversos tipos de painéis reconstituídos como o MDP, MDF, HDP e Hardboard – sendo o MDF e MDP os mais utilizados na indústria (IBÁ, 2015).

3.1.1 Painel de MDF

O MDF (Medium Density Fiberboard) é definido por Maloney (1996) como painéis feitos com fibras lignocelulósicas, fabricadas a seco, combinadas por uma resina sintética ou outro agente ligante, compactadas a uma densidade entre 0,50 a 0,80 g/cm³ por meio da prensagem a quente, no qual a totalidade da colagem entre as fibras é devida ao adesivo adicionado. A Norma ABNT NBR 15316-1:2006 define o Painel de Média Densidade como “Chapa de fibras de madeira com umidade menor que 20% na linha de formação e densidade > 450 kg/m³. Essa chapa é produzida basicamente sob ação de calor e pressão com a adição de adesivo sintético”.

Torquato (2008) afirma que o tipo de madeira a ser utilizada pode ser tanto de coníferas como de folhosas, tendo como preferência as espécies que possuem paredes celulares finas (fato que auxilia o desfibramento e contribui para um maior número de pontes de hidrogênio durante a fabricação do painel). Na produção de MDF utiliza-se bastante coníferas em função de sua coloração mais clara, fibras longas e menor espessura da parede celular. Há também a possibilidade de fabricação de painéis mistos, nos quais se misturam dois tipos ou mais de madeira. No Brasil existem empresas que fabricam painéis de MDF utilizando pinus e eucaliptos. Uma das proporções mais usadas na mistura é de 70% de fibras de pinus e 30% de fibras de eucaliptos conforme especificações dos fabricantes (Torquato, 2008).

Uma característica notável neste tipo de painel é a alta homogeneidade e isotropia de sua estrutura, graças à utilização individualizada das fibras dispostas de forma aleatória ao plano da chapa (IWAKIRI, 2005). Conforme IBÁ (2015), a característica principal do painel de MDF é a sua capacidade de usinagem tanto nas bordas quanto nas faces. A presença das fibras permite uma maior facilidade na realização do torneamento, de entalhes e do processo de usinabilidade em geral. O MDF ainda pode ser facilmente pintado e revestido.

Este tipo de painel é muito utilizado na indústria moveleira e na construção civil, tendo como aplicação em portas frontais, pisos, pé de mesas, estantes, racks, frentes de gavetas e também em outros itens que exigem um acabamento mais refinado como interiores de lojas e molduras arquitetônicas. Aplicações possíveis graças à boa usinabilidade do MDF e de suas propriedades homogêneas (TORQUATO, 2008).

Figura 1 - Painel de MDF em corte



Fonte: adaptado de LÍDER INTERIORES (2016)

3.1.2. Painel de MDP

O MDP (Medium Density Particleboard) é definido por Maloney (1993) como um painel constituído pela mistura de pequenos particulados de madeira e adesivo, aglutinados através de uma prensa sobre alta pressão e temperatura. A Norma ABNT NBR 14820-2 (2013a) define o MDP como “um painel com densidade entre 551 Kg/m³ e 750 Kg/m³ constituído de partículas de madeira aglutinadas com resina sintética termofixa, que se consolidam sob a ação conjunta de calor e pressão”.

Segundo Belone (2010), as madeiras utilizadas para a fabricação são madeiras de reflorestamento, podendo ser de pinus, eucalipto ou até mesmo uma mistura de ambos com sua devida proporção conforme aplicação. Durante sua fabricação as partículas são dispostas conforme seu tamanho em três camadas, onde as maiores são

situadas na área central do painel e as partículas mais finas nas regiões mais externas (BELONE, 2010). Esta utilização das partículas mais finas nas camadas externas permite melhor acabamento superficial, podendo receber pintura e revestimentos de vários tipos. Para Macedo e Roque (2002, apud BELONE, 2010, p.21) entre os principais revestimentos empregados, destacam-se o papeis impregnados com resinas melamínicas, papeis envernizáveis e lâminas ou folhas de madeira natural.

O MDP se apresenta como uma evolução da antiga chapa de madeira aglomerada e, segundo IBÁ (2015), pertence a uma nova geração de painéis de particulados de média densidade. Pode ser considerado como um painel homogêneo que resiste muito bem à flexão e ao arranque de elementos de fixação, como parafusos e pinos. O painel de particulado de média densidade é muito utilizado na indústria moveleira na produção de portas retas, prateleiras, divisórias, laterais de gavetas, tampos retos e laterais de móveis (IBÁ, 2015).

Figura 2 - Painel de MDP em corte.



Fonte: adaptado de LÍDER INTERIORES (2016)

3.2 USINAGEM

A usinagem pode ser entendida como a retirada de material em forma de cavaco através do auxílio de uma ferramenta, com o intuito de alterar a forma, geometria e acabamento final da peça (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001). A usinagem é um processo muito prático para o ambiente industrial, entretanto existem diversos fatores que podem afetar diretamente o resultado, como a velocidade de corte, velocidade de avanço e tipo de ferramenta utilizada, gerando fatores de saída como a vibração, potência consumida, temperatura de corte, ruído e rugosidade. Todas estas variáveis requerem uma grande atenção, pois quanto maior o desempenho destas, melhor será o desempenho econômico de toda operação de usinagem (FERRARESI, 1989).

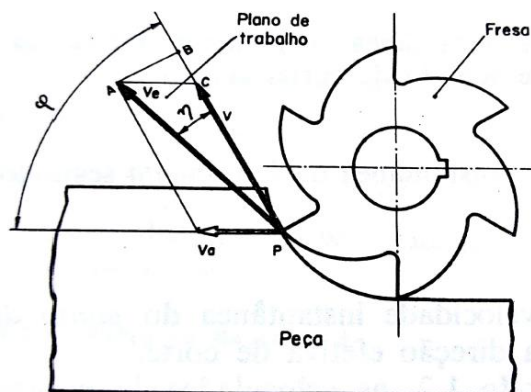
3.3 FRESAMENTO E PARÂMETROS DE CORTE

Para Ferraresi (1989), a definição de fresamento é o processo de usinagem no qual a ferramenta gira e tanto a peça quanto a própria ferramenta podem se mover segundo um trajeto determinado levando a retirada de material. Machado et al. (2012) afirma que o fresamento é uma operação que apresenta grande versatilidade na reprodução de diversas geometrias, além de garantir elevadas taxas de remoção do material. Existem dois tipos básicos de fresamento classificados em: fresamento cilíndrico tangencial e fresamento frontal (FERRARESI, 1989).

3.3.1 Fresamento Tangencial

O fresamento tangencial tem por objetivo a obtenção de uma superfície plana de forma que fique paralela ao eixo de rotação principal da ferramenta. Existem dois sentidos possíveis para o corte: discordante e concordante. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), no fresamento discordante o ângulo de contato do dente (ϕ) inicia-se no valor de zero e cresce até um valor máximo, ou seja, o movimento rotativo da fresa é contrário ao movimento de avanço da peça (Figura 3). Neste tipo de fresamento, no início de operação de cada dente, a componente vertical da força de usinagem tende a empurrar a peça contra a mesa da fresadora e no final da operação do dente, a aresta cortante tende a arrancar a peça da mesa.

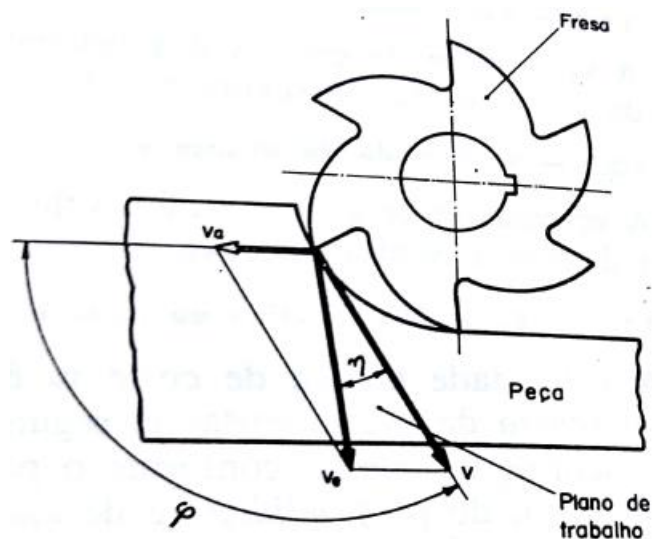
Figura 3 - Fresamento Tangencial Discordante



Fonte: Ferraresi (1989)

Enquanto que no fresamento concordante, o ângulo ϕ começa com seu valor máximo e decai até o valor zero, portanto o sentido de movimento de rotação da fresa é contrário ao avanço da peça (Figura 4). Diferente do fresamento discordante, os problemas com o arranque da peça da mesa pela ferramenta devido ao movimento são sanados, pois o sentido entre as componentes verticais das forças de usinagem tem sempre o mesmo sentido (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001). O problema que o fresamento concordante encontra é com relação ao sistema de avanço da máquina, na qual o mecanismo fuso-porca sofre maior esforço para manter a mesa em movimento, uma vez que a força de usinagem vai contra o sentido desejado da mesa.

Figura 4 - Fresamento Tangencial Concordante

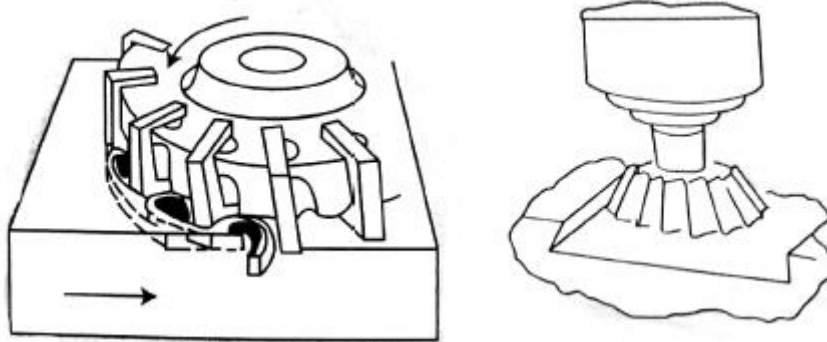


Fonte: Ferraresi (1989).

3.3.2 Fresamento Frontal

Segundo Ferraresi (1989), o fresamento frontal tem por objetivo obter uma superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. Diniz, Marcondes e Coppini (2001) afirmam que durante a operação de fresamento frontal, os dentes ativos da ferramenta estão localizados no plano frontal da fresa.

Figura 5 - Exemplos de Fresamento Frontal



Fonte: adaptado de Machado et al. (2012)

3.3.3 Velocidades de Corte, Avanço e Profundidade de Corte

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), a velocidade de corte (V_c) para operações de fresamento, furação e torneamento como a velocidade tangencial instantânea, que resulta da rotação da ferramenta ao redor da peça. Machado et al. (2012), define velocidade de corte como a velocidade instantânea do ponto referencial da aresta cortante da ferramenta, em relação à direção e sentido de corte. Quando há rotação, a velocidade de corte é calculada pela Equação 1.

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

Onde: V_c = Velocidade de corte [m/min];

d = Diâmetro da peça [mm];

n = Número de rotações por minuto [rpm];

A velocidade de avanço (V_f) é definida por Ferraresi (1989) como velocidade instantânea da ferramenta conforme sentido e direção de avanço. Pode ser calculada pela Equação 2:

$$V_f = f_z \cdot n \cdot Z \quad (2)$$

Onde: V_f = Velocidade de avanço [mm/min];

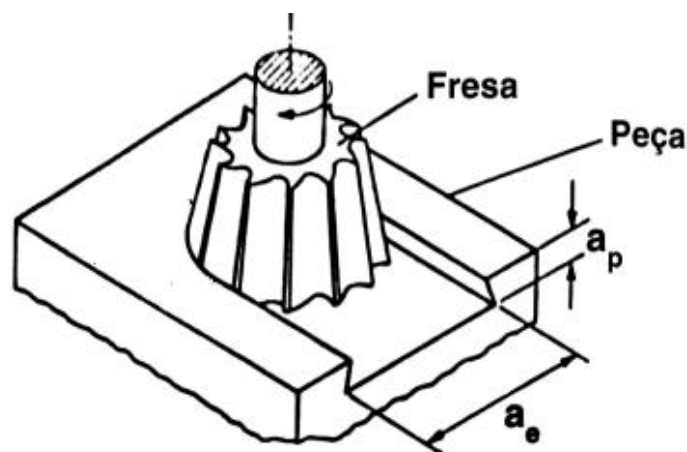
f_z = Avanço por dente [mm/dente];

n = Número de rotações por minuto [rpm];

Z = Número de dentes;

A profundidade ou largura (a_p) de corte é definida por Ferraresi (1989) como a distância de penetração medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho com relação à aresta principal de corte (Figura 6). Diniz, Marcondes e Coppini (2001), definem penetração de trabalho (a_e) como a distância de penetração da ferramenta na peça medida perpendicularmente à direção de avanço no plano de trabalho.

Figura 6 - Fresamento Frontal com profundidade de corte e penetração de trabalho



Fonte: adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2001)

3.3.4 Potência de Corte

Qualquer máquina em usinagem necessita de potência para manter seu eixo-árvore em rotação para executar os movimentos de corte e avanço. Cada um destes movimentos possui uma potência definida por equações (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \quad (3)$$

Onde: P_c = Potência de corte [kW];

F_c = Força de corte [N];

V_c = Velocidade de corte [m/min];

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \quad (4)$$

Onde: P_f = Potência de avanço [kW];

F_f = Força de avanço [N];

V_f = Velocidade de avanço [mm/min];

Ferraresi (1989) afirma que a soma destas duas potências leva à potência efetiva de corte. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), o valor de potência de avanço é desprezível em relação ao valor de potência de corte devido ao fato de que o valor de P_f ser muito menor que P_c .

A potência de corte ainda pode ser expressa em função da pressão específica de corte (K_s). Pelo equacionamento de Kienzle (Equação 5), o K_s está em função da espessura de corte (h), sendo inversamente proporcional a este valor.

$$K_s = K_{s1} \cdot h^{-z} \quad (5)$$

Onde: K_s = pressão específica de corte [N];

h = espessura de corte [mm];

K_{s1} e z são constantes do material;

Portanto a força de corte em usinagem pode ser calculada pela Equação 6:

$$F_c = K_s \cdot A_c \quad (6)$$

Onde: A_c = área de corte [mm²];

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), devido a variação do número de dentes no corte e do tamanho do cavaco, a potência de corte consumida varia a todo instante. Para o fresamento frontal e para o fresamento tangencial, a potência de corte média pode ser calculada com um valor médio de K_s (K_{sm}) pela Equação 7.

$$Ks_m = Ks_1 \cdot h_m^{-z} \quad (7)$$

Onde: Ks_m = pressão específica de corte média [N/mm²];

h_m = espessura média do cavaco [mm];

Portanto a potência de corte em função de Ks pode ser calculada pela Equação 8

$$P_c = \frac{Ks_m \cdot a_e \cdot a_p \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \quad (8)$$

Onde: a_e = penetração de corte [mm];

a_p = largura do corte [mm];

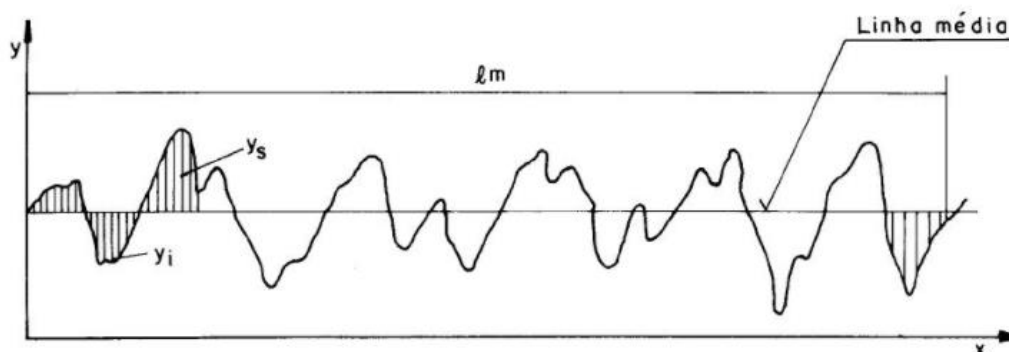
3.3.5 Rugosidade

Segundo Machado et al. (2012), a rugosidade da superfície é formada por irregularidades finas ou de erros microgeométricos contidos no processo de corte. E a qualidade superficial de uma peça depende de diversos fatores, como por exemplo, o tipo de ferramenta utilizada, o material a ser usinado, parâmetros de velocidade de corte e as geometrias envolvidas durante o corte.

Geralmente, as ondulações geradas pela usinagem devem ser evitadas durante o processo, pois podem ser considerados como falhas na fabricação. Entretanto, a rugosidade é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação final da superfície a ser usinada (Machado et al., 2012). Alguns elementos mecânicos, como pistas de rolamentos, tubulações que escoam fluidos, superfícies que refletem luz ou raios solares, necessitam ter uma rugosidade baixa em sua superfície.

A Norma NBR 6405 (1988) define como linha média do perfil de rugosidade como sendo a linha disposta paralela à direção do perfil dentro do percurso de medição (l_m), de modo que a soma das áreas entre os picos superiores e vales inferiores sejam iguais.

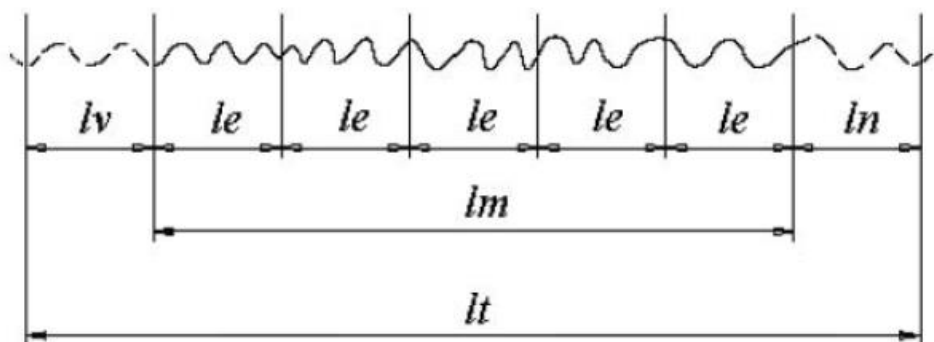
Figura 7 – Linha média do perfil de rugosidade



Fonte: Norma NBR 6405 (1988).

Dentro do perfil de rugosidade, existem comprimentos importantes que devem ser identificados para avaliar a rugosidade. Segundo DEUS (2015), o comprimento l_v é chamado de percurso inicial, extensão da primeira seção do trecho apalpado (não é utilizado durante a avaliação). O comprimento l_n é a última extensão do trecho apalpado e também não é utilizado. O comprimento l_e é denominado como comprimento total de medição ou valor de cut-off. Segundo a Norma ABNT NBR 6405 (1988), o valor de l_e equivale a um quinto do percurso de medição (l_m).

Figura 8 - Comprimentos do perfil de rugosidade



Fonte: Norma NBR 6405 (1988).

O valor escolhido de cut-off deve estar em função da rugosidade média da superfície. Esta relação está expressa na norma NBR ISO 4288 (2008), apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de cut-off em função da rugosidade média

Rugosidade Média (μm)	Mínimo comprimento (l_e) <i>cut-off</i> (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,8
Maior que 2,0 até 10,0	2,5
Maior que 10,0	8

Fonte: adaptado da norma NBR ISO 4288 (2008)

Segundo a norma NBR 6405 (1988), a rugosidade média (R_a) é definida como a média aritmética dos valores absolutos das alturas e profundidades dos picos e vales (ordenadas de afastamento) presentes em todo o percurso de medição l_m . Este valor é obtido pela Equação 9:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (9)$$

Onde: n = Número de picos e vales;

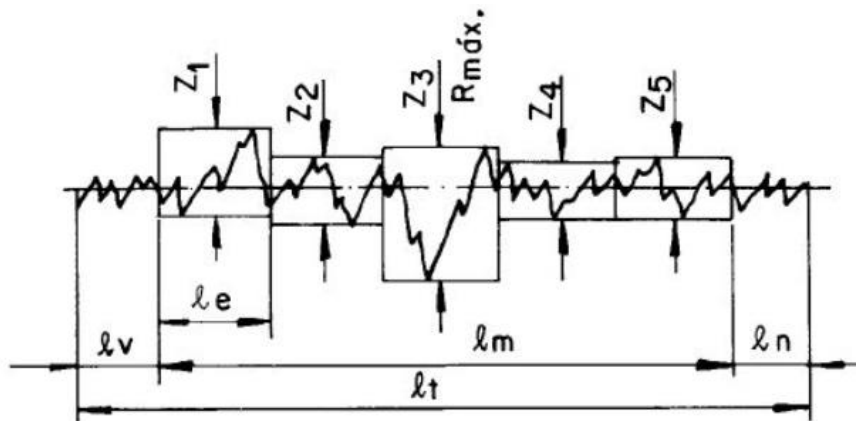
y_i = Tamanho das ordenadas de afastamento [μm]

A rugosidade R_z é definida pela norma NBR 6405 (1998) como a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial (Z_i) dentro dos intervalos de cut-off (Equação 10).

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (10)$$

Onde: Z_i = Rugosidade parcial [μm]

Figura 9 - Perfil de rugosidade evidenciando a rugosidade parcial.



Fonte: Norma NBR 6405 (1988)

Segundo DEUS (2015), a rugosidade total (R_t) é a diferença entre o tamanho do pico mais elevado em relação ao vale mais fundo dentro do percurso de medição (l_m).

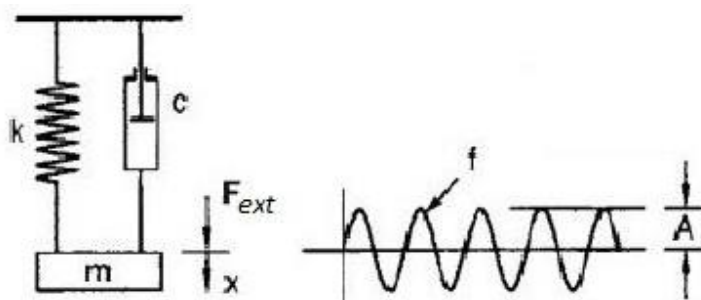
3.3.6 Vibração

Em qualquer máquina rotativa, a vibração serve como uma fonte importante de informações sobre o estado de seu funcionamento. Quando se trata do processo de usinagem, a vibração pode influenciar gravemente no acabamento superficial da peça. O conhecimento e estudo deste fenômeno podem amenizar custos e prever condições indesejáveis, como o caso da ressonância. Segundo BONIFACIO (1993), existem dois tipos de vibração em usinagem: Vibração Forçada e Vibração Auto excitada.

3.3.6.1 Vibração Forçada:

Este tipo de vibração ocorre quando há um carregamento cíclico proporcionado por forças externas, podendo ser causadas, por exemplo, pelo eixo, ferramenta, peça, máquina ou elementos de fixação. Neste cenário, os próprios elementos do torno/fresadora irão ter a função de amortecer a energia vibratória, aumentando ainda mais a amplitude de oscilação (BONIFACIO, 1993).

Figura 10 - Modelo de Vibração Forçada



Fonte: adaptado de Grzesik (2008)

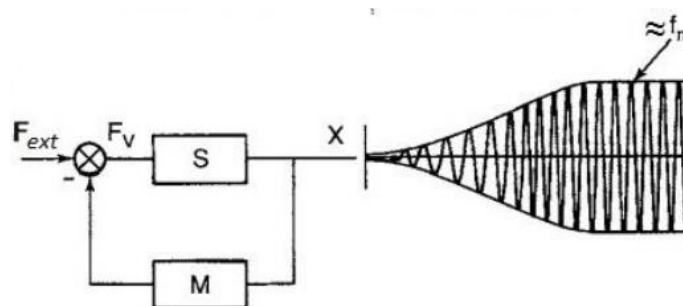
Segundo BORTOLANZA (2016), a Vibração Forçada se caracteriza pela amplitude constante e a frequência f de vibração igual à frequência da força F externa (Figura 10). Quando esta força de excitação oscila na mesma frequência natural do conjunto, ocorre o efeito da ressonância, no qual se atingem valores máximos da amplitude e podem ocorrer módulos de falha extremamente prejudiciais ao processo se mantiver o estímulo da força excitadora nesta frequência igual à da natural.

3.3.6.2 Vibração Auto Excitada:

Segundo SILVA (2017), a Vibração Auto Excitada (ou efeito *chatter*) é referenciada como uma vibração que se excita com o movimento da ferramenta na peça (Figura 11). No processo de fresamento, todo o conjunto máquina-ferramenta irá vibrar devido às forças de corte apresentarem variações.

Os componentes do sistema tendem a vibrar em algum momento numa frequência igual ou próxima à frequência natural do sistema, o que aumenta a amplitude das oscilações. A aresta de corte da ferramenta deixa a superfície com rugosidade em formato ondulado devido à vibração e esta ondulação irá provocar uma variação na espessura teórica do cavaco. Este cavaco com espessura que varia, causado pelas marcas deixadas pela vibração da aresta que passou anteriormente, alimenta a oscilação existente, tornando ainda maior a vibração. E quando a força dinâmica do corte está fora de fase com o movimento relativo entre a peça e a ferramenta, surge o fenômeno do chatter, ou Vibração Auto Excitada (STEPHENSON E AGAPIOU, 1997, apud SILVA, 2017).

Figura 11 - Modelo de Vibração Auto Excitada



Fonte: adaptado de Grzesik (2008)

3.3.7 Ruído

Todo movimento num meio material dá origem a uma oscilação que se traduz como som, excitando desta maneira o sistema auditivo. Segundo NEPOMUCENO (1968), o limiar da audibilidade humana está em 130 dB, sendo neste valor de intensidade o valor de pressão diferencial máxima (2×10^{-5} N/m) que o tímpano consegue suportar sem lesão mecânica permanente.

O decibel é definido pelo o logaritmo de Briggs, que é o decimal entre duas grandezas quadráticas, uma de entrada e outra de saída, tais como potência ou intensidade. Esta unidade é utilizada quando os limites de variação das grandezas são muito amplos (NEPOMUCENO, 1968). O nível de intensidade sonora está descrita na Equação 11.

$$NIS = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (11)$$

Onde:

NIS = Nível de intensidade sonora [dB];

I = Intensidade sonora da fonte [W/m^2];

I_{ref} = Intensidade sonora de referência [W/m^2]

O valor de I_{ref} está relacionado à menor intensidade sonora que o ouvido humano pode identificar no valor de $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$.

Santos et al. (1999) afirma que a poluição sonora é a principal causa de hipoacusia e surdez em indivíduos adultos. Vários estudos no ramo de endocrinologia e neurologia vêm colocando em evidência que os efeitos nocivos do ruído não se limitam apenas às

lesões do aparelho auditivo, mas comprometem outros órgãos em função do stress que os trabalhadores sofrem ao permanecerem em ambientes com muito barulho. Santos et al. (1999) ainda afirma que a cronicidade dos efeitos e o difícil estabelecimento de correlações diretas com outras doenças fazem do ruído um agente reconhecível, entretanto com pouca visibilidade no dia-a-dia devido ao fato de que são necessários vários anos para induzir-se a surdez. Por isto o ruído é um fator importante no estudo da usinagem, para promover uma melhor condição de trabalho ao operador.

3.4 FERRAMENTA DE CORTE

Segundo Ferraresi (1989), a ferramenta está presente em toda história da humanidade, tendo seu início na era pré-histórica até os dias de hoje. Machado et al. (2012) afirmam que a escolha da ferramenta em função do processo de corte é um fator decisivo em relação à variáveis como vibração e saída do cavaco. Devem-se escolher as geometrias e materiais adequados em função do material da peça a ser usinada, tipo de processo, custos e máquina.

Diniz, Marcondes e Coppini (2001), afirmam que na escolha do material da ferramenta está relacionada a quatro principais fatores: dureza a quente (suportar altas temperaturas), resistência ao desgaste (resistência ao atrito), tenacidade (capacidade de suportar impactos do processo) e estabilidade química (evitar desgaste por difusão).

3.4.1 Ferramenta de Metal Duro

Ferraresi (1989) diz que em 1906, H. Voigtlander e H. Lohmann registraram uma patente na Alemanha relativa à fabricação de materiais para ferramentas de corte e para matrizes de estiramento utilizando pós de tungstênio, carboneto de molibdênio ou ambos misturados, comprimidos e sinterizados através dos processos de metalurgia do pó. Shroter e Skaupy contribuíram com estudos e alterações nas fórmulas originais. Apenas em 1926, a empresa Frederick Krupp iniciou a primeira produção de metal duro com a marca Widia. Este tipo de material sofreu diversas melhorias com o intuito de aplicação em diversas ligas metálicas e aumento da velocidade de corte.

O metal duro é proveniente da metalurgia do pó, numa combinação de partículas duras de carbonetos de tungstênio (WC), de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC), e um material glomerante, como o cobalto que é utilizado na maioria das vezes.

A adição de carbonetos de tântalo (TaC) faz com que a tenacidade seja melhorada com relação às composições isentas do carboneto. A relação de porcentagem entre TiC e TaC alteram as propriedades do material e esta variação é apresentada na Tabela 2. Com relação ao tamanho do grão das partículas duras, pode-se afirmar que as partículas grandes produzem maior tenacidade, enquanto as menores auxiliam na resistência e dureza do metal duro (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

Ferraresi (1989) ainda afirma que o metal duro é o mais importante material para ferramentas utilizado na indústria, devido à sua resistência ao desgaste, tenacidade, dureza à temperatura ambiente e a quente.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), o metal duro possui maior dureza e resistência ao desgaste por abrasão que aços rápidos com cobertura e o coronite, entretanto sua tenacidade é menor.

Os metais duros são classificados pela norma ABNT NBR ISO 513 (2013) pelas letras P, M, K, N, S e H, com a presença de números na nomenclatura para a subdivisão em subgrupos. A letra P, com cor de identificação azul, representa todos os tipos de aço fundido com exceção do aço inoxidável com estrutura austenítica. A letra M, de cor amarela, representa o aço inoxidável austenítico, aço austenítico/ferrítico e aço fundido. A letra K, com cor vermelha, é o ferro fundido cinzento, ferro fundido maleável e ferro fundido com grafite esferoidal. A letra N, de cor verde, são os materiais não ferrosos como alumínio e materiais não metálicos. A letra S, de cor marrom, representa as superligas e titânio. A letra H, de cor cinza, são materiais com alta dureza como o aço temperado e o aço fundido com coquilha.

A Tabela 2 possui informações de alguns tipos de metais duro, sobre as variações de dureza, densidade e resistência de ruptura transversal em função da porcentagem de TiC + TaC e WC.

Quadro 1 - Composição Química e Característica dos Metais Duros

Designação ISO	%WC	% TiC +TaC	Densidade (g/cm ³)	Dureza (HV)	Resist. Ruptura Transv. (kgf/mm ²)
P01	30	64	7,2	1800	75
P10	55	36	10,4	1600	140
P20	76	14	11,9	1500	150
P30	82	8	13,0	1450	170
P40	77	12	13,1	1400	180
P50	70	14	12,9	1300	200
M10	84	10	13,1	1650	140
M20	82	10	13,4	1550	160
M30	81	10	14,4	1450	180
M40	78	7	13,5	1300	200
K10	92	2	14,8	1650	150
K20	91,5	2,5	14,8	1550	170
K30	89	2	15,5	1450	190
K40	88	-	14,4	1300	210

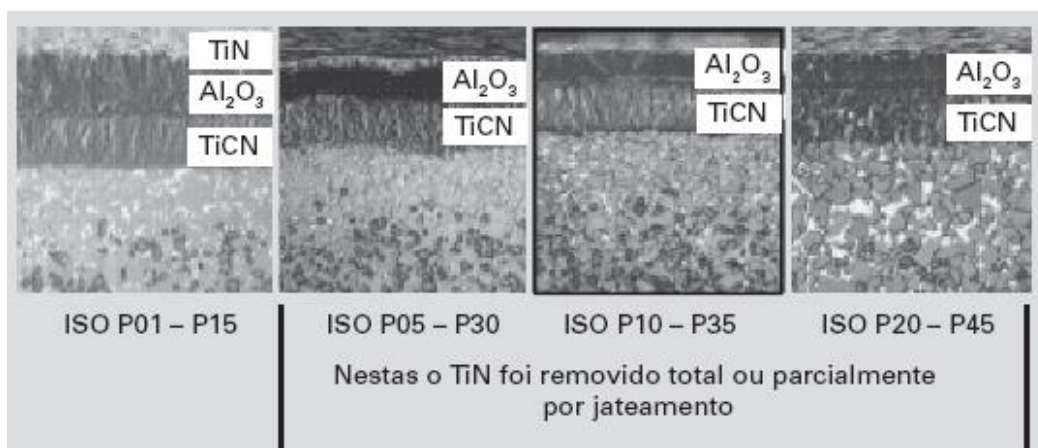
Fonte: adaptado de Ferraresi (1989)

3.4.2 Revestimento do Metal Duro

Segundo Machado et al. (2012) cerca de 95% do metal duro utilizado na indústria apresenta revestimento, com tendência de aumento desta porcentagem. A função principal do revestimento é o aumento de resistência de desgaste da camada superficial que entra em contato com a peça e o cavaco, mantendo tenacidade própria do núcleo da pastilha intacta.

Existem pastilhas com até três camadas de cobertura. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), as pastilhas com duas camadas possuem na camada primária carboneto de titânio ou carbonitreto de carbono, e na camada secundária nitreto de titânio ou óxido de alumínio. Já as pastilhas de três níveis possuem uma camada de TiC em contato com o núcleo da ferramenta de metal duro, uma camada intermediária de Al_2O_3 e uma camada superior de TiN. É ilustrado na Figura 12 de forma clara estas camadas.

Figura 12 - Exemplos de revestimentos para ferramentas de metal duro.



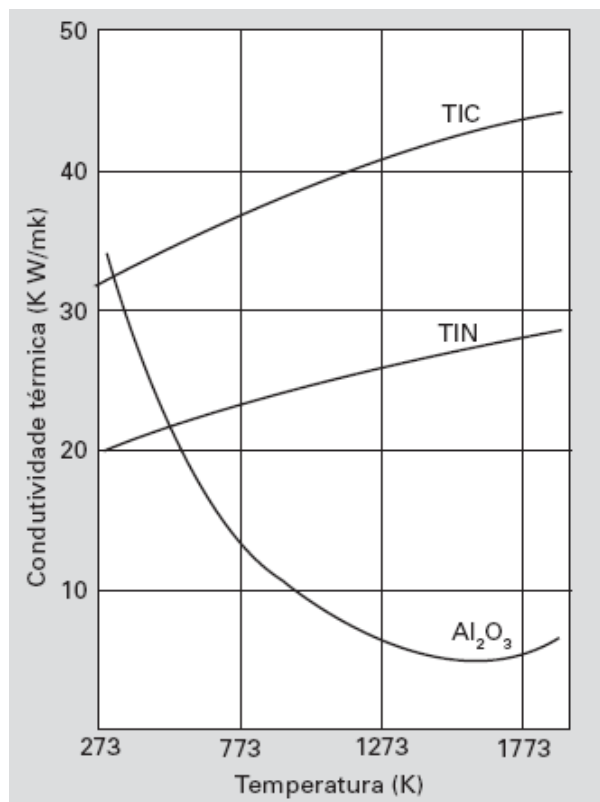
Fonte: Machado et al. (2012)

Cada camada possui suas características que estabelecem as posições de cada material. O carboneto de titânio (TiC) apresenta boa resistência ao desgaste por abrasão e possui afinidade físico-química com o metal duro, permitindo maior adesão com núcleo do que o óxido de alumínio. Sua dureza é igual a 3000 HV, maior dureza entre os materiais das camadas. Entretanto, por conter carbono, a camada de TiC necessita de uma barreira térmica para que não ocorra desgaste por difusão durante o processo, por este motivo que é utilizado o óxido de alumínio como camada superior a esta (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

Já o óxido de alumínio é o principal responsável por evitar o desgaste de cratera. Por ser um material refratário de cerâmica e por possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, o Al_2O_3 permite a estabilidade térmica requerida para a usinagem, mas pode apresentar complicações durante o fresamento por ser uma operação descontínua e com variações de temperatura. Pois, este material possui baixa resistência a impactos e a variações térmicas bruscas que causam choque térmico (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001). É ilustrado na Figura 11 como varia sua condutividade térmica em comparação com os outros materiais das camadas.

Já o nitreto de titânio diminui o coeficiente de atrito entre o cavaco e a pastilha da ferramenta. Dentre os materiais utilizados nas camadas, este é o que possui maior estabilidade quimicamente (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

Figura 13 - Influência da temperatura na condutividade térmica dos principais revestimentos utilizados nas ferramentas de corte



Fonte: Machado et al. (2012)

Há ainda o revestimento de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) ou nitreto de alumínio-titânio (AlTiN) dependendo da concentração maior de titânio ou alumínio., Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001) cobertura é aplicada ao metal duro através do processo de PVD (deposição física de vapor), permitindo coberturas bem finas (menores que 5µm) e arestas com afiação maior.

Ainda segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), as vantagens do TiAlN como revestimento são: maior resistência à oxidação, pois em contato com o oxigênio forma-se uma camada de Al_2O_3 , quimicamente inerte e resistente à difusão. Sem contar que o nitreto de titânio também possui baixa condutividade térmica, alta estabilidade química e sua dureza é similar às camadas de TiN, TiCN e TiC.

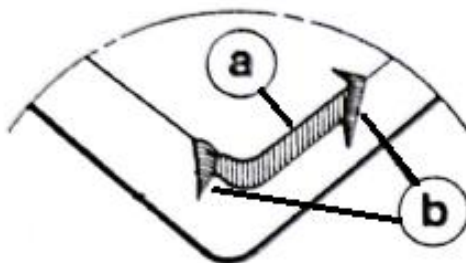
Machado et al. (2012), afirma que uma ferramenta de metal duro revestida com TiAlN conseguiu, em ensaios de furação, produzir até três vezes mais furos dos os produzidos pelas brocas com nenhum revestimento.

3.4.3 Desgastes e Avarias das ferramentas

Devido ao fato de que as ferramentas estão sobre esforços cíclicos durante sua vida útil, a ferramenta sofrerá fadiga e desgaste, necessitando sua troca em algum momento. Segundo Machado et al. (2012), avaria pode ser definida como um fenômeno inesperado devido ao lascamento, quebra ou trinca da aresta de corte. Já o termo desgaste é definido como uma perda gradual de material causado pelo corte, levando à mudança do formato original da ferramenta.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), o tipo de desgaste mais comum é o desgaste frontal (ou de flanco), pois ocorre em todos os processos de usinagem. Este desgaste é causado pelo contato entre a peça e a ferramenta, na superfície de folga (Figura 14 - a). O desgaste de entalhe ocorre sempre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga (Figura 14 - b).

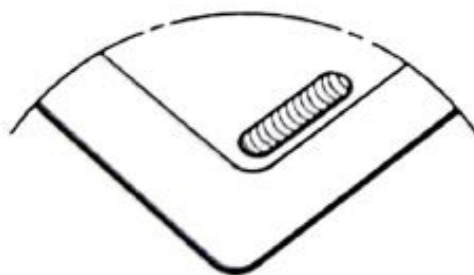
Figura 14 – Desgastes da Ferramenta (a) Desgaste Frontal (ou de flanco); (b) Desgaste de entalhe



Fonte: adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2001)

Já o desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito gerado entre o cavaco e a ferramenta (Figura 15). Quando se utiliza ferramentas com revestimento, ferramentas cerâmicas ou quando o processo de usinagem gera cavacos curtos, este tipo de desgaste pode ser eliminado ou amenizado (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2001).

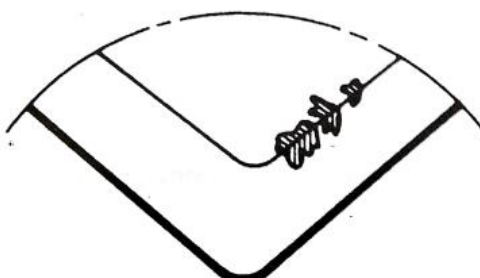
Figura 15 - Desgaste de Cratera.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2001)

Com relação a avarias, Machado et al. (2012) afirma que o lascamento ocorre quando partículas grandes são retiradas do material da ferramenta. A ocorrência é maior em ferramentas frágeis ou quando há baixo reforço da aresta de corte. Esta avaria prejudica o acabamento superficial da peça e, se ocorrer a evolução do lascamento, pode provocar a quebra da ferramenta.

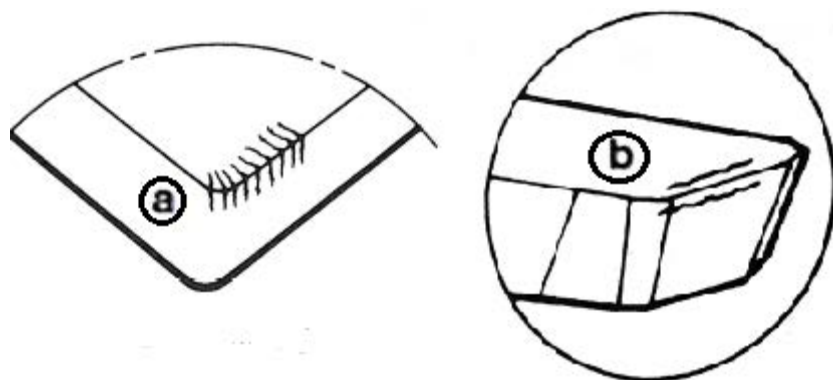
Figura 16 - Avaria do tipo lascamento.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2001)

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), as trincas são ocasionadas pelas variações dos esforços mecânicos e/ou da temperatura. Quando a trinca é gerada devido à temperatura, elas ocorrem perpendiculares à aresta de corte (Figura 17 - a), e quando é devido aos esforços elas se dispõem paralelas à aresta (Figura 17 - b). Os fatores que podem gerar estes tipos de avarias são: fluido de corte com acesso impedido, interrupção durante o corte e as variações da espessura de corte (como ocorre no caso do fresamento).

Figura 17 - Avaria do tipo trinca - (a) Variação térmica; (b) Esforços mecânicos



Fonte: adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2001)

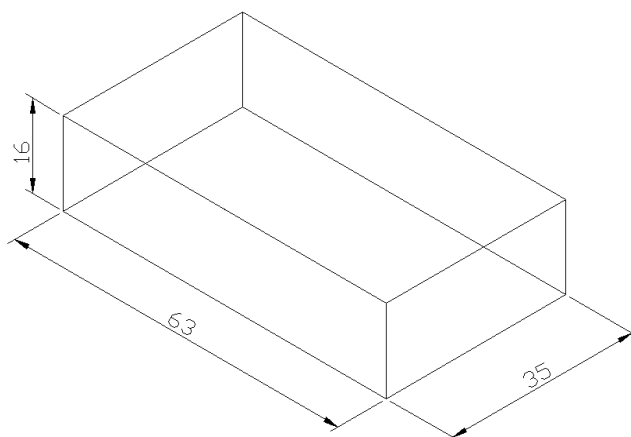
4. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma fresadora com Comando Numérico Computadorizado. Variaram-se os valores de velocidade de corte (V_c) e a velocidade de avanço (V_f) e coletaram-se os dados de potência, vibração, temperatura, emissão sonora e rugosidade.

4.1 MATERIAL

Foram utilizados 24 corpos de prova de dimensões 63 x 35 x 16 mm conforme mostrado na figura, dos quais 12 eram constituídos de MDP e 12 de MDF. Os corpos de prova foram adquiridos comercialmente.

Figura 18: Modelo Esquemático do Corpo de Prova em mm.



Fonte: O Autor

4.2 OBTENÇÃO DA DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE

A obtenção da densidade e teor de umidade dos corpos de prova de MDP e MDF foi realizada conforme as normas NBR 14810-2 (2013a) e NBR 15316-2 (2013b).

4.2.1 Densidade

Para a obtenção da densidade, utilizou-se um corpo de prova com dimensões 50x50x15 mm. As regiões de onde foram retiradas as medidas estavam localizadas a 10

mm das bordas e um ponto no centro. Utilizou-se a Equação 12 para o cálculo da densidade:

$$D = \frac{M}{V} \times 1000000 \quad (12)$$

Onde:

D = Densidade do corpo de prova (kg/m³);

V = Volume do corpo de prova (mm³);

M = Massa do corpo de prova (kg)

4.2.2 Teor de Umidade

Inicialmente mediram-se os pesos de cada corpo de prova para a obtenção do valor de massa úmida. Em seguida, colocaram-se os corpos de prova numa estufa com temperatura de 103 °C, com variação de 2 °C. Os valores de massa seca foram obtidos após a retirada do forno e nova pesagem dos c.d.p.'s. O cálculo do teor de umidade foi realizado com a Equação.

$$U = \frac{M_U - M_S}{M_S} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

U = Teor de Umidade (%);

M_U = Massa Úmida (kg);

M_S = Massa Seca (kg);

4.3 METODOLOGIA NOS ENSAIOS DE FRESAMENTO

Nesta seção são descritos os tipos de equipamentos, ferramentas e instrumentos utilizados durante os ensaios para realizar o processo de Fresamento.

4.3.1 Fresamento

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Estudo da Usinagem localizado no Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP de Guaratinguetá. Para a realização dos ensaios utilizou-se uma fresadora da marca EMCO modelo F1 com Comando Numérico Computadorizado (CNC), registrado na Figura 19.

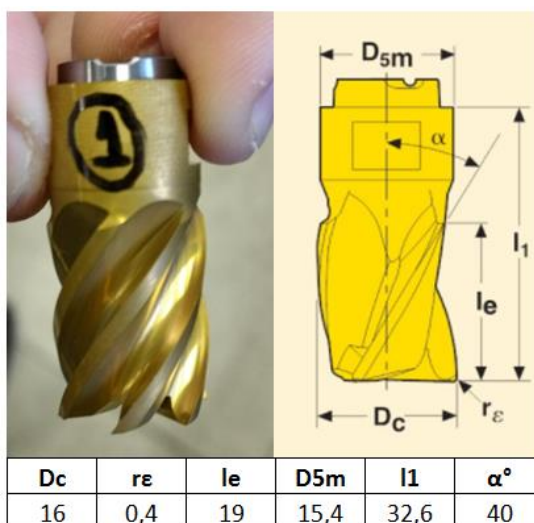
Figura 19 - Fresadora EMCO com códigoCNC



Fonte: O Autor

Utilizaram-se duas fresas de topo de metal duro revestidas com TiAlN da marca SECO, modelo MP16-16019R04Z6-M04, MP3000 (Figura 20). Para cada tipo de material utilizou-se uma ferramenta de corte para posterior análise de desgaste.

Figura 20 - Dados sobre a ferramenta de corte.



Fonte: adaptado de SECO TOOLS (2014)

Os corpos de prova foram presos por um suporte contido na própria fresadora, no qual o aperto era realizado por parafuso. Foram tomadas as precauções para não ocorrer um aperto excessivo, sem danificar os corpos de prova utilizados.

Utilizaram-se duas velocidades de corte (50 m/min e 100 m/min) e três valores de avanço por dente (0,0416 mm/dente; 0,0333 mm/dente e 0,0250 mm/dente). O valor adotado para a profundidade de corte (ap) foi de 8 mm.

4.4 MEDIÇÕES DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Não foi possível medir a rugosidade superficial do MDP devido à grande irregularidade em sua superfície em função de sua constituição por partículas. Para a avaliação de qualidade na superfície através da rugosidade no MDF, utilizou-se um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300, com ponta apalpadora em formato de cone esférico feita de diamante e com raio de ponta de 2 μm . O valor de cut-off utilizado foi de 2,5 mm. Obtiveram-se os valores de Ra (μm), Rz (μm) e Rt (μm).

4.5 MEDIÇÕES DE POTÊNCIA CONSUMIDA E VIBRAÇÃO

Para a aquisição da potência consumida do motor da fresadora foi utilizado um sensor de potência da marca LEM modelo AT 5 B10.

Para a aquisição dos valores de vibração foi utilizado um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca Vibro Control, modelo TV100. Ambos os sensores estavam conectados à um módulo de canais modelo BNC 2120 da National Instruments. Para armazenar os sinais dos sensores de potência e vibração, utilizou-se um computador e um programa construído no software LabView (Figura 21).

Figura 21 - Equipamentos para aquisição de dados de Potência e Vibração – (a) Módulo de Canais; (b) Sensor Vibro Control; (c) Computador utilizado para armazenamento; (d) Interface do software LabView



Fonte: O autor

4.6 MEDIÇÕES DE TEMPERATURA E EMISSÃO SONORA

A medição de temperatura foi realizada com o auxílio de um termovisor da marca FLIR, modelo i5 (Figura 22 – a). Com este termovisor foi possível obter as imagens térmicas durante os processos. Juntamente com o software ThermoCam QuickReport, foi possível determinar a temperatura máxima atingida de todos os ensaios no momento do fresamento.

Para a aquisição da intensidade sonora utilizou-se um decibelímetro com o range de medição entre 30 dB até 130 dB e frequência de resposta entre 31,5 Hz e 8,5 kHz (Figura 22 – b).

Figura 22 - Instrumentos de aquisição de temperatura e ruído - (a) Termovisor Flir Modelo i5; (b) Decibelímetro.



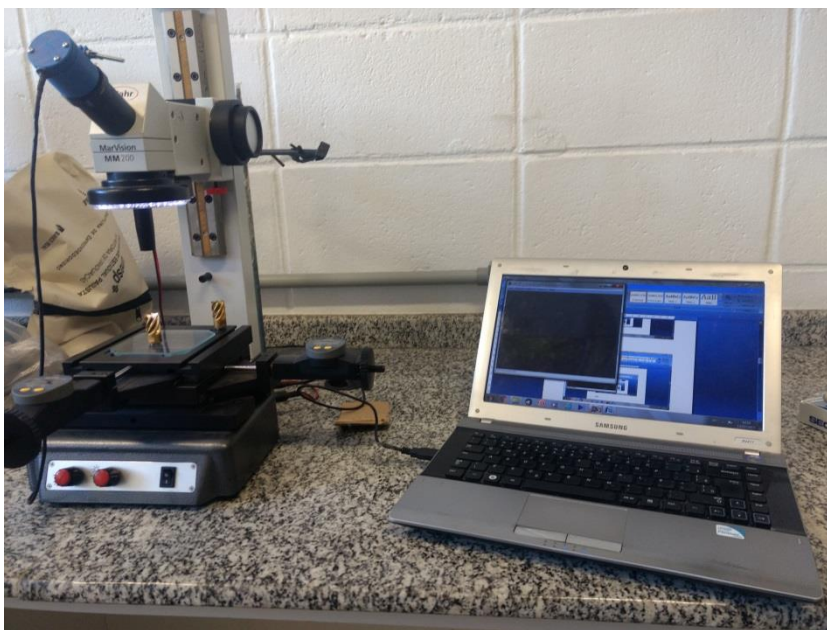
Fonte: O autor

As tomadas de valores, tanto para a temperatura quanto para o ruído, foram realizadas no momento em que a ferramenta já se encontrava na metade ou um pouco a mais da metade do corpo de prova. Assim, obtiveram-se os resultados no estado em que a temperatura e o ruído já estavam estabilizados em seu valor máximo.

4.7 DETERMINAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA

A verificação do desgaste nas arestas da ferramenta foi realizada através do microscópio da marca Mahr modelo MarVision MM20 acoplado à um laptop. Obtiveram-se os valores de desgaste para a fresa que usinou o MDP. Para a fresa que usinou o MDF não foi possível a medição devido ao desgaste ter sido muito pequeno.

Figura 23 - Microscópio MarVision MM20 acoplado ao laptop.



Fonte: O Autor

4.8 TRATAMENTO DOS RESULTADOS

Para o tratamento dos dados de potência e vibração, utilizou-se o software MatLab R2009a, utilizando-se das médias dos valores máximos medidos.

Para os tratamentos estatísticos de análise de variância (ANOVA), Foi utilizado um arranjo de fatorial completo, e para a plotagem dos gráficos de interação e efeitos principais, utilizou-se o software Minitab 17. Para tal, utilizaram-se as variáveis de saída (vibração, potência, temperatura, emissão sonora, rugosidade) em função dos parâmetros de entrada (velocidade de corte e avanço por dente). Foram considerados como significantes os valores de p-value iguais ou menores que 0,05 (ou 5%).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TEOR DE UMIDADE E DENSIDADE

Para o MDF o valor de densidade obtido foi de 710 Kg/m³ e o teor de umidade medido foi de 8,13%. O painel de MDP apresentou densidade igual a 736,22 Kg/m³ e

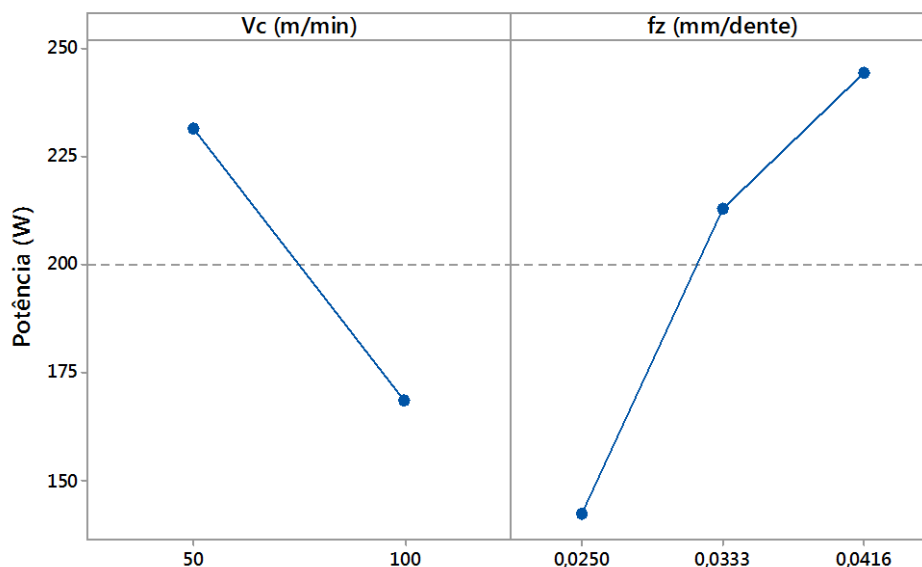
umidade de 8,37%. Ambos os tipos de painéis utilizados estavam dentro de suas respectivas normas.

5.2. ANÁLISES DA POTÊNCIA CONSUMIDA

5.2.1 Potência Consumida – MDF

Os valores obtidos de p-value tanto para a velocidade de corte quanto para o avanço por dente foram iguais a zero, portanto significativos. Já para a interação de 2 vias, o valor de p-value foi de 0,002.

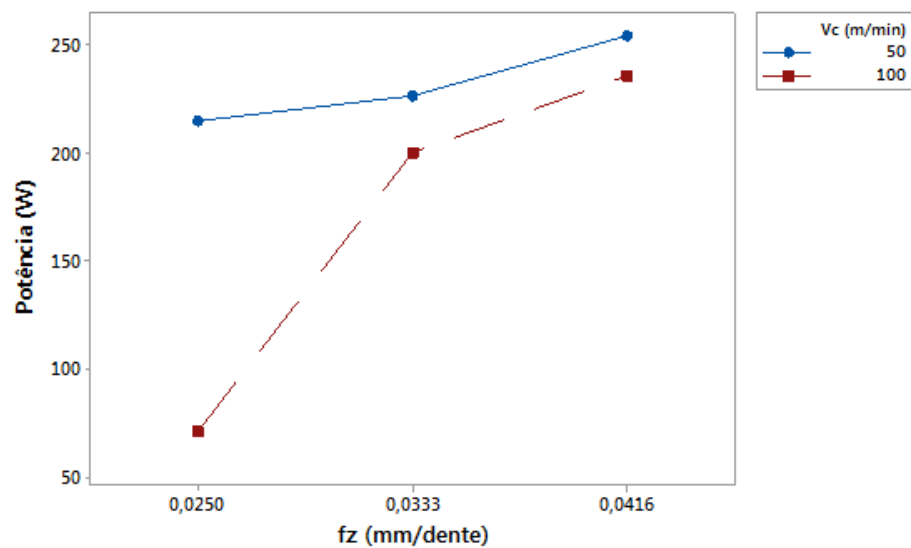
Figura 24 - Efeitos Principais - Potência MDF



Fonte: O Autor

Nota-se pelo gráfico ilustrado pela Figura 24 que quanto maior a velocidade de corte, menor a potência consumida. Isto se deve ao fato de que com o aumento da velocidade de corte, ocorre a retirada de menos material em menos tempo por dente devido à maior rotação da ferramenta. Com relação ao avanço por dente, ocorre o inverso: quanto maior o avanço por dente maior será a potência consumida. Sabe-se que o avanço é proporcional à potência consumida, pois quanto maior o avanço por dente maior será a quantidade de material retirado por dente (DEUS, 2015). Portanto maior será a potência consumida.

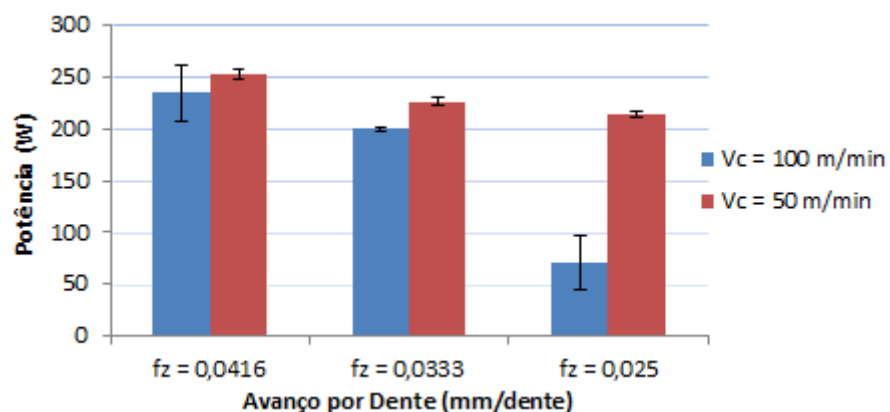
Figura 25 - Interação - Potência MDF



Fonte: O Autor

Pelo Gráfico de Interação (Figura 25), fica evidente o quão significativa é a variação de potência consumida na velocidade de corte igual a 100 m/min para os avanços de 0,025 mm/dente para 0,0333 mm/dente. A diferença entre as potências máximas consumidas para Vc igual a 100 m/min é de 164 W.

Figura 26 - Resultados de Potência - MDF

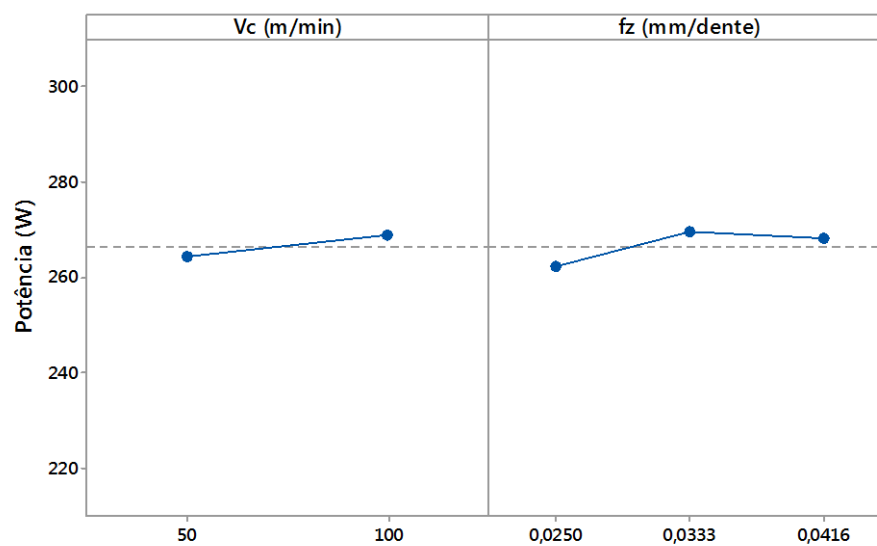


Fonte: O Autor

5.2.2. Potência Consumida – MDP

Para o painel de MDP, os valores de p-value para a velocidade de avanço e avanço por dente foram respectivamente 0,806 e 0,945. Para a interação de duas vias, p-value foi igual a 0,983. Nenhum dos valores pode ser considerado como significativos.

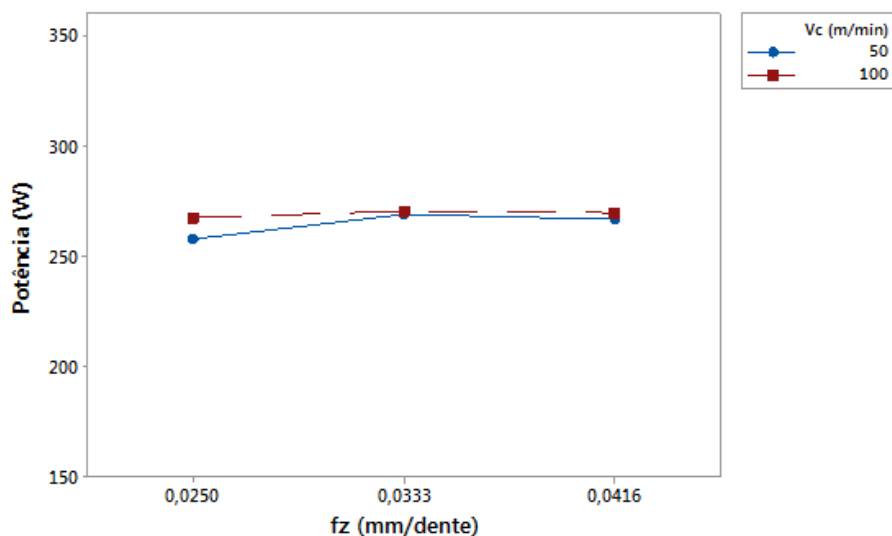
Figura 27 - Efeitos Principais - Potência MDP



Fonte: O Autor

No gráfico de efeitos principais para o MDP (Figura 27) nota-se que a variação entre as velocidades de corte e avanço por dente é pequena, o que explica a não significância apontada pelos valores de p-value.

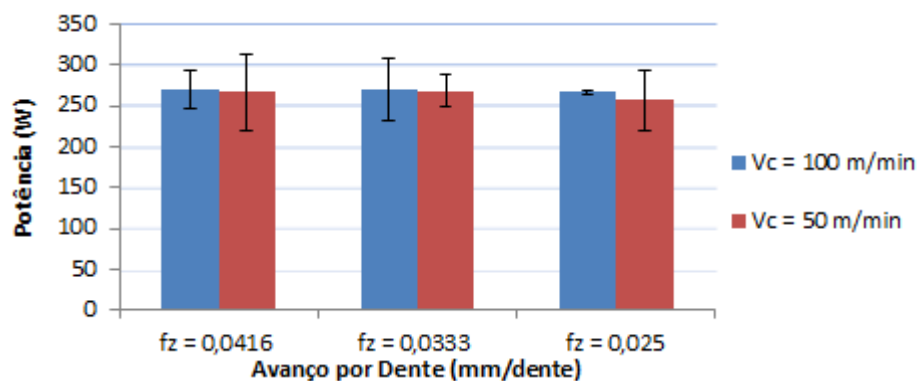
Figura 28 - Interação - Potência MDP



Fonte: O Autor

No gráfico de interação (Figura 28), as inclinações também apresentam pequena declividade. Pode-se concluir pela análise estatística dos resultados que, para o MDP, a variação da velocidade de corte ou do avanço por dente não apresenta influência significativa na potência consumida. Tanto que para o gráfico de resultados, as diferenças para cada velocidade de corte é muito baixa.

Figura 29 - Resultados Potência - MDP



Fonte: O Autor

5.3 ANÁLISES DE VIBRAÇÃO

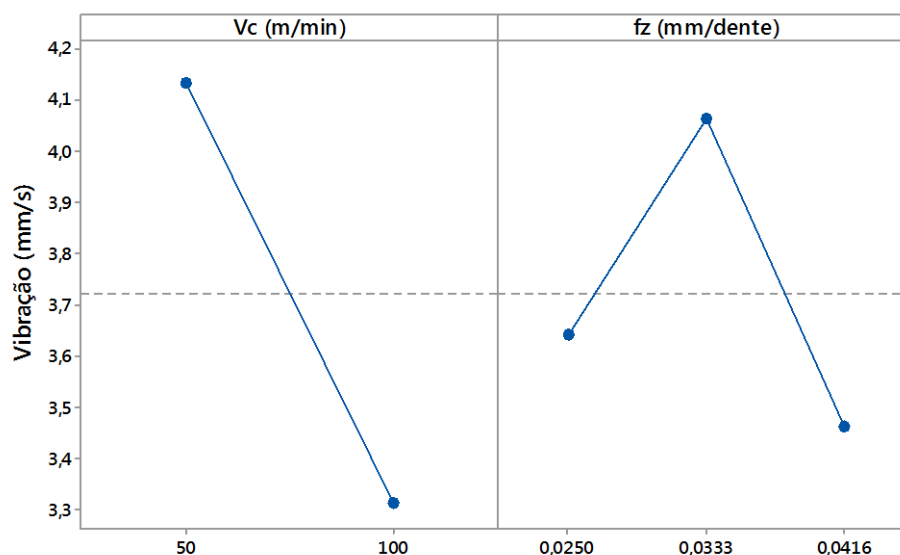
Na velocidade de 50 m/min com avanço por dente de 0,0333 mm/dente, a fresadora entrou em ressonância. Provavelmente a frequência da força de excitação que

mantve a máquina nestes parâmetros chegou muito próximo à frequência natural do sistema. Constatou-se a existência deste fenômeno porque, durante os ensaios, a máquina emitiu um ruído mais agudo que foi notado pelos operadores no local e os resultados de vibração nesta faixa apresentaram um pico para ambos os materiais.

5.3.1 Vibração - MDF

No painel de MDF, os valores de p-value para a velocidade de corte foi igual a 0 e para o avanço por dente foi de 0,009. Portanto para ambas variáveis de entrada pode-se afirmar que são significativas.

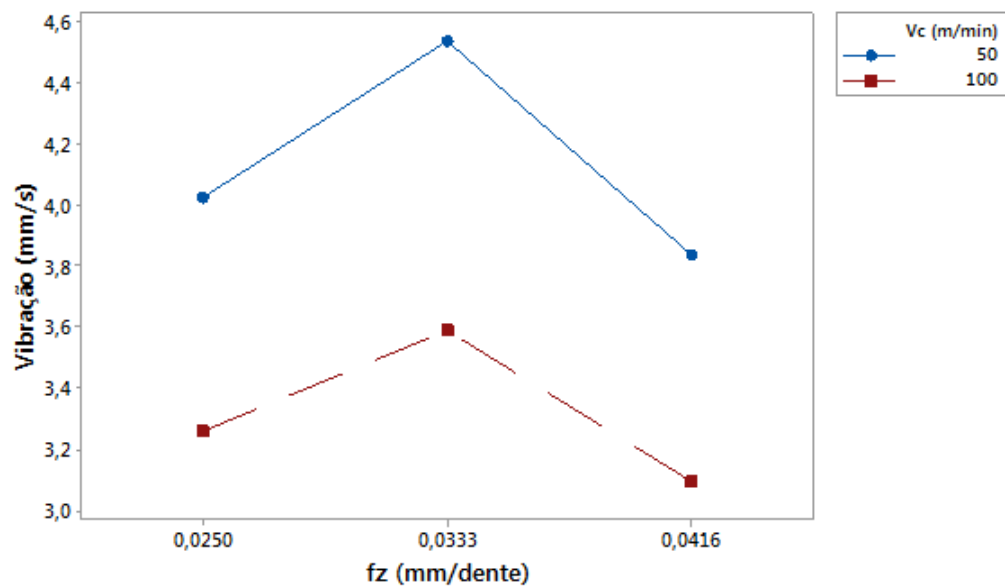
Figura 30 - Efeitos Principais - Vibração MDF



Fonte: O Autor

Nota-se na Figura 30 que quando há o aumento da velocidade de corte, menor é o valor de vibração. Pelo gráfico de interação, é possível notar a existência da ressonância com aumento da vibração no valor de 0,0333 mm/dente.

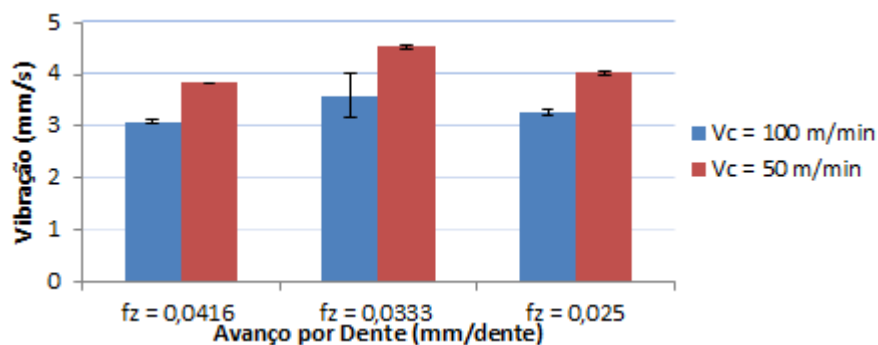
Figura 31 - Interação - Vibração MDF



Fonte: O Autor

Para ambas as velocidades nos ensaios com o painel de MDF ocorreu o aumento da vibração acarretado pela frequência de vibração estar próxima à frequência natural de vibração do sistema (Figura 31). Os picos também podem ser observados para fz igual a 0,0333 mm/dente no gráfico de resultados.

Figura 32 - Resultados Vibração - MDF



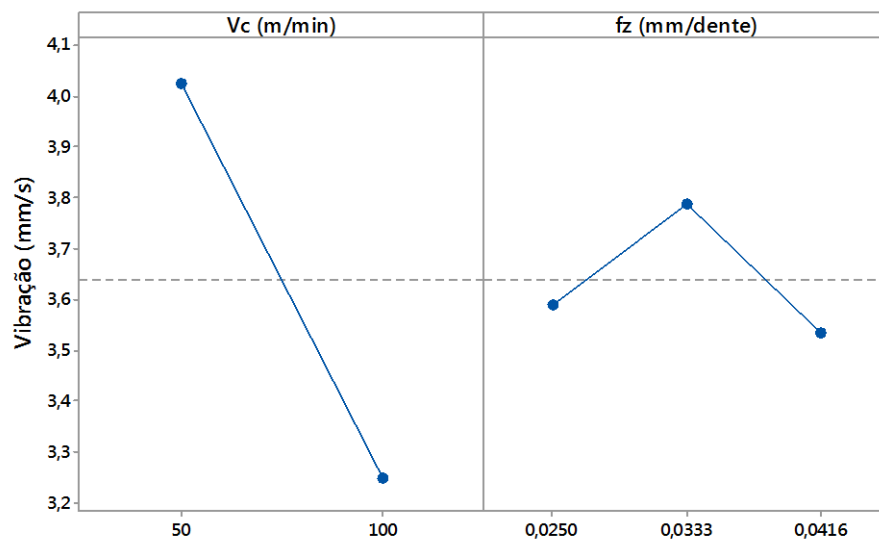
Fonte: O Autor

5.3.2 Vibração – MDP

Os valores de p-value para a velocidade de corte e avanço por dente foram, respectivamente, 0 e 0,054 para o MDP. Embora o valor de fz esteja um pouco acima

dos 5% permitidos pelo teste de análise de variância, pode-se considerar como significativo neste experimento.

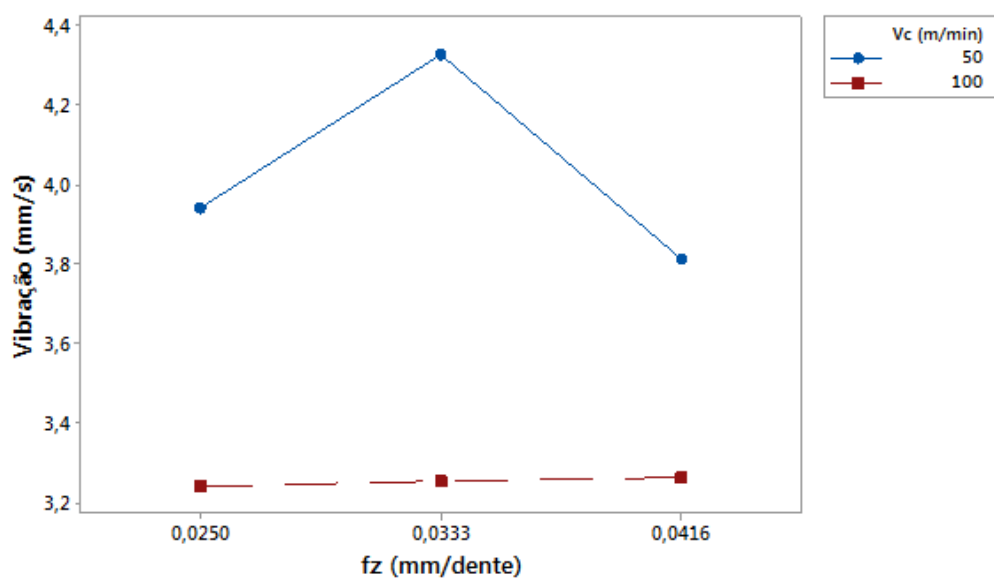
Figura 33 - Efeitos Principais - Vibração MDP



Fonte: O Autor

Assim como no MDF, o painel de MDP apresentou um comportamento semelhante no gráfico de efeitos principais (Figura 33). A vibração caiu com o aumento de Vc e ocorreu novamente o aumento da vibração em $fz = 0,0333$.

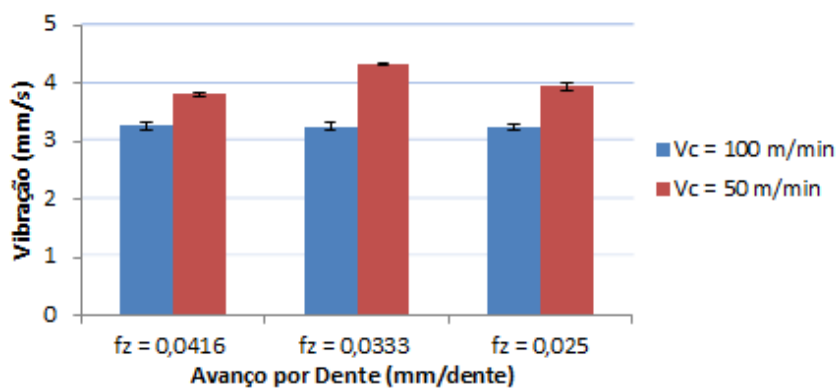
Figura 34 - Interação - Vibração MDP



Fonte: O Autor

Em $V_c = 100$ m/min, não ocorreu o fenômeno da ressonância assim como ocorreu para a velocidade de 50 m/min, fato ilustrado na Figura 34. Entretanto a vibração para a velocidade de 100 m/min é bem mais estável com relação ao avanço por dente do que os resultados para vibração para 50 m/min.

Figura 35 - Resultados Vibração - MDP



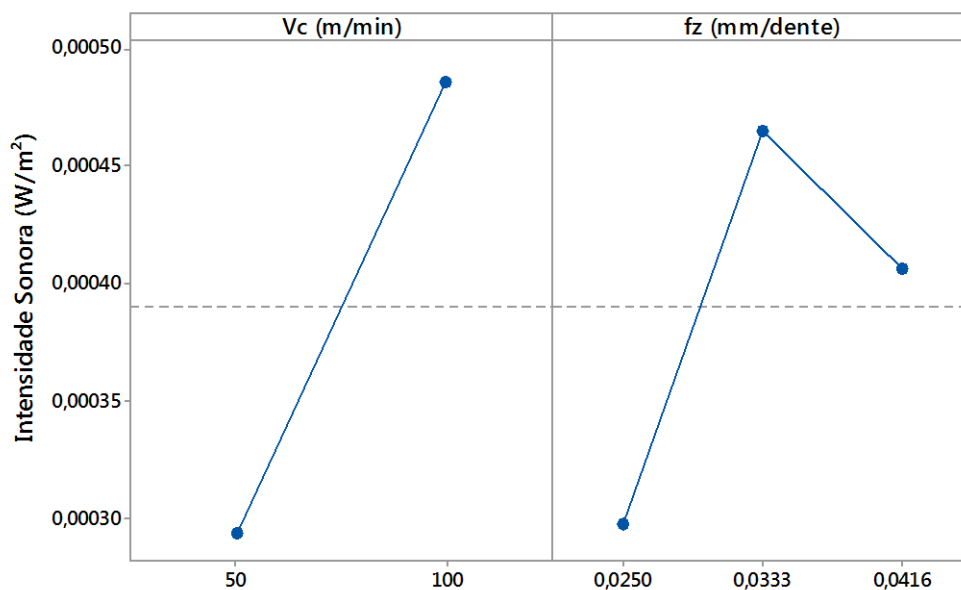
Fonte: O autor

5.4 ANÁLISES DE RUÍDO

5.4.1 Emissão Sonora – MDF

O valor de p-value para a velocidade de corte foi de 0,001, enquanto para o avanço por dente foi de 0,013 – portanto ambos os fatores são significativos.

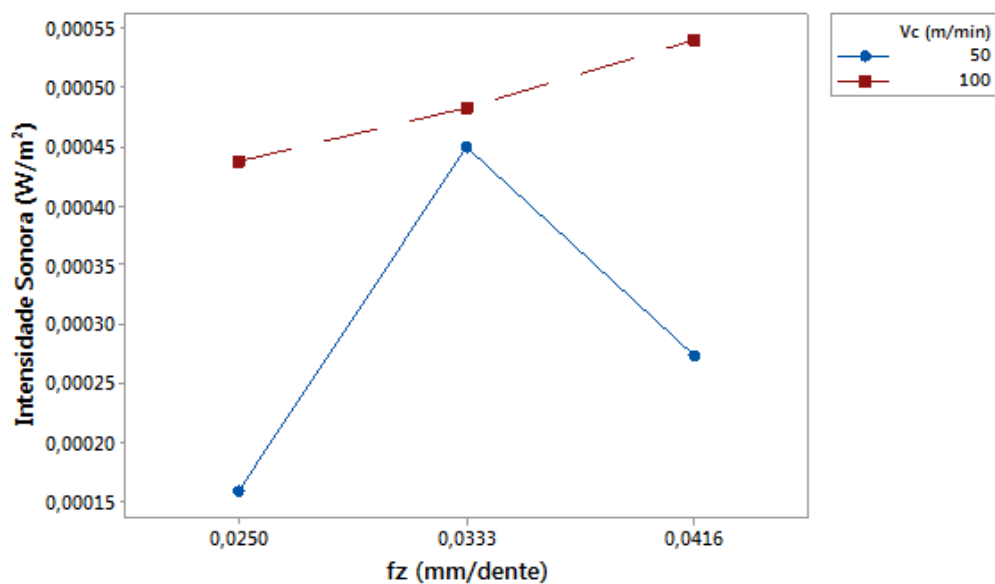
Figura 36 - Efeitos Principais - Ruído MDF



Fonte: O Autor

Com o aumento da velocidade de corte, ocorreu um aumento da intensidade sonora (Figura 36). Para o valor de avanço por dente, ocorre um pico no gráfico de efeitos principais. Para entender melhor este fato, deve-se observar o gráfico de interação (Figura 37).

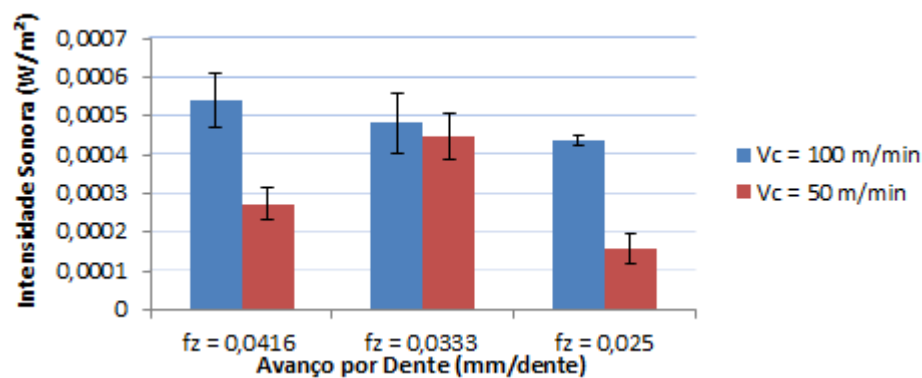
Figura 37 - Interação - Ruído MDF



Fonte: O Autor

Como já comentado na seção de discussão de vibração, sabe-se que houve ressonância na fresadora durante $V_c = 50$ m/min e $f_z = 0,0333$ mm/dente. Portanto o pico de ruído nesta velocidade é explicado por este fenômeno.

Figura 38 - Resultados Ruído - MDF

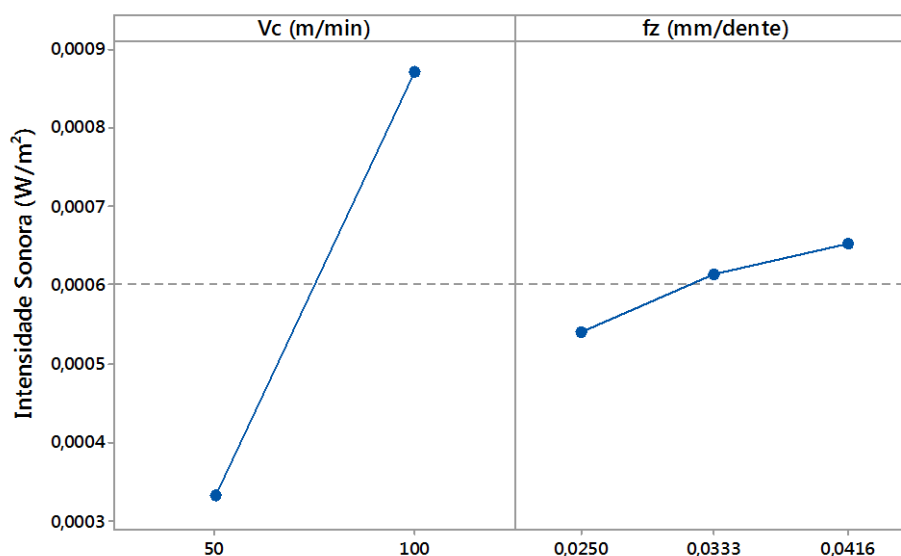


Fonte: O Autor

5.4.2 Emissão Sonora – MDP

O valor de p-value para a velocidade corte foi de 0 e para o avanço por dente foi de 0,054. Embora o valor de f_z esteja um pouco acima dos 5% permitidos pelo teste de análise de variância, considerou-se como um valor significativo para o estudo. Para a interação de duas vias, o valor de p-value foi de 0,007.

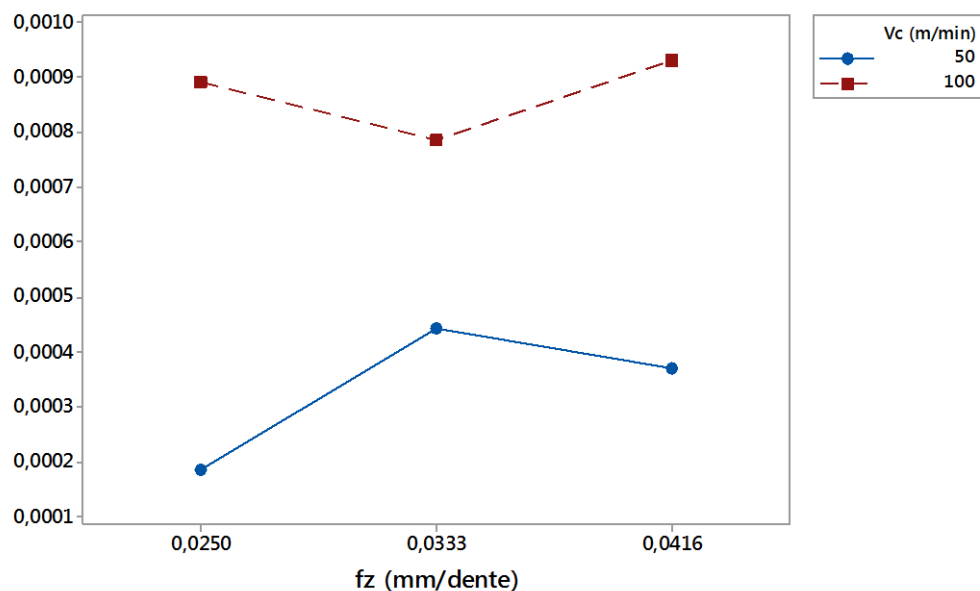
Figura 39 - Efeitos Principais - Ruído MDP



Fonte: O Autor

Assim como o painel de MDF, o painel de MDP também apresenta o acréscimo de ruído emitido conforme o aumento da velocidade de corte. Já para o avanço por dente é notável pela inclinação que a influência deste parâmetro para o ruído é menor.

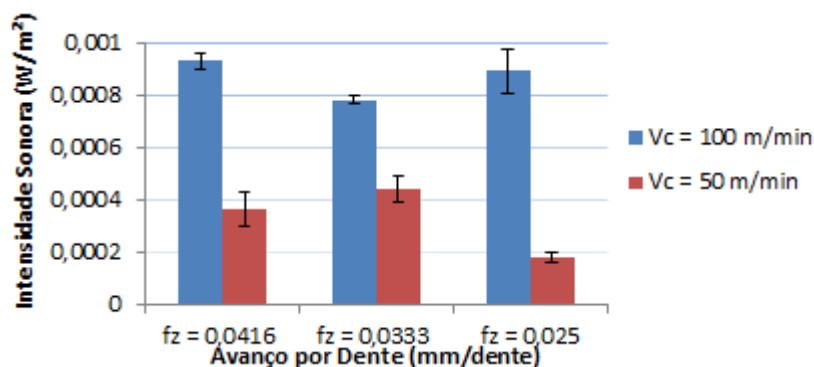
Figura 40 - Interação - Ruído MDP



Fonte: O Autor

No gráfico de interação (Figura 40) é notável que para a faixa onde foi detectada a ressonância em $V_c = 50$ m/min, a intensidade sonora emitida é maior. Já para a velocidade de corte de 100 m/min, onde não se detectou este fenômeno, há uma diminuição do ruído nesta faixa e logo em seguida o acréscimo.

Figura 41 - Resultados Ruído - MDP



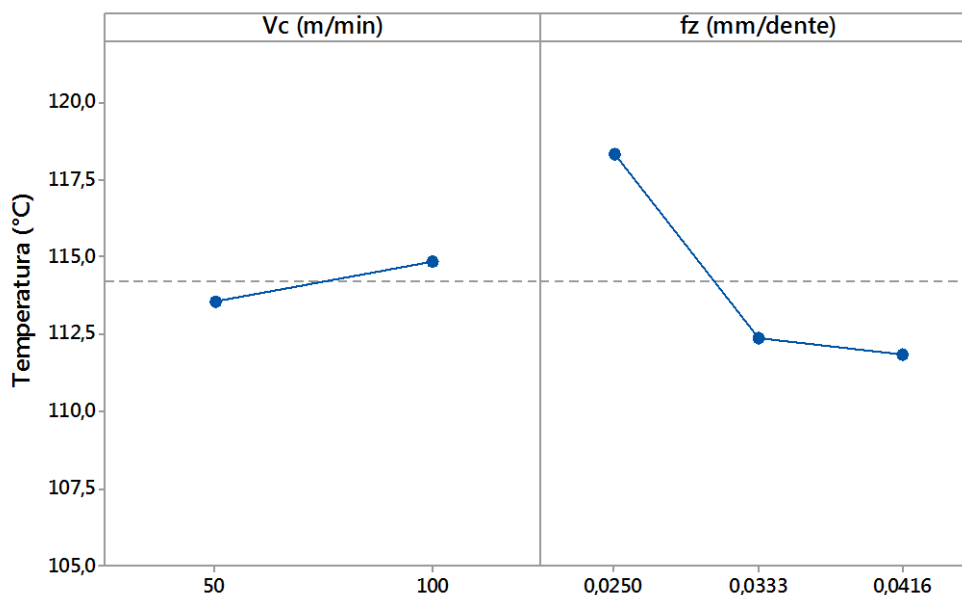
Fonte: O Autor

5.5 ANÁLISES DE TEMPERATURA

5.5.1 Temperatura – MDF

O valor de p-value para a velocidade de corte foi de 0,644 e para o avanço por dente foi de 0,163. Para a interação de duas vias o valor é de 0,702. Os três valores estão acima dos 5% que é permitido para o teste de análise de variância, portanto não são significativos.

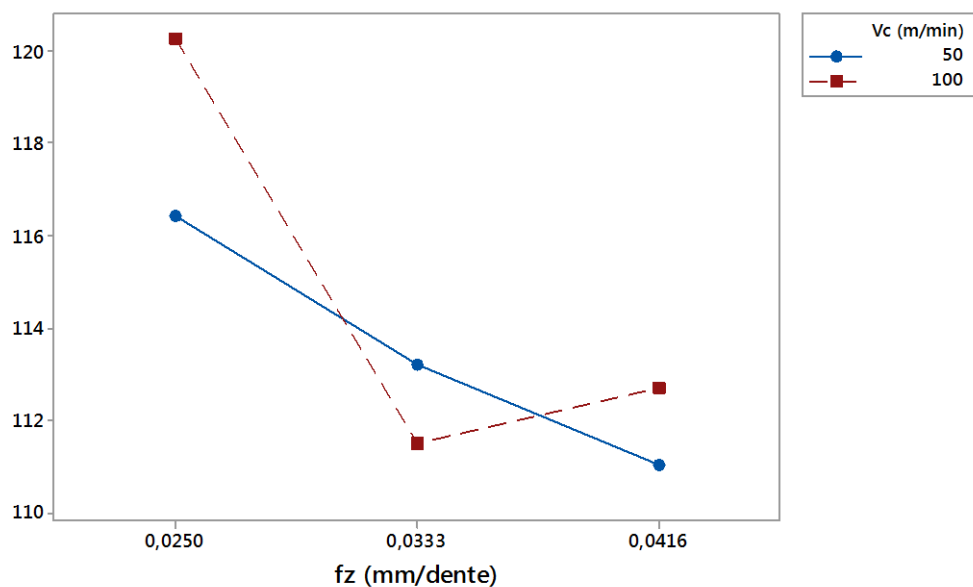
Figura 42 - Efeitos Principais - Temperatura MDF



Fonte: O Autor

Pelo gráfico de efeitos principais (Figura 42), nota-se pela inclinação da variação de temperatura em relação à Vc que é pouca a significância. Em fz, é perceptível que quanto maior o avanço menor é a temperatura durante o processo de corte.

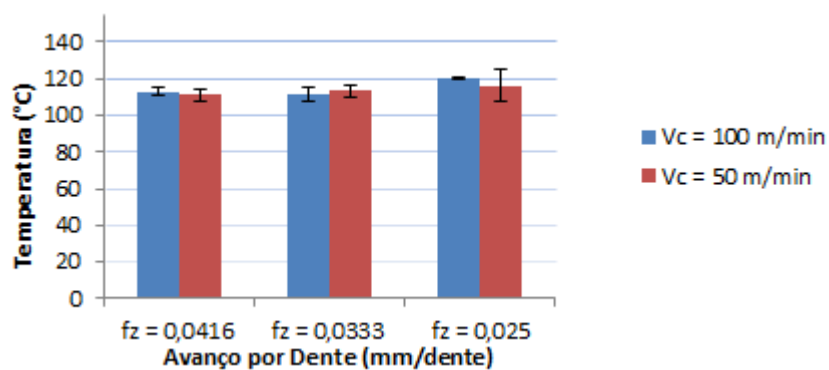
Figura 43 - Interação - Temperatura MDF



Fonte: O Autor

O gráfico de interação (Figura 43) possui a intersecção das duas curvas de velocidade de corte. Para a velocidade de 50 m/min, houve uma tendência de queda conforme o aumento do avanço, mas para a velocidade de 100 m/min não apresenta uma tendência previsível.

Figura 44 - Resultados Temperatura - MDF



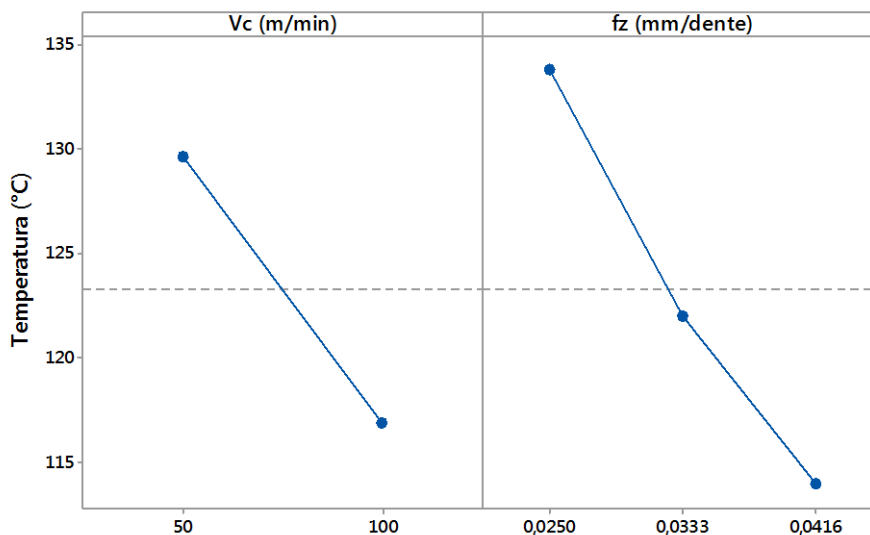
Fonte: O Autor

5.5.2 Temperatura – MDP

Os valores de p-value para a velocidade de corte e para o avanço por dente foram de 0,018. Portanto estes parâmetros podem ser considerados como significativos

com relação à temperatura para o MDP. Quanto a interação de 2 vias, o valor de p-value é de 0,412.

Figura 45 - Efeitos Principais - Temperatura MDP



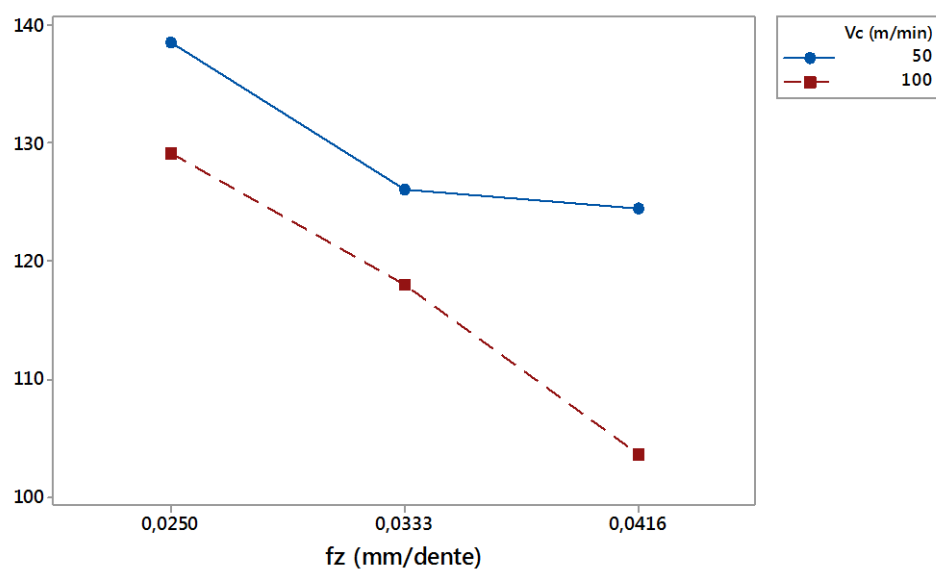
Fonte: O Autor

Tanto para V_c quanto f_z , os valores de temperatura decaíram conforme o acréscimo dos parâmetros de velocidade e avanço (Figura 45). Isto pode ser explicado devido à velocidade com a qual o cavaco é retirado do corpo de prova. Com o aumento da velocidade de corte, mais rápida é a rotação e a retirada de material por dente da ferramenta. Então o calor gerado pelo atrito entre ferramenta e peça acaba se tornando menor devido à retirada veloz deste cavaco aquecido.

Com relação ao avanço por dente, sabe-se que quanto maior este valor, maior será a espessura do cavaco retirado, portanto as trocas térmicas na interface peça-ferramenta-cavaco serão dificultadas pela presença de mais material.

O gráfico de interação (Figura 46) demonstra o comportamento para cada velocidade de corte em função do avanço por dente.

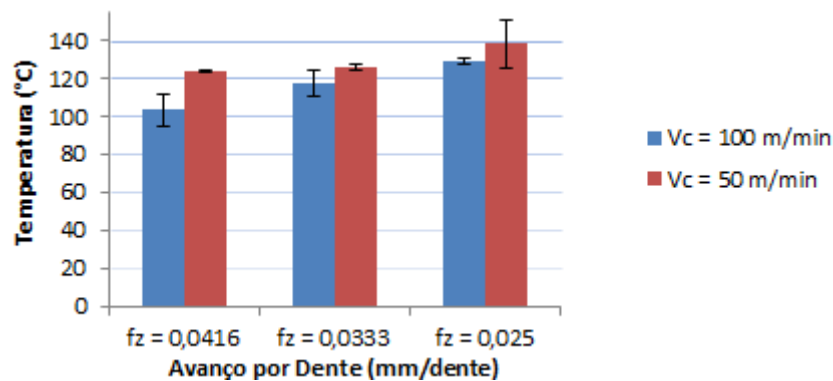
Figura 46 - Interação - Temperatura MDP



Fonte: O Autor

Para ambas as velocidades a tendência é a diminuição de temperatura conforme o aumento do valor de avanço por dente.

Figura 47 - Resultados Temperatura - MDP



Fonte: O Autor

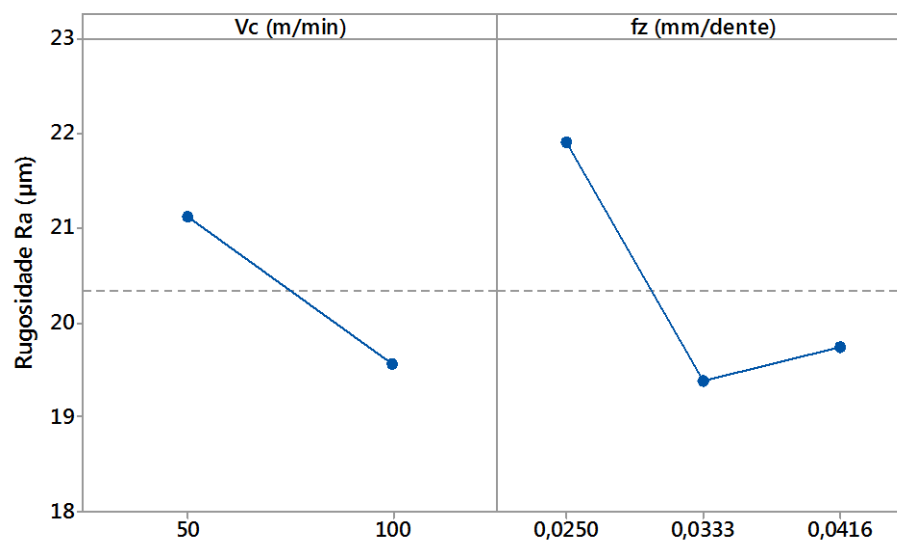
5.6 – ANÁLISES DE RUGOSIDADE

Não foi possível a medição da rugosidade no painel de MDP devido à irregularidade de sua superfície. Os resultados obtidos para a rugosidade foram apenas da superfície do canal fresado no painel de MDF.

5.6.1 Rugosidade Ra – MDF

O valor de p-value para a velocidade de corte foi de 0,100 e para o avanço por dente foi de 0,082. Para a interação de duas vias, o valor é de 0,672. Portanto, dos valores obtidos, nenhum pode ser considerado como significativo ($p\text{-value} < 0,05$).

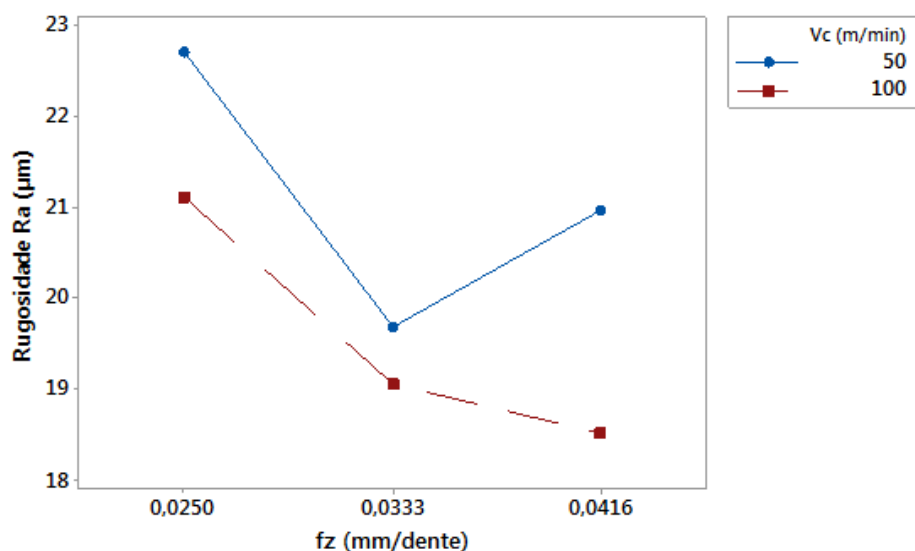
Figura 48 - Efeitos Principais - Rugosidade Ra MDF



Fonte: O Autor

Nota-se pelo gráfico de efeitos principais (Figura 48) que o aumento da velocidade corte diminui o parâmetro de rugosidade média, enquanto os valores de avanço variam conforme cada ponto.

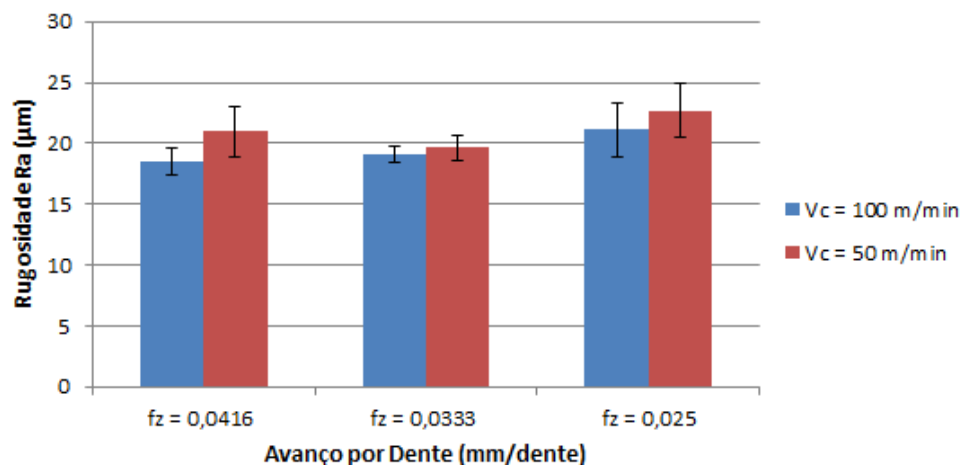
Figura 49 - Interação - Rugosidade Ra MDF



Fonte: O Autor

O gráfico de interação (Figura 49) evidencia que para a velocidade de 100 m/min a rugosidade caiu conforme o aumento do avanço. O que influenciou o gráfico de efeitos principais foi a velocidade de corte de 50 m/min, que apresenta um vale em 0,0333 mm/dente e uma elevação logo em seguida.

Figura 50 - Resultados Rugosidade Ra - MDF

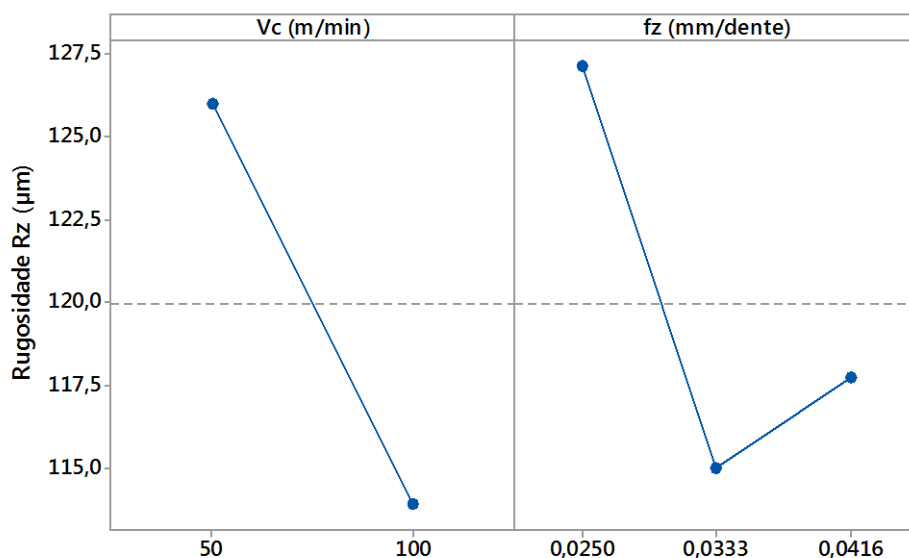


Fonte: O Autor

5.6.2 Rugosidade Rz - MDF

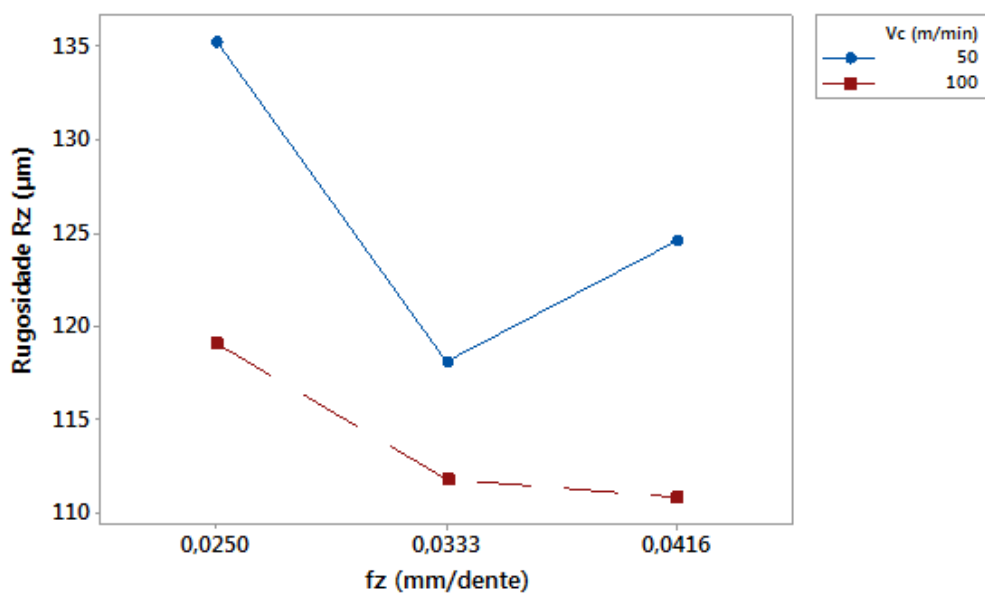
O valor de p-value para a velocidade de corte foi de 0,015 e para a velocidade de avanço por dente foi de 0,071. Portanto apenas para a velocidade de corte há valores significativos de rugosidade Rz.

Figura 51 - Efeitos Principais - Rugosidade Rz MDF



Fonte: O Autor

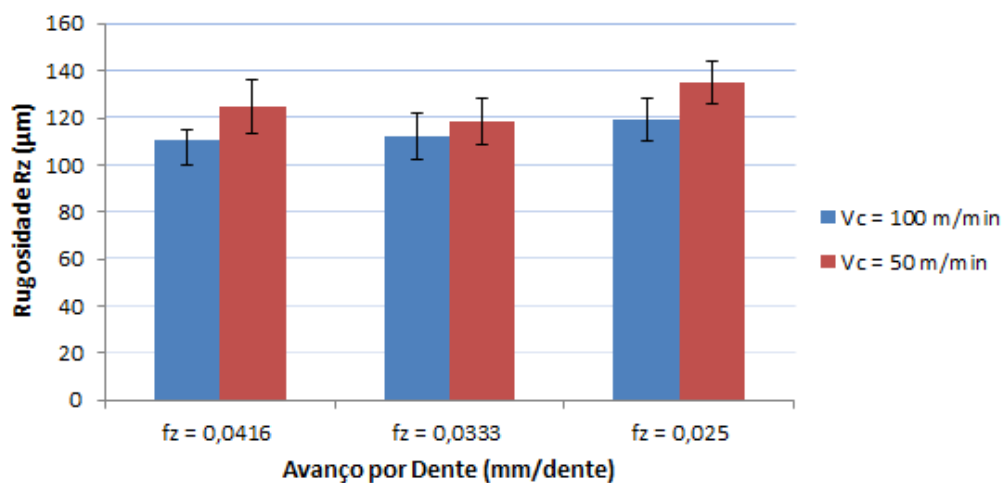
Figura 52 - Interação - Rugosidade Rz MDF



Fonte: O Autor

O comportamento dos gráficos da rugosidade Rz foi semelhante aos resultados obtidos para rugosidade Ra, portanto a discussão serve para ambos. Com a ressalva de que Rz, por ser um valor de média entre os cut-offs, pode-se ter uma dimensão de que o valor de Ra não está disfarçando em sua média o perfil da superfície

Figura 53 - Resultados Rugosidade Rz - MDF

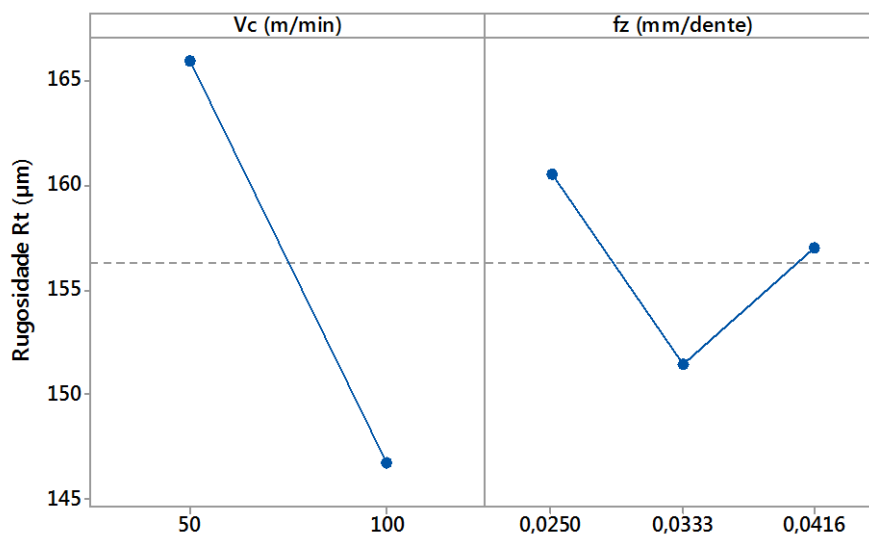


Fonte: O Autor

5.6.3 Rugosidade Rt – MDF

O valor de p-value para a velocidade de corte foi de 0,004 e para a velocidade de avanço por dente foi de 0,278. Para a interação de duas vias o valor foi de 0,090. Portanto apenas para a velocidade de corte há valores significativos de rugosidade Rt.

Figura 54 - Efeitos Principais - Rugosidade Rt

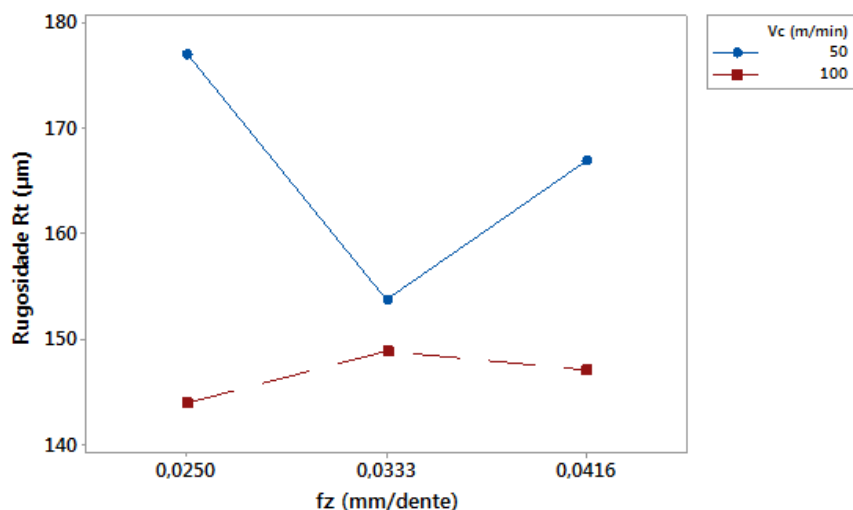


Fonte: O Autor

Para a velocidade de corte nota-se uma grande variação do valor de Rt, fato evidenciado pelo valor de p-value. Portanto para maiores valores de V_c , menores serão

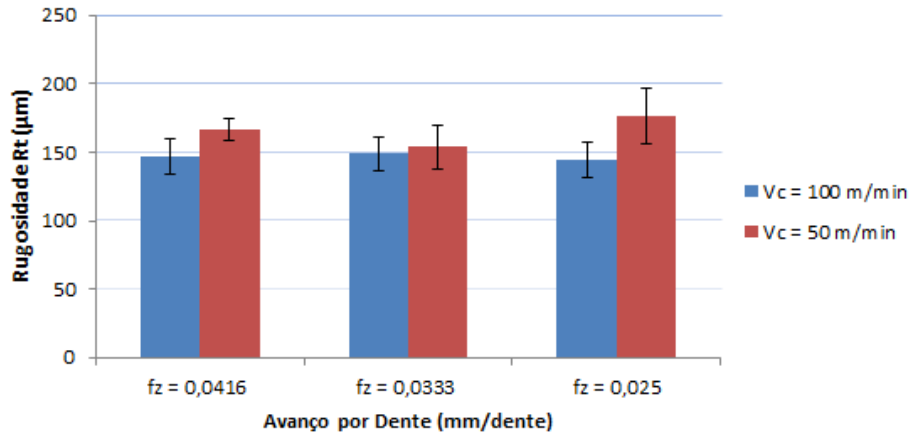
as diferenças entre o maior vale e maior pico dentro do intervalo de medição. Para o avanço na velocidade de corte de 50 m/min, o comportamento foi igual à Ra e Rz.

Figura 55 - Interação - Rugosidade Rt MDF



Fonte: O Autor

Figura 56 - Resultados Rugosidade Rt - MDF



Fonte: O Autor

5.7 ANÁLISE DE DESGASTE DA FERRAMENTA

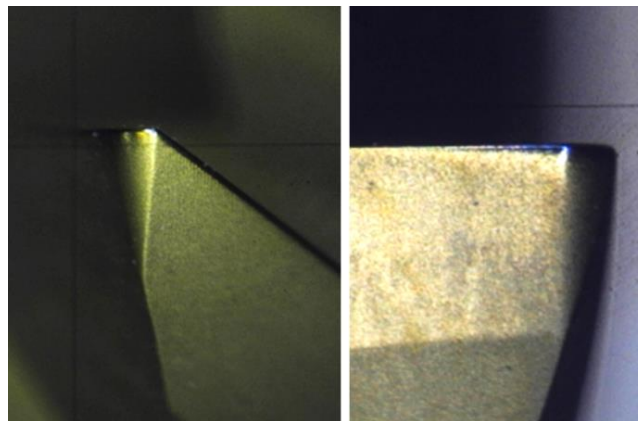
O painel de MDF quase não apresentou desgaste da ferramenta utilizada durante os ensaios. O desgaste foi pequeno, não sendo possível medir com o microscópio. A ferramenta utilizada para o painel de MDP apresentou um início de desgaste de flanco nas arestas dos dentes.

Tabela 2 - Desgaste da ferramenta de corte por aresta.

Aresta	1	2	3	4	5	6
Desgaste (mm)	0,06	0,05	0,067	0,054	0,07	0,06

Fonte: O Autor

Figura 57 - Imagens de desgaste da ferramenta utilizada para o painel de MDP.



Fonte: O Autor.

5.8 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS ENTRE MDF E MDP

O objetivo desta seção é a realizar a comparação do acabamento superficial e dos resultados obtidos no processo de fresamento frontal entre os painéis de MDF e MDP.

Figura 58 - Comparação do acabamento superficial a) MDF; b) MDP



Fonte: O Autor

Na imagem acima é possível notar visualmente as diferenças na superfície. Os corpos de prova feitos de MDF apresentaram uniformidade no acabamento do canal fresado. Não se notou a presença de rebarbas tanto na madeira quanto no adesivo colado. A qualidade superficial do MDF foi claramente superior que o MDP, evidenciado pelo fato de que foi possível medir a rugosidade no painel de MDF, enquanto no painel de MDP não.

Os painéis de MDP apresentaram lascamento de borda no adesivo. A madeira do canal apresentava saliência e maior aspereza. Além disso, o MDP ainda apresentou um arranque de material na lateral dos canais proporcionado pela saída da ferramenta da peça.

Figura 59 - Detalhe com arranque de material na lateral do painel de MDP



Fonte: O Autor

Estes problemas no acabamento superficial são decorrentes por causa do painel de MDP ser constituído por partículas de tamanhos diferentes, dispostos de forma não uniforme. Portanto, durante a quebra deste material, este particulado também é quebrado não uniformemente, causando arranque brusco do adesivo e aparecimento de lascamentos em geral.

Com relação aos resultados de potência de corte, o painel de MDF apresenta valores menores que o MDP. Isto se deve a estrutura do MDP ser constituída de material particulado, exigindo maiores esforços do eixo para manter a rotação a mesma. Devido ao fato do MDF ser feito de fibras, o corte é realizado de maneira mais fácil, diminuindo assim os valores de potência consumida.

Para os valores de vibração, nota-se que para o MDF, na velocidade de 100 m/min o sistema apresentou um pico de vibração devido à ressonância, já o painel de MDP não apresentou este fenômeno nesta velocidade. Para ambos, ocorreu ressonância na velocidade de 50 m/min e velocidade de avanço por dente de 0,0333 mm/dente. Os resultados entre os painéis foram semelhantes fora destes valores específicos.

Com relação à intensidade sonora o painel de MDP apresentou maiores valores de ruído que o MDF, fenômeno também atribuído à sua composição. Para a temperatura, o MDF apresentou menores valores durante o processo que o MDP.

A ferramenta utilizada para o MDF não apresentou desgaste, enquanto para o painel de MDP iniciou-se o processo de desgaste de flanco nas arestas da ferramenta.

6. CONCLUSÃO

A partir dos estudos realizados neste trabalho, pode-se afirmar que o painel de MDF apresenta melhores resultados no fresamento frontal que o painel de MDP dentro dos parâmetros utilizados. O material MDF obteve menor potência consumida, menor valor de emissão sonora, menor temperatura de corte, melhor qualidade superficial e menor desgaste da ferramenta em comparação com os valores obtidos para o MDP. Quanto aos resultados de vibração, ambos os materiais apresentaram comportamento semelhante.

Os resultados indicam que o processo de fresamento para o MDF apresenta menores custos, tanto com energia elétrica devido à menor potência consumida, quanto com as ferramentas, que não apresentaram desgaste. . O menor ruído promove melhores condições de trabalho para os operários. O acabamento superficial apresentou baixos valores de rugosidade para o MDF, o que num processo industrial diminui-se o tempo de produção, por não ser necessário passar por mais alguma etapa de desbaste ou acabamento

Todos os resultados obtidos são de extrema importância para o conhecimento do comportamento destes materiais. Estes dados podem ser utilizados como base para a determinação dos parâmetros a serem escolhidos para o fresamento de ambos os painéis de madeira. Conhecendo as respostas do MDF e do MDP no processo de usinagem, podem-se conter custos de máquina-ferramenta e se preparando para fenômenos inesperados (como o caso da ressonância encontrada durante os estudos de vibração), obtendo-se melhores resultados e otimizando o processo como um todo.

Como trabalhos posteriores, pode-se continuar o estudo sobre a influência da velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal, alterando os valores destes parâmetros. Pode-se também estudar a questão da frequência natural da fresadora, que foi um fator que influenciou nos resultados de vibração.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405**: rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 513**: classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas: denominação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: painéis de partículas de média densidade, parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15316-2**: painéis de fibras de média densidade, parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013b.

BELONE, Igor Alves. **Caracterização físico-mecânica de painel de MDP produzido com madeira de eucalipto e bracatinga**. 2010. 78 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Itapeva. Itapeva, 2010.

BONIFÁCIO, Marcos Eduardo Reis. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**. 1993. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

BORTOLANZA, João Fábio. **Previsão de vibração do tipo chatter no fresamento de placas finas**. 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2016.

DEUS, Priscila Roel. **Análise do processo de fresamento de MDF em centro de usinagem CNC**. 2014. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Artiliber Editora Ltda, 2001. 244 p.

GRZESIK, Wit. **Advanced machining processes of metallic materials**. 2 ed. Amsterdam: Elsevier., 2008. 608f.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores (Brasil). **Cenários Ibá**. 2015. Disponível em: <<http://iba.org/pt/dados-e-estatisticas/cenarios-iba>>. Acesso em: 23 jul. 2017.

IWAKIRI, Setsuo. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247p.

LÍDER INTERIORES. **MDF ou MDP: você sabe a diferença entre os dois?** 2016. Disponível em: <<http://www.liderinteriores.com.br/blog/mdf-ou-mdp-voce-sabe-qual-e-a-diferenca-entre-os-dois/>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 397 p.

MALONEY, T. M. The Family of wood composite materials. **Forest Products Journal**, v.46, n.2, p.19-26, feb. 1996.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Inc, 1993. 689p.

NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Acústica técnica**. São Paulo: Etegil - Editora Técnico-gráfica Industrial Ltda., 1968. 578 p.

SANTOS, Ubiratan de Paula et al (Org.). **Ruído: riscos e prevenção**. 3. ed. São Paulo: Hucitec, 1999. 157 p.

SECO TOOLS. **Catalogue & Technical Guide**. 2014. Disponível em: <<https://www.dako.net.pl/katalogi/obrobkaskrawaniem/seco/frezowanie/index.html#1>>. Acesso em: 19 ago. 2017.

SILVA, Vinícius Augusto Diniz. **Predição de forças e vibração no fresamento com fresa toroidal**. 2017. 138p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

STEPHENSON, David; AGAPIOU, John. **Metal cutting theory and practice**. New York: Marcel Dekker , 1997. 347 p.

TORQUATO, Luciane Paes. **Caracterização dos painéis dos painéis MDF comerciais produzidos no Brasil**. 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

ZACARIAS, Demetrio. **Efeitos da termorreificação de madeiras de reflorestamento no processo de fresamento**, 2016. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2016.